

Handbook of Optical Holography

H. J. CAULFIELD

Aerodyne Research, Inc.
Redford, Massachusetts

Оптическая голография

В 2-х томах

Под редакцией Г. КОЛФИЛДА

ТОМ **2**

*Перевод с английского
под редакцией
д-ра физ.-мат. наук, проф.
С. Б. ГУРЕВИЧА*

Academic Press

A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers
New York London Toronto Sydney San Francisco
1979

МОСКВА «МИР» 1982

Глава 9

ОТДЕЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГОЛОГРАФИИ

9.1. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ОБРАБОТКА

С. Бентон

Авторы: Ж. Апрель, А. Арсено, Н. Баласубрамания и др.

О-62 **Оптическая голография:** Пер. с англ./Под ред. Г. Кол-
филда.— М.: Мир, 1982—Т. 2—736 с., ил.

Коллективная монография, написанная ведущими специалистами США и Канады, охватывает почти все вопросы, связанные с теорией и практическим применением оптической голографии и оптических методов обработки информации.

В русском переводе книга издается в 2-х томах. В том 2 вошли главы 9 и 10, в которых рассматриваются отдельные проблемы голографии и области ее применения; в него включено также Дополнение, написанное чл.-корр. АН СССР Ю. Н. Денисюком и посвященное некоторым проблемам и перспективам голографии в трехмерных средах.

В книге содержится множество новейших справочных данных, что делает ее замечательным практическим руководством для специалистов, применяющих голографические методы.

О $\frac{1704050000-068}{041(01)-82}$ 50—82, ч. 1

ББК 22.343.4
535

Редакция литературы по физике

9.1.1. Выбор материала

Известно, что голограммы можно записывать на самых разнообразных материалах, включая электрооптические кристаллы и термопластические пленки. В работе [19] дан исчерпывающий обзор некоторых из этих материалов, получивших наиболее практическое применение; среди них все еще выделяются галогенидосеребряные фотографические материалы благодаря своей надежности, доступности, высокой чувствительности и вообще хорошим характеристикам. Хотя они и требуют некоторого времени для обработки и при нормальном использовании не обладают способностью к дополнительной записи или стиранию, они продолжают оправдывать прозвище «единственный друг голографиста». В этом разделе мы рассмотрим методы получения большинства из доступных в настоящее время промышленных материалов и попытаемся указать некоторые направления будущего прогресса.

Поскольку при записи голограмм используются пространственные частоты, значительно превышающие пространственные частоты, регистрируемые в обычной фотографии, в голографии применяются, как правило, эмульсии очень низкой чувствительности и настолько мелкозернистые, что они практически прозрачны. Тончайшая зернистость создается сферическими микрокристаллами бромида серебра (с небольшим количеством йодида и некоторыми сенсibilизаторами) диаметром около 30 нм и требует, как указано в табл. 1, экспозиции от 1000 до 3000 эрг/см². Другие, так называемые «голографические эмульсии», могут иметь зерна до 100 нм в поперечнике, требующие экспозиции 50 эрг/см² (или, если не отбеливать, 5 эрг/см²), хотя обычные мелкозернистые материалы (размеры зерна порядка 500 нм, экспозиция ~0,1 эрг/см²) могут быть полезными для специальных применений при малых углах падения опорного пучка, когда или энергия лазера или время экспонирования существенно ограничены.

Наиболее известные галогенидосеребряные материалы для голографии изготавливаются фирмами «Eastman Kodak Company» в США и «Agfa — Gevaert» в Бельгии. В США они продаются главным

Таблица 1

Галогенидосеребряные материалы для записи голограмм

Приблизительный диаметр зерна, нм	Фирма-изготовитель и тип материала	Приблизительная экспозиция для отбеленных голограмм *, эрг/см ²		
		488 нм	514 нм	633 нм
37	AG 8E56 HD	1000	700	—
50	EK 120, SO-173	16 000	16 000	1600
	EK HRP, SO-343	1000	1600	—
55	AG 8E75	8000	8000	800
58	EK 649-F	550	500	700
65	EK 125, SO-424	45	35	—
70	EK 131, SO-253	80	35	12
88	AG 10E75	—	—	25
	AG 10E56	30	40	—

*Проявлены в РААР и отбелены бромной водой. Это не требуется по инструкции фирм-изготовителей, и можно проводить любые изменения без уведомления фирмы.

образом через распределителей¹⁾. Доступные материалы и варианты их исполнения могут меняться в очень широком диапазоне, так что мы рекомендуем читателям требовать информацию о современных материалах и рекомендации у изготовителей. Во многих обучающих лабораториях начинают работу со стеклянных пластинок размером 10,16×12,7 см либо фирмы «Agfa — Gevaert» «Holotest 8E75», либо фирмы «Eastman Kodak» (тип 120 с противоореальным покрытием для пропускающих голограмм и без покрытия для отражающих голограмм); по мере накопления опыта переходят к работе с другими типами пластинок.

В принципе спектральную чувствительность эмульсии можно изменять, варьируя состав смеси вводимых сенсibilизаторов. К сожалению, сравниваемые материалы часто не пригодны для работы одновременно в красном и сине-зеленом вариантах сенсibilизации, и поэтому выбор лазера может зависеть от того, какие материалы мы имеем в распоряжении. Единственными материалами, сенсibilизированными как к красному, так и к зеленому и синему, являются EK649-F и 131/SO-253.

Нередки случаи, когда в наличии имеется одна и та же эмульсия, нанесенная на стеклянные пластинки или на гибкую пленку. Для начинающего голографиста, по-видимому, легче всего начать с обработки пластинок, которые, как правило, дают результаты лучше-

¹⁾ Scientific Products Department, Agfa — Gevaert, Inc., 275 North Street, Teterboro, N. J. 07608, а также через Scientific Photography Markets, Department 756, Eastman Kodak Company, 343 State Street, Rochester, N. Y. 14650.

го качества. Однако пластинки склонны к образованию дефектов и непостоянству свойств при изготовлении, и, кроме того, их относительно высокая стоимость приводит к тому, что на практике главным образом используют пленочные материалы. В последнем случае высокая стоимость держателей пленки, таких, как вакуумные прижимы, может превысить экономию, получаемую за счет непрерывного экспонирования и обработки рулона пленки. Хотя полиэфирные пленки являются механически более прочными и химически более стойкими к обрабатывающим растворам по сравнению с ацетатными основами, но их двулучепреломление меняет поляризацию проходящего света, так что применение их нежелательно как при получении художественных голограмм, так и для обработки информации. Противоискривающие и противоореольные свойства пленочной основы материалов также изменяются в широких пределах.

В этом практическом справочнике важно указать на то, что между конкурирующими материалами существуют систематические различия. Оказывается, чувствительность эмульсий фирмы «Agfa — Gevaert» больше, чем у материалов фирмы «Eastman Kodak», причем чувствительность пластинок AG 8E 75 в четыре раза превышает чувствительность пластинок EK120. Следует также заметить, что материалы в большой степени страдают от действия косметических дефектов и от слабого крепления пластинок при экспонировании, так что их использование не всегда оправдывает наши надежды. В США голографическая промышленность развита довольно широко, поэтому для практического использования обычно применяют отечественные материалы. Поскольку производство и продажа голографического материала постоянно увеличивается, положение дел может заметно измениться, и это уже реализуется в настоящее время.

9.1.2. Хранение

Галогенидосеребряные фотографические материалы являются значительно более стабильными при хранении, чем большинство других регистрирующих сред, но из-за небольшого размера зерен голографические материалы оказываются более чувствительными к температуре и времени хранения по сравнению с обычными фото-материалами. Лучшие результаты получаются при условиях хранения, которые должны быть приняты повсюду и считаться нормальными, а именно материалы следует хранить в холодильнике при температуре 0—7°C с момента их доставки и вплоть до момента непосредственного их применения. Прежде чем вскрыть защитную фольгу или восковую бумагу, в которую упакован материал, во избежание конденсации материал необходимо подвергнуть медленному нагреванию до комнатной температуры в течение нескольких

часов в случае небольшой коробки пластинок и сутки для большого рулона пленки. Если влагозащитная упаковка вскрыта, то фотографический материал нельзя снова охлаждать, пока его не запечатывают снова вместе с влагопоглотителем. Открытые материалы должны храниться при температуре ниже 27°C. Разрушение материала происходит настолько медленно, что никаких крайних мер принимать не нужно, но увеличение плотности вуали проявленных неэкспонированных пластинок является доказательством того, что время жизни материала истекает. Охлажденные материалы, если они защищены от влаги, будут храниться фактически бесконечно.

Процесс, который можно связать с хранением, заключается в снятии напряжений в эмульсиях перед их использованием. Некоторые типы стеклянных пластинок подвергаются неравномерному сжатию эмульсии во время покрытия и сушки. Однако качество таких эмульсий можно улучшить, если пластинки нагреть примерно до 80°C, выдержать при очень высокой влажности (~90%) в течение часа или около того, а затем высушить и охладить до комнатной температуры. В течение этого цикла пластинки должны находиться в горизонтальном положении, для того чтобы избежать перенапряжения [15]. В действительности это довольно рискованный процесс. В результате слишком энергичных действий может появиться вуаль, а несоответствующее оборудование может привести к конденсации капель на пластинках и к их разрушению. Однако наблюдалось существенное улучшение качества изображения, особенно в относительно мягких эмульсиях, таких, как AG 8E 75. Подобный циклический процесс может оказаться также полезным при сушке пластинок.

9.1.3. Обращение с регистрирующими материалами во время экспонирования

Малейшее движение регистрирующего материала во время экспонирования может заметно снизить дифракционную эффективность или даже привести к появлению темных полос поперек голограммы. Таким образом, главным требованием является устойчивое крепление материала во время экспозиции и стабильное изменение положения в случае интерферометрии. Методы крепления регистрирующих материалов с жесткой основой (стекло) и регистрирующих материалов на гибкой основе (пластиковая пленка) развивались независимо друг от друга.

9.1.3.1. Крепление стеклянных пластинок

Держатели типа краевого зажима были первыми удачными конструкциями держателя пластинок; промышленностью выпускается множество удобных и хорошо выполненных вариантов держателя такого типа. В общем случае пластинка удерживается на плоской

поверхности зажимами или пружинами, расположенными по крайней мере вдоль двух краев пластинки, а для точной ее установки используются специальные установочные штифты. Однако пластинка может еще колебаться как мембрана под действием звуковых волн, и, чтобы избежать этого, нужно применять пластинки значительной толщины. Серьезной жалобой художников является то, что края пластинок заслоняются тенями. Однако при проведении интерферометрических исследований интерференционных полос методом реального времени центральную часть пластинки можно оставить открытой.

Можно сделать недорогой, хотя и несколько менее точный, держатель пластинок с вакуумным прижимом (рис. 1). В этом случае пластинка крепко прижимается к рамке благодаря тому, что с одной стороны она находится под атмосферным давлением, а с другой ее стороны вручную создается низкое давление¹⁾. Если резиновую прокладку содержать в чистоте и по возможности влажной, то можно вообще избежать сползания пластинки. Вакуумный прижим располагается несколько выше центра держателя, с тем чтобы уменьшить амплитуду колебаний звенящих краев; по этой же причине низ основания держателя покрывается войлоком, что к тому же облегчает установку держателя.

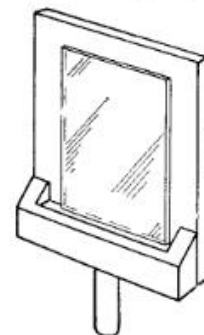


Рис. 2. Держатель пластинок с капиллярным прижимом.

Однако мы обнаружили, что свойство капилляра дает ключ к созданию универсального держателя пластинок. В этом случае между стеклянной пластинкой и плоской жесткой поверхностью держателя вводится жидкость, имеющая малую вязкость и высокое поверхностное натяжение (рис. 2). После сушки, проводимой в течение нескольких минут, пластинка прочно и устойчиво закрепляется на держателе, причем имеется некоторая

¹⁾ Ручные вакуумные прижимы продает фирма «General Hardware Manufacturing Company, Inc.» (80 White Street, New York, N. Y. 10013).

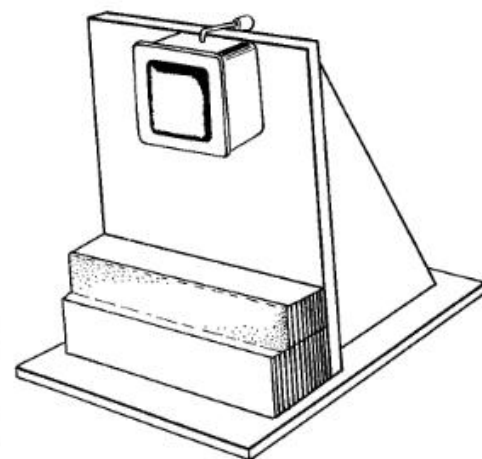


Рис. 1. Держатель пластинок с вакуумным прижимом.

жесткость системы определяется в основном жесткостью основания. Таким способом в очень трудных условиях были получены отражательные голограммы на стеклянных пластинках. Если стеклянная пластинка с обратной стороны имеет черное покрытие, то это значит, что такая пластинка предназначена для получения пропускающих голограмм. Мы обнаружили, что ксилол представляет собой очень полезную капиллярную жидкость с приемлемым коэффициентом преломления, а его летучесть упрощает очистку пластинки после экспонирования. Однако при работе с ним, как и со всеми другими органическими растворами, нужно соблюдать осторожность и иметь хорошую вентиляцию, хотя токсичность его и не высокая.

9.1.3.2. Крепление регистрирующих материалов на пленочной основе

Из-за гибкости материалов на пленочной основе и их тенденции к скручиванию ни один из рассмотренных выше способов крепления не пригоден. Первым шагом к решению проблемы крепления в данном случае является размещение пленки между чистыми стеклянными пластинками, сжимаемыми по краям. Однако при этом возникает множество отражений от границы стекло — воздух, которые нарушают однородность освещения и ухудшают качество изображения. В данном случае помогает наполнение такого сэндвича иммерсионной жидкостью (жидкостью с согласующим коэффициентом преломления), но это может оказаться неудобным в работе.

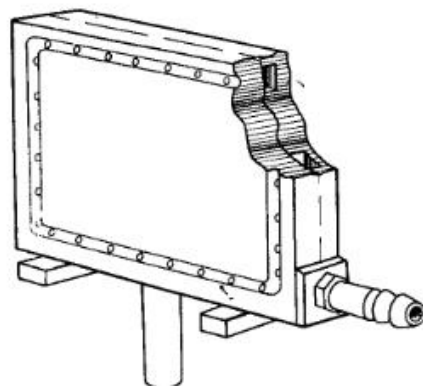


Рис. 3. Держатель пленки с вакуумными каналами (вид с разрезом).

В случае пленки большой успех выпал на долю держателя с вакуумной спинкой. В этом держателе создают вакуум между пленкой и жесткой плоской поверхностью (спинкой). Воздух удаляется через множество отверстий, распределенных по спинке за пленкой. Но при наблюдении восстановленного изображения из-за нарушения брэгговского условия дифракции становятся заметными ямки, образующиеся на пленке над каждым отверстием. Поэтому мы вместо отверстий используем одиночный канал, расположенный вокруг кадра (рис. 3), причем успех в этом случае зависит от того, будет ли спинка действительно плоской (что определяется конечной полировкой поверхности), и, по-видимому, от длины кадра, которая должна быть такой, чтобы можно было удалить весь воздух из-под пленки.

Но в этом случае каждая оставшаяся под пленкой пылинка будет давать тот же эффект, что и ямки. Таким образом, наилучшего качества изображения можно добиться лишь применением материалов на стеклянных подложках; исключение составляет случай, когда для экспозиции используется импульсный лазер, причем отсутствуют какие-либо требования к жесткости крепления, хотя обеспечение плоскостности пленки может все еще создавать проблему.

9.1.4. Обработка

9.1.4.1. Введение

В литературе вопросам обработки голограмм уделяется гораздо больше внимания, чем другим аспектам практической голографии, однако до сих пор эти вопросы остаются не решенными из-за того, что мы еще плохо разбираемся в тонкостях рецептов и методов. В последнее время стали больше внимания обращать не на отбеливание, а на проявители, причем теперь считают, что все операции процесса обработки голограмм взаимосвязаны. Эти исследования еще не дали окончательных результатов. Для того чтобы вызвать интерес к отдельным исследованиям, мы рассмотрим в общих чертах принципы химической обработки материалов на нескольких примерах, имеющих практическое значение.

9.1.4.2. Оборудование

Голографическая темная комната напоминает обычную темную комнату для фотопечати, поскольку в том и другом случае требования к обработке фотографических материалов почти одинаковы. В голографической комнате можно применять большую часть обычного оборудования, хотя экзотические проявители, отбеливатели и органические растворители могут ограничить применение ряда материалов, из которых изготавливаются емкости для обработки фотографических материалов. В комнате нужно отвести специальное место для резки пластинок и их сушки. Во многих случаях для проведения процессов отбеливания и спиртовой сушки требуется очень хорошая вентиляция и наличие вытяжного шкафа для улавливания испарений.

До сих пор для обработки голограмм, особенно голограмм большого размера, наиболее удобным и экономичным является использование открытых пластмассовых ванночек. Глубокие баки, разумеется, более компактны и удобны при обычной обработке, кроме того, в них значительно сокращается поверхность окисления проявителя. Однако по сравнению с ванночками баки требуют большего количества раствора и специальных держателей, чтобы избежать прилипания пластинок и пленок к стенкам бака за счет капил-

лярных явлений. Баки очень больших размеров изготавливаются из акриловой пластмассы. Поскольку температурные режимы обработки фотоматериалов для записи голограмм почти такие же, как и в случае обработки черно-белых фотоматериалов, для управления температурой достаточно иметь простые водяные рубашки.

9.1.4.3. Проявители для голографии

С 1964 г. рабочим коньком голографического проявления был проявитель D-19 фирмы «Eastman Kodak» (в Европе сравнимые с ним свойства имеет проявитель G3p фирмы «Agfa — Gevaert»). Трудно сказать, что проявитель D-19, за исключением того, что он может работать и уже широко применяется в голографии, имеет какие-либо специфические особенности для этого, поскольку его свойства оптимизировались для черно-белого негативного проявления. Очевидно, что успехи голографии будут серьезно зависеть от рецептов фотохимической обработки, оптимизированных не столько для обработки используемых сверхмелкозернистых материалов, сколько для выявления высоких пространственных частот, преобладающих в голографической записи. Тем не менее проявитель D-19 может хорошо работать при соответствующих условиях, он широко распространен и может служить ценным примером. Рецепты составления проявителей прошли долгий путь проб и ошибок, и серьезную информацию по этому вопросу можно получить лишь путем тщательного изучения соответствующей литературы и проведения большого числа экспериментов [8, 14]. Рассмотрим теперь два механизма проявления, используемых в голографии, и проиллюстрируем их несколькими рецептами проявителей, имеющих практическое значение. Однако еще много нужно поработать, чтобы добиться успеха в этом направлении, и ряд исследователей имеют достаточно хорошие условия, чтобы внести свой вклад в развитие этой важной области.

9.1.4.4. Механизмы проявления

В упрощенном виде проявление происходит следующим образом: в каждом освещенном микрокристалле при проявлении молекулы галогенида серебра распадаются на одинаковое число атомов серебра, образующих зерна, и ионов галогена, диффундирующих прочь. Этот процесс называется «прямым» или «химическим» проявлением; в большинстве случаев он представляет собой действительно главный механизм и приводит к взрывчатому переходу (превращению) с образованием продолговатых червеобразных зерен серебра [10]. Но во многих случаях к зернам добавляется значительное количество серебра благодаря процессу, называемому «физическим» проявлением, которое выделяет атомы серебра из почти не про-

явленных микрокристаллов. Этот процесс начинается с травления поверхности микрокристалла растворителями галогенида серебра, такими, как сульфит, тиосульфат или ионы тиоцианата, благодаря которым создаются подвижные комплексы серебра. Эти комплексы диффундируют до тех пор, пока они не столкнутся друг с другом в подходящем для выпадения осадка месте, где проявляющий раствор может превратить их в нерастворимое металлическое серебро. Место осаждения обычно находится по соседству с уже проявленным зерном серебра, и диффундировавшее серебро накладывается на него (зерно) более или менее однородно; при этом из червеобразных зерен серебра образуются сферические частицы. В обычных эмульсиях проявленное физически серебро стремится затеряться внутри больших зерен, состоящих из многих нитей, но в сверхмелкозернистых эмульсиях, предназначенных для голографии, когда каждый атом серебра на счету, образование физически проявленного серебра, которое в обычных условиях проходит незамеченным, становится слишком явным. Среднее количество растворителя (заметим, что поскольку в процессе физического проявления ионы растворителя периодически восстанавливаются, необходимо лишь небольшое количество растворителя) заметно изменяет сенситометрическую кривую не только за счет увеличения размеров зерен, но также за счет выявления поверхностным травлением местонахождения дополнительного скрытого изображения, что еще больше выявляет зерна [20]. Увеличение контраста приводит к заметному увеличению дифракционной эффективности голограмм [19].

К сожалению, серебро также выпадает в осадок, причем в произвольных участках внутри эмульсии, в которых оно образует дихроничную вуаль, а после отбеливания приводит к сильному молочному рассеиванию света; серебро может выпадать в осадок на поверхности эмульсии, образуя пену. Степень всех этих воздействий зависит от равновесия между проявителем и активностью его растворения в эмульсии, которая очень чувствительна к составу проявителя и изменяется с его истощением. Поскольку все коммерческие проявители содержат растворители галогенида серебра, такие, как сульфит, служащий консервантом, протекание физического проявления ограничивается тем, что произошло, и его действие должно быть заметнее в голограммах, и, следовательно, влияние его более значительно изменяется с истощением проявителя. Этим главным образом объясняется то, почему обычные проявители нередко оказываются весьма неустойчивыми и доставляют массу хлопот при использовании их вместе с отбеливанием. После краткого рассмотрения механизмов проявления перейдем к описанию некоторых нерастворяющих «прямых» проявителей, а затем исследуем, каким образом можно использовать преимущества физического проявления, когда им можно будет управлять.

9.1.5. Рекомендация при проявлении

9.1.5.1. Стандартные проявители

а. Кодак D-19. Хотя для большинства материалов время проявления, рекомендуемое изготовителем, составляет 6—8 мин при температуре 20°C, мы предпочитаем время проявления, равное 4 мин. Время проявления — это единственный наиболее полезный параметр процесса проявления, и определение момента окончания проявления, при котором достигается желаемая плотность, представляет собой практически очень полезный метод преодоления экспериментальных неопределенностей [2]. Если эмульсия будет отбеливаться, то ее нужно проявлять до плотности 1,5, а если не будет отбеливаться, то до плотности 0,8. Однако с увеличением времени проявления растет роль механизма физического проявления, что приводит к увеличению шума и снижению максимальной величины дифракционной эффективности. Отбеленные голограммы получаются более яркими и четкими, если они были переэкспонированы и недопроявлены, причем нижним пределом оказывается время проявления около 1 мин.

Мы обнаружили, что, по-видимому, из-за увеличенного воздействия физического проявителя на голограммы проявитель D-19 слишком быстро стареет. Поэтому рабочие растворы следует менять ежедневно, а при исследовании степени повторяемости, особенно в случае, когда применяется отбеливание, необходимо использовать лишь свежие растворы [18].

б. Голубой неофин. Исследования в университете г. Лафборо в Англии показали, что концентрированный проявитель «тетеноловый голубой неофин», составляющий собственность университета, прекрасно себя зарекомендовал при работе со сверхмелкозернистыми материалами, предназначенными для отбеливания (например, с AG8E56-HD), когда используется концентрированный раствор без растворения (время проявления 5 мин при температуре 18°C). Очевидно, кинетика этого проявителя сильно отличается от кинетики обычного разбавленного проявителя, и авторы считают, что добавление щелочи и противосульфидного вещества приводит к изменению результатов. Добавление 0,3 г/л бензотриазола уменьшает вуаль и увеличивает контраст, а дальнейшее добавление 120 г/л метабората натрия приводит к еще более лучшим результатам [16].

9.1.5.2. Нерастворяющие проявители

Любые недостатки физического проявления можно обойти, если из процесса проявления исключить растворители галогенидов серебра. Разумеется, даже вода слегка растворяет бромид серебра и составные части некоторых эмульсий, но заметные изменения про-

исходят лишь в отсутствие сульфата натрия и бромида калия. Такие проявители часто называют «прямыми», «химическими» или «поверхностными»; несмотря на отсутствие «консерванта», они по крайней мере имеют такую же надежность, что и стандартные проявители для голографии.

При отсутствии сульфата натрия, защищающего проявляющее вещество от окисления, мы должны выбрать проявляющее вещество с фотографически инертными продуктами окисления, которые имеют тенденцию быть менее активными, чем гидрохинон. Одним из таких веществ является всем известная аскорбиновая кислота, применяемая в широкоизвестном проявителе МАА-3, имеющем следующий состав [6]:

вода при температуре 40°C	0,5 л
метол	2,5 г
d-арабиноаскорбиновая кислота	10 г
карбонат натрия (моногидрат)	55,6 г
вода	до 1,0 л

Рекомендуемое время проявления составляет 4 мин при температуре 20°C или же такое, при котором получается желаемая плотность. Мы предпочитаем проявитель, который мы назвали РААР, состоящий из

фенидона (добавлять последним)	0,5 г
l-аскорбиновой кислоты (витамин С)	18 г
едкого натра	12 г
двухфосфорнокислого натрия	28,4 г
воды	до 1,0 л

Это более активный проявитель с соответственно меньшим временем жизни, поскольку он более подвержен поверхностному окислению. Время проявления 4 мин при 20°C. Он дает хорошие результаты, хотя получаемые плотности оказываются все еще меньшими, чем в случае применения D-19.

Оба этих проявителя дают чистые голограммы, в которых после отбеливания действительно отсутствует молочная дымка. Однако их дифракционная эффективность оказывается низкой, поскольку при том же числе модулирующих зерен коэффициент модуляции получается меньше, так как проявленные зерна в этом случае не «интенсифицированы» физическим проявлением. Но зато в этом случае достигается максимальное отношение сигнал/шум.

9.1.5.3. Физические проявители

Увеличение серебра в каждом зерне при физическом проявлении в принципе может привести к существенному увеличению дифракционной эффективности отбеленной голограммы при одновременном сохранении высокого отношения сигнал/шум. В действительности же определенное количество серебра осаждается в произвольных

местах достаточно большими кусками, что приводит к возникновению молочного рассеяния в отбеленной эмульсии. Отношение количества серебра, осажденного на зерна серебра (точно осажденное серебро), к количеству серебра, осажденного произвольным образом (неточно осажденное серебро), изменяется главным образом с эффективностью растворителя галогенида серебра, причем нижние значения соответствуют слабым растворителям типа сульфита натрия (вот почему обычные проявители становятся плохими) и высшие значения соответствуют сильным растворителям, таким, как тиоцианат аммония. Но даже применение тиоцианата аммония дает заметное увеличение шумов, так что для некоторого повышения эффективности пропускающих голограмм в нерастворяющий проявитель нужно добавлять небольшое количество растворителя. И только в случае отражательных голограмм, когда дифракционная эффективность достигает максимального значения, необходимо добавлять очень большое количество тиоцианата аммония.

9.1.5.4. Сбалансированные процессы растворения и проявления

В эмульсиях голограмм, предназначенных для отбеливания, экспонируется и проявляется при прямом проявлении почти половина всех микрокристаллов галогенида серебра. Если бы все непроявленное серебро, вместо того чтобы удалить его из эмульсии в дальнейших процессах обработки, можно было бы переместить к уже проявленному серебру и проявить, то объем зерен увеличился бы вдвое, а дифракционная эффективность (и рэлеевское рассеяние) возросла бы в четыре раза. Такой экстремальный баланс между растворением и проявлением выходит далеко за рамки нормальной фотографической практики; поэтому, чтобы подчеркнуть существенную роль диффузии ионов серебра из неэкспонированной области в экспонированную на расстояния, которые малы по сравнению с толщиной разбухшей эмульсии, но могут быть соизмеримы с шириной нескольких интерференционных полос, мы назвали этот процесс «внутриэмульсионным диффузионным переносом» (ВЭДП)⁴⁾ [1]. Этот процесс, помимо того что он увеличивает яркость восстановленного изображения, обладает и другими ценными для голографии свойствами.

Ввиду того что все серебро проявляется, необходимость в фиксировании отпадает. Если серебро отбеливается с целью получения исходных составных частей эмульсии (главным образом бромида серебра), то показатель преломления и толщина эмульсии восстанавливаются до значений, которые они имели во время экспониро-

вания, так что объемные эффекты, такие, как брэгговская селекция углов, автоматически и точно компенсируются во всем диапазоне экспозиций. Таким образом, важным результатом для полноцветной голографии является то, что отражательные голограммы будут восстанавливать изображение при той же самой длине волны и в том же месте, что и при записи голограмм.

Поскольку поперечная диффузия серебра ограничивается расстояниями в несколько интерференционных полос, отсутствие зависимости толщины эмульсии от экспозиции позволяет записывать сигналы с плотностью до нескольких сотен периодов на миллиметр, так что на поверхности эмульсии не появляется никакого рельефного изображения и рассеяние света еще более уменьшится.

Отсутствие отклика в области низких пространственных частот делает такой проявитель вообще непригодным для обычной фотографии, и в этом есть какая-то доля удовлетворения. По-видимому, это первый и единственный в своем роде проявитель, пригодный только для голографии!

Разумеется, проблема шума рассеяния остается общей и для физического проявителя, и для проявителя ВЭДП, так что уменьшение рассеяния остается центральной проблемой исследования. Но можно получить замечательные результаты, особенно в отражательной голографии, просто добавляя тиоцианат аммония в проявитель РААР, о котором мы упоминали выше. Количество добавки является несколько критичным (оно зависит от типа эмульсии) и его приходится регулировать для различных эмульсий или химических составов проявителей. Можно проследить за приближением к равновесию, по мере того как добавляется растворитель, наблюдая за сдвигом длины восстановленной волны на фиксированных после проявления участках отбеленных отражательных голограмм. Количество растворителя нужно увеличивать, до тех пор пока «линия фиксирования» (граница фиксирования) практически не исчезнет. На этом проявление заканчивается, если только не потребуются уменьшить рассеяние или смягчить действие тиоцианата аммония на желатину. Для лучшего компромисса между яркостью изображения и рассеянием света можно в два — четыре раза увеличить экспозицию по сравнению с экспозицией для нерастворяющих проявителей. Показательно, что для эмульсии ЕК 120-02, экспонированной при освещенности 3400 эрг/см² и длине волны 633 нм, в проявитель РААР добавляется 1,0 г/л тиоцианата аммония, а в случае эмульсии AG8E75 при экспозиции 2100 эрг/см² — 0,5 г/л.

9.1.5.5. Фиксация

Фиксированием называется процесс удаления непроявленного галогенида серебра, после того как материал был проявлен по методу ВЭДП или до обратимого отбеливания. Иногда для быстрых

⁴⁾ По-английски это сокращение пишется как IEDT от первых букв словосочетания intra-emulsion diffusion transfer. — Прим. ред.

процессов при обучении или в случае интерферометрии применяют проявление без фиксирования, как это имеет место в некоторых методах получения отражательных голограмм, но такие голограммы быстро темнеют при комнатном свете. Растворение небольших микрокристаллов происходит всего лишь за несколько секунд, так что тиосульфат аммония («быстрый фиксаж») не нужен и не может быть рекомендован, поскольку он может реагировать с проявленным серебром. Чтобы избежать этой реакции, которая изменяет цвет серебра и увеличивает молочное рассеяние в отбеленной голограмме, время фиксирования не должно превышать двойного времени осветления. Поскольку при этом основная часть серебра удаляется, фиксаж истощается. Этого необходимо избегать, но из-за прозрачности фиксажа его истощение трудно наблюдать и поэтому легко просмотреть.

Фиксаж F-24 (недубящий) имеет следующий состав [21]:

вода при 50°C	500 мл
тиосульфат натрия · 5H ₂ O	240 г
сульфит натрия безводный	10 г
бисульфит натрия	25 г
холодная вода	до 1,0 л

Время фиксирования равно удвоенному времени видимого осветления; температура не должна быть выше 20°C.

Для того чтобы гарантировать химическую устойчивость голограммы, ее необходимо после фиксирования как следует промыть. Остаточные пятна гипосульфита особенно вредны для отбеленных голограмм. Предварительное купание в покупном удалителе гипосульфита сокращает необходимое время промывки до нескольких минут.

Удовлетворительная сушка требует дубления эмульсии, которое обычно следует за фиксированием. Мы используем с хорошими результатами формальдегидный дубитель SH-1 [21]:

вода	500 мл
формал. дегид (37%)	10 мл
карбонат натрия (моногидрат)	5 г
вода	до 1,0 л

Дубить 3 мин и полностью промыть перед сушкой.

9.1.5.6. Отбеливание

а. Введение. Отбеливание — это общее название различных процессов, предназначенных для получения голограммы, которая модулирует свет замедлением волнового фронта, а не его ослаблением, как это обычно имеет место. В общем случае результатом этого является впечатляющее увеличение дифракционной эффективности и, следовательно, яркости восстановленного изображения, а во многих случаях удручающее уменьшение отношения сигнал/шум. По-

скольку высокая дифракционная эффективность важна для многих применений голографии, большое внимание было уделено исследованиям различных типов отбеливателей, о результатах которых имеются сообщения в литературе. Существует три основных типа отбеливателей. Первый преобразует проявленные зерна металлического серебра в осадки прозрачной диэлектрической соли, имеющей большую, чем у желатины, поляризуемость. Наиболее часто эти соли являются галогенидами серебра, и такие отбеливатели называются «прямыми» или «регалогенизирующими».

«Обратимые» или «дополнительные» отбеливатели растворяют проявленные зерна нефиксированной голограммы, при этом средний показатель преломления модулируется непроявленными зернами галогенида серебра. Оба этих отбеливателя являются «объемными», так как производимая ими модуляция среднего показателя преломления оказывается распределенной по толщине эмульсии и дает некоторые эффекты брэгговской селекции, а также обеспечивает высокую дифракционную эффективность. Поверхностно-рельефные отбеливатели используют эффект поперечной сшивки желатины проявителем или вызывают побочными продуктами отбеливания «дыхание» желатины, чтобы во время последующей сушки можно было создать модуляцию толщин эмульсии голограммы, образуя тонкую фазовую решетку. Такой же, но более слабый эффект вызывается удалением, обычно в процессе фиксирования, составных частей эмульсии. Вследствие того что эффекты поверхностного рельефа ограничиваются областью низких пространственных частот, такие отбеливатели редко используются в голографии и, за исключением некоторых частных случаев, обычно считаются источниками шума, когда их применяют вместе с другими отбеливателями [9].

б. Прямые отбеливатели. В литературе имеются описания нескольких дюжины процедур отбеливания, причем большая часть находится на грани современной алхимии, а многие из них, страдающие от ненадежности лежащих в их основе процессов, слишком непонятны. Рассмотрение результатов применения этих процессов показало, что они приводят к значительным изменениям дифракционной эффективности, обычно сопровождающимся высоким рассеянием, а также к потемнению голограммы при освещении ее светом. Улучшение свойств проявителей позволило решить некоторые из этих проблем. Обсудим теперь несколько отбеливателей, которые помогут уменьшить оставшиеся недостатки.

Отбеливатели, включающие промежуточную окислительную ступень, почти всегда уменьшают передаточную функцию модуляции (ПФМ) из-за случайной диффузии серебра, что также увеличивает рассеяние света. Поэтому мы предпочитаем использовать прямые отбеливатели, такие, как хлорная и бромная вода, из которых последний оказывается более практичным. Он обеспечивает столь яс-

ные, яркие и незатемняющиеся голограммы, что мы подробно опишем процесс отбеливания в данном случае. Этот отбеливатель имеет длительный срок хранения, очень прост в применении, но вследствие того, что при его использовании выделяется небольшое количество свободного брома, с ним приходится работать обязательно при наличии вытяжки. Вытяжной шкаф можно выполнить из полиэтиленового листа, вставленного в деревянную раму, электрического вентилятора и закрытой трубы канала сушителя, которую следует вывести в безопасное для людей и окружающей среды место. Этот же вытяжной шкаф должен применяться при сушке спиртом и при других операциях с органическими растворителями и вообще быть обязательной частью хорошо оборудованной голографической лаборатории. С бромной водой следует обращаться с осторожностью, имея в виду, что это слабая кислота, и в любом случае иметь под руками раствор (50 г/л) сульфата натрия для нейтрализации какого-либо количества пролитой бромной воды и чистки ванночек от пятен. В противоположность отбеливателю на парах брома бромная вода относительно безопасна и безвредна при работе с ней. Используются очень небольшие количества жидкого брома, обращаться с которым нужно очень аккуратно.

Бромная вода готовится в большой (около 0,5 л) стеклянной бутылки с притертой пробкой, заполненной почти целиком чистой водой (необходимо иметь плотно закрывающийся кран). В эту бутылку наливают небольшое количество брома (около 5 см³), так чтобы на дне бутылки образовались небольшие лужицы, после чего бутылку закрывают и ставят в определенное место. Примерно через сутки (в холодной воде быстрее) вода принимает оранжевый цвет из-за растворенного в ней брома, при этом под пробкой образуется некоторое количество паров брома.

Для работы немного бромной воды выливают в стеклянную ванночку. Можно использовать и пластиковые ванночки, но пятна с них можно удалить с помощью раствора сульфата натрия лишь частично. Отбеливание следует проводить быстро и в вытяжном шкафу, поскольку бром начинает медленно выделяться в виде газа, после чего бромную воду переливают в бутылку. Необходимо следить за тем, чтобы в бутылку бром был покрыт хотя бы небольшим количеством воды и чтобы он не попадал на пластинку, поскольку даже крошечные его капли разрушают эмульсию. Правильнее всего легким скользящим движением опустить пластинку в отбеливатель и слегка перемешать его. Просветление должно начаться немедленно и продолжаться в зависимости от силы отбеливателя не более минуты. По истечении удвоенного времени просветления голограмму переносят в ванночку с водой и переливают отбеливатель в предназначенный для него сосуд. Чтобы в эмульсии осталось немного брома, голограмму нужно промыть лишь слегка. Сушка проводится любым общепринятым способом. Одну и ту же бромную воду мож-

но использовать сколь угодно раз, добавляя только по необходимости воду или бром.

Применяемый таким образом бром не реагирует с желатиной даже при продолжительном отбеливании и оставляет на голограмме прозрачную беловатую дымку, которая некоторое время имеет запах брома. Пока такая голограмма остается сухой, ее стабильность к свету оказывается очень высокой и продолжительной. Это лучший отбеливатель для отражательных голограмм, полученных по методу ВЭДП. Сравнимые результаты, судя по публикациям [11], дает отбеливатель, состоящий из бромиды меди с бромной водой, синтезированной химическим способом (при работе с таким отбеливателем тоже нужен вытяжной шкаф!).

Возможно превращение проявленного серебра в йодид серебра, а не в бромистое серебро, так как в этом случае применяются растворы отбеливателя [4, 7], имеющие большое практическое значение, а голограммы получаются стабильными, с исключительно ярким изображением [13]. Сам по себе йод не растворяется в воде, но хорошо растворяется в спирте. Чтобы эмульсия разбухла и содействовала реакции, можно добавить небольшое количество воды.

Прямой иодный отбеливатель имеет следующий состав:

спирт (метиловый или этиловый)	750 мл
йод кристаллический	2—5 г
вода	до 1000 мл

Время отбеливания изменяется в широких пределах, и оно тем короче, чем выше концентрация йода. Отбеливание в течение двойного времени осветления все еще остается обязательным. За отбеливанием должна следовать обработка в идентичном растворе без йода, чтобы вымыть глубокие желтые пятна, которые естественным образом возникают при спиртовой сушке.

Йодид серебра имеет более высокую поляризуемость молекул, чем бромид серебра [22], поэтому в нем дифракционная эффективность и уровень шумов рассеяния возрастают. Действительно, получение голограмм с йодидом серебра очень высокого контраста оказывается делом весьма трудным. Частично это может быть обусловлено повреждением эмульсии, что особенно заметно на относительно мягких эмульсиях, таких, как AG 8E75. Эти повреждения и заметные пятна йода можно уменьшить, применяя йод очень низкой концентрации и продолжительные времена отбеливания. Заметим, что основы некоторых пленок могут разрушаться вентиляцией. Тем не менее надежность такого отбеливателя подтверждается его многолетним применением для обработки пленки EK SO-173 с целью получения высококачественных цилиндрических голографических стереограмм.

Недавно Филлипс [17] сообщил о несколько менее прямом, но имеющем большое практическое значение отбеливателе с бромидом

калия (РВQ) Окисляющее вещество пара-бензохинон не влияет на дубление окружающих зерна желатиновых оболочек, создаваемых некоторыми проявителями на основе гидрохинона, что может снизить молочность голограммы после отбеливания.

Отбеливатель РВQ:

пара-бензохинон	2 г
борная кислота	1,5 г
бромид калия	30 г
вода дистиллированная	1 л

Тонко измельченный пара-бензохинон сильно раздражает дыхательные пути, поэтому работать с ним необходимо с применением вытяжного шкафа. Для очень твердых эмульсий концентрацию бромида калия можно увеличить.

в. Обращающие отбеливатели. После обработки в обращающих отбеливателях эмульсии сохраняют внутри себя первоначально выращенные компактные сферические микрокристаллы бромида серебра, которые образуют изображение. Поэтому такие отбеливатели представляют значительный интерес, и о них должен знать всякий, кто занимается обработкой голографических фотоматериалов. Работа этих хорошо известных отбеливателей основана на действии ионов бихромата, которые вызывают побочные эффекты дубления, что обычно приводит к искажению восстановленных изображений. Мы предпочитаем отбеливатель, в который входит перманганат калия [5]. При работе с этим отбеливателем пластинка должна экспонироваться и проявляться, но не фиксироваться. После промывки применяется обращающий отбеливатель КР-4:

вода дистиллированная	1,0 л
перманганат калия	3 г
серная кислота (обращаться с осторожностью!)	10 см ³

Срок службы отбеливателя КР-4 не определен, но его не нужно выбрасывать, пока он прозрачный или с ним работали мало. По мере его использования в нем будет выделяться тонкий и безвредный осадок, который можно отфильтровать через хлопковую ткань при выливании отбеливателя в ванночку. Отбеливание продолжается в течение двойного времени осветления, промывка — 5 мин. Затем следует чистка пятен осадка в растворе сульфата натрия (50 г/л) при обязательном наличии вентиляции. После этого следует еще одна промывка в течение 10 мин и трехминутное вымачивание в стабилизирующем растворе.

Стабилизирующий раствор STAB-3:

метиловый спирт	880 мл
вода	100 см ³
глицерин	20 г
бромид калия	0,12 г

Бромид калия служит для замедления фотолиза. (Концентрацию их при необходимости можно увеличивать, до тех пор пока не появится кристаллизация; выше указана концентрация для пластинок 8E75). Возможна дополнительная десенсибилизация красителем феносафарином [13], см. также [18, с. 64]), хотя образуемые им розовые пятна являются нежелательным эффектом. За короткой (в течение 1 мин) промывкой в метиловом спирте должна следовать сушка. Хотя этот стабилизатор не годится для широкого применения, получающиеся с его помощью голограммы очень прозрачны, стойки к потемнению и дают яркие изображения.

Добавление в спирт нескольких капель брома делают стабилизатор еще более эффективным, но в этом случае использованный раствор необходимо выбрасывать во избежание затуманивания голограмм во время сушки.

9.1.5.7. Влияние усадки

В общем случае 15—20% объема неэкспонированной эмульсии занято галогенидом серебра. Поскольку после большого числа обработок удаляется почти половина этого объема, ожидается, что в процессе сушки происходит усадка эмульсии (заметим, что толщина высушенного желатинового слоя не зависит от его дубления) и снижение среднего показателя преломления. Эта усадка приводит к наклону плоскости дифракции пропускающей голограммы и, следовательно, к изменению угла восстановления максимальной яркости от 45 до 52° или к уменьшению длины восстановленной волны от 633 до 550 нм. Усадку можно частично компенсировать конечным купанием в 6%-ном водном или спиртовом растворе триэтаноламина [12]. Однако это приводит к появлению полос сушки и быстрому потемнению на свету большинства отбеленных голограмм. До сих пор ни о каких растворах, полностью устраняющих усадку, не сообщалось, за исключением обработки по методу РЭПГ.

9.1.5.8. Сушка

Удаление воды из эмульсионного слоя приводит к почти восьмикратной механической усадке. При этом образуются участки, в которых угол Брэгга, соответствующий максимальной дифракционной эффективности, отличается от такового для остальной части голограммы, что представляет собой значительное препятствие для получения неискаженной записи интерференционных полос по толщине эмульсии. Эта проблема весьма серьезна, и мы без преувеличения утверждаем, что неправильная сушка при восстановлении изображения с голограммы вносит искажений куда больше, чем любая другая степень обработки.

Желатина не сохнет равномерно, а через нее распространяется «граница высыхания» (поперек эмульсии). В глубине слоя по мере перемещения этой границы желатина движется вбок, и любое препятствие ее плавному движению, такое, как отпечаток пальца, трещина эмульсии, задубленный участок или оставшиеся капли и полоски воды, вызывают изменение движения границы и, как следствие, изменение наклона интерференционных полос. Повидимому, равномерную сушку можно получить, если из эмульсии удалить как можно больше воды до того момента, когда начинается движение границы высыхания.

Наиболее обычный способ состоит в купании пластинок в ряде водопоглощающих ванн спирт/вода, расположенных в порядке изменения соотношений (обычно 50/50, 72/25, 95/5). Сразу же после этого пластинки ополаскивают из бутылки сверхчистым спиртом и сушат резиновым валиком (можно использовать воздух, фотовалик или вакуумный резиновый валик). Напоминаем еще раз, что ключ успеха в ровной сушке. Иногда необходимо очень длительное вымачивание в ванне конечной обработки, а если эмульсия плохо сохнет, можно применить ванну с сверхзадубливанием. Во время прокатки резиновым валиком прежде всего следует избегать в любой форме подтеков и стеканий в обратную сторону. Конечно, существует риск поцарапать эмульсию фотоваликом, но это можно устранить, применяя иммерсию.

Другой способ состоит в сушке пластинок в неподвижном воздухе после купания их в ванне из 90% спирта, 10% воды и небольшого количества смазывающего вещества (например, EK Photo Flo™). В этом случае критической величиной является концентрация воды, которую следует измерять гидрометром.

Пленки на ацетатной основе после разбухания в органических растворителях вообще искривляются или скручиваются, поэтому метод водопоглощения к ним применять трудно. Оказывается, что изопропиловый спирт действует на них меньше, но он имеет сравнительно низкую скорость водопоглощения. Применение денатуратов этанола очень хлопотно, а токсичность метанола общеизвестна, так что применение спиртов не спасает положения.

9.1.6. Заключение

Современному живущему на всем готовом фотолюбителю трудно себе представить, как в первые десятилетия фотографии каждый фотограф сам покрывал пластинки эмульсией, приготавливал химические составы и сам обрабатывал свои пластинки. В настоящее время голографическая химия, выделившаяся в отдельную область науки, проходит тот же путь проб и ошибок. При этом разрабатываются новые методы, которые наука позднее приведет в систему. Естественно, что исследователи на этом пути встречаются с разо-

9.2. Спеклы

чарованиями от неопределенности химических реакций и незнакомых методов, но те, кто проявит упорство, несомненно, будут вознаграждены за свой труд.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benton S. A., J. Opt. Soc. Amer., **64**, 1393A (1974).
2. Biedermann K., Stetson K. A., Photogr. Sci. Eng., **13**, 361 (1969).
3. Buschmann H. T., Optik, **3**, 240 (1971).
4. Gross L., частное сообщение, Multiplex Co., San Francisco, Calif., 1976.
5. Glafkides P., Photographic Chemistry, Foundation Press, London, 1958, p. 173.
6. James T. H., Vanestow W., PSA Tech. Quart., **2**, 135 (1955).
7. Kido K., Arai N., Japan Kokai, **76-26**, 136 (1 March 1976).
8. Kowaliski P., Applied Photographic Theory, CR. 7, Wiley, New York, 1972.
9. Lamberts R. L., Kurtz C. N., Appl. Opt., **10**, 1342—1347 (1971).
10. Land E. H., Farney L. C., Morse M. M., Photogr. Sci. Eng., **15**, 4 (1971).
11. Lehmann M., Lauer J. P., Goodman J. W., Appl. Opt., **9**, 1948L (1970).
12. Lin L. H., LoBianco C. V., Appl. Opt., **6**, 1255 (1967).
13. McMahon D. H., Mahoney W. T., Appl. Opt., **9**, 1363 (1970).
14. Mason L. F. A., Photographic Processing Chemistry, Focal Press, New York, 1966.
15. Pennington K. S., Harper J. S., Appl. Opt., **9**, 1643 (1970).
16. Phillips N. J., Porter D., J. Phys. E: Sci. Instr., **9**, 631 (1976).
17. Phillips N. J., Paper M3, 32nd SPSE Annual Conference, Boston Mass., 1979 (готовится для печати в Photogr. Sci. Eng.).
18. Smith H. M., Holographic Recording Materials, Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg, 1977 (см. гл. 2).
19. Smith H. M., Callari C. A., Jr., Photogr. Sci. Eng., **19**, 130 (1975).
20. Solman L. R., Photogr. Sci., **14**, 171 (1966).
21. SPSE Handbook of Photographic Science and Engineering (ed. W. Thomas, Jr.), Wiley, New York, 1973, p. 577.
22. Van Renesse R. L., Boufs F. A. J., Optik, **38**, 156 (1973).

9.2. СПЕКЛЫ

Г. Колфилд

9.2.1. Введение

«Спекл» — термин, используемый для описания зернистой картины, которую замечают все, кто работает с лазерами, излучающими в видимом диапазоне длин волн, всякий раз, когда лазерный свет рассеивается или проходит через рассеиватель, такой, как бумага или матовое стекло. Спеклы являются неизбежным следствием когерентности, поскольку они представляют собой просто картину максимумов и минимумов интенсивности, являющихся результатом соответственно усиления и ослабления когерентного волнового фронта со «случайным» (нерегулярным) фазовым распределением. Иными словами, спеклы — это интерференционная картина нерегулярных волновых фронтов. Предположение о случай-

ной (статистически описываемой) фазовой картине предоставляет удобный математический способ описания спеклов.

В голографии спеклы во многих случаях создают проблему. Спеклы в изображении не только неприятны, но и обуславливают потери информации. Это нежелательное действие спеклов, которое мы здесь рассматриваем. Но вне голографии спеклы могут быть полезными начиная с анализа механических напряжений, проверки глаз и кончая астрономией. Как полезная, так и нежелательная сторона спеклов рассмотрены в книге Дейнти [5].

9.2.2. Описание спеклов

Объяснение спеклов мы начнем, исходя из самых простых понятий. Предположим, что у нас есть пластинка со «случайным» набором фаз, освещаемая неоднородным круглым пучком света диаметром D и длиной волны λ . Согласно принципу Гюйгенса, свет, достигающий некоторой точки в пространстве после встречи с фазовой пластинкой, есть результат сложения световых волн, исходящих от каждой точки освещенной апертуры. Поскольку фазы случайны, нельзя указать точки, в которых интерференция будет конструктивной, а в которых — деструктивной, но мы можем описать интерференционную картину статистически. Раз ожидается, что она должна быть случайной, то, по-видимому, она должна иметь очень высокий контраст. Естественно, что размер спекла определяется дифракционными ограничениями, и, поскольку расстояние $L \gg D$, мы ожидаем, что спеклы должны случайным образом распределяться в виде сигароподобных капелек диаметром

$$d_s \approx \lambda L / D \quad (1)$$

и длиной (эквивалентно глубине фокуса)

$$l_s \approx 4\lambda L^2 / D^2. \quad (2)$$

Теперь мы установим без доказательства некоторые фундаментальные соотношения. Кольтер и др. [4] показали, что среднеквадратичное значение флуктуации интенсивности дается выражением

$$N = [(\overline{I - \bar{I}})^2]^{1/2} = \bar{I}. \quad (3)$$

Таким образом, среднеквадратичное значение флуктуации интенсивности равно средней интенсивности; иными словами, контраст случайной интерференционной картины является действительно очень высоким.

Голдфишер [7] показал, что автокорреляционная функция интенсивности (плотности мощности) спеклов записывается в виде

$$\langle B(x, y) B(x + \gamma, y + \delta) \rangle = \left[\frac{1}{2\pi h^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P(u, v) du dv \right]^2 + \frac{1}{8\pi^2 h^4} |F(\gamma, \delta)|^2, \quad (4)$$

где x, y — координаты выходной плоскости, u, v — координаты входной плоскости, $P(u, v)$ — интенсивность в плоскости uv , h — расстояние между входной и выходной плоскостями, а

$$F(\gamma, \delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P(u, v) \exp[2\pi i(\gamma u + \delta v)/\lambda h] du dv. \quad (5)$$

Заметим, что, за исключением постоянного члена, автокорреляция спеклов имеет такой же вид, как и картина дифракции поля амплитуд $P(u, v)$ в дальней зоне.

Колфилд [2] заметил, что это в действительности имеет место лишь в том случае, если равные по площади фазовые участки можно считать распределенными равномерно. Для фазовых областей вида $s(u, v)$ полное поле имеет форму пространственного спектра мощности $s(u, v)$. Например, один из «рассеивающих киноформов» автора при освещении его однородным пучком формировал общую высокоанизотропную картину, поскольку рассеивающие элементы киноформа были анизотропными. Из-за существования поля $P(u, v)$ сами спеклы, разумеется, оказались анизотропными.

Спектральная зависимость спеклов лучше всего описана Джорджем и Джейном [6]. Полученный ими результат требует вычисления многих величин. Для удобства мы проведем вычисления в случае одной пространственной координаты. Частота света ν преобразуется в круговую пространственную частоту

$$\eta = (2\pi \Delta n / c) \nu, \quad (6)$$

где Δn — разность между показателями преломления рассеивателя и среды, а c — скорость света. Пусть u — входная координата, x — выходная координата, а $h(u)$ — высота рассеивателя. Предположим, что $f(h_1, h_2)$ — совместная вероятность того, что $h_1 = h(u)$, а $h_2 = h(u + \delta u)$. Пусть

$$r(\Delta x) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(x) h(x + \Delta x) dx. \quad (7)$$

Теперь можно написать частотную характеристическую функцию

$$F_c(\eta_1, \eta_2) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(h_1, h_2) \exp[-i(\eta_1 h_1 + \eta_2 h_2)] dh_1 dh_2. \quad (8)$$

Мы предполагаем пространственную инвариантность системы формирования изображений с импульсным откликом $z(x, \eta)$, который преобразует падающее поле $g(x, \eta)$ в выходное поле:

$$e(x, \eta) = g(x, \eta) * z(x, \eta); \quad (9)$$

здесь знак $*$ обозначает операцию свертки. При этом сигнал, детектируемый по квадратичному закону, запишется в виде

$$u(x, \eta) = e(x, \eta) e^*(x, \eta).$$

Теперь мы можем вычислить автокорреляционную функцию $u(x, \eta)$:

$$R_a = \mathcal{E}[u(x + \Delta x, \eta_2) u^*(x, \eta_1)], \quad (10)$$

где квадратные скобки означают среднее значение по ансамблю. Нам нужно вычислить величину

$$R_z = \mathcal{E}[z(x + \Delta x, \eta_2) z^*(x, \eta_1)]. \quad (11)$$

Джордж и Джейн [6] нашли, что

$$R_a(\Delta x, \eta_1, \eta_2) = \mathcal{E}[u(x, \eta_1)] \mathcal{E}[u(x + \Delta x, \eta_2)] + |F_c(-\eta_1, \eta_2; r(\gamma)) R_z(\Delta x - \gamma, \eta_1, \eta_2) d\gamma|^2. \quad (12)$$

Проинтерпретируем эту внушительную формулу. Сущность ее состоит в том, что источник с шириной спектра излучения

$$\Delta\nu = (c/2\pi\Delta n)(\eta_2 - \eta_1) \quad (13)$$

обладает длиной временной когерентности

$$l_c = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{2\pi\Delta n}{\eta_2 - \eta_1}. \quad (14)$$

Если неоднородности рассеивателя малы по сравнению с l_c , то мы получаем когерентное сложение света по всей глубине рассеивателя. Если расширить ширину полосы частот $\Delta\nu$ источника, то величина l_c уменьшится и можно будет достичь положения, когда размер неоднородности станет больше l_c . В этом случае картины спеклов, получаемые с различных глубин рассеивателя, будут взаимно некогерентными и произойдет сглаживание или усреднение картины.

Подведем итоги тому, что мы узнали. Спеклы возникают при наличии источника с шириной полосы частот $\Delta\nu$ и центральной частотой ν излучения, освещающего участок рассеивателя размером $\delta x \times \delta y$ с характеристикой оптической неоднородности l_d в элементе размером $\Delta u \times \Delta v$, а наблюдение проводится в плоскости xu , расположенной на расстоянии h от плоскости рассеивателя. Какой же можно сделать вывод о наблюдаемой картине спеклов? Эти выводы следующие:

1) в любом случае, если $c/\Delta\nu \ll l_d$, контраст картины спеклов будет равным единице;

2) спектр имеет приблизительно следующие размеры:

$$\delta x = ch/\nu \delta u \quad (15a)$$

и

$$\delta y = ch/\nu \delta v; \quad (15b)$$

3) картина спеклов занимает область приблизительно со следующими размерами:

$$\Delta x = ch/\nu \Delta u \quad (16a)$$

и

$$\Delta y = ch/\nu \Delta v; \quad (16b)$$

4) автокорреляционная функция картины освещенности спеклов аналогична по форме фурье-образу распределения освещенности на рассеивателе.

9.2.3. Спеклы в голограммах

В голографии спеклы могут присутствовать в любом из двух процессов: при формировании голограммы и восстановлении волнового фронта. Если голографируемый объект является рассеивающим, то объектный волновой фронт оказывается зернистым. Таким образом, даже безупречная запись и обработка приводят к пятнистому изображению. Если же объект имеет лишь слабые, крупномасштабные изменения фазы, то такой объект мы называем «зеркальным». В идеальном случае зеркальный объект не приводит вообще к спеклам. В действительности даже в этом случае несовершенства, такие, как рельеф эмульсии и нелинейности, могут привести к слабым спеклам. Однако главной проблемой в получении голографических изображений зеркальных объектов является «когерентный шум», подобный «затухающим ореолам» на краях линий или царапинам и концентрическим кругам, вызываемым точечными дефектами голограмм. Диффузное освещение сводит на нет эти дефекты, но вместо них дает нам спеклы. Бадхирайя и Сом [1] показали, что существует непрерывный переход между зеркальным и диффузным пучками и что, когда это возможно, компромиссное решение может дать положительный эффект.

9.2.4. Способы устранения спеклов

В нашей войне со спеклами мы располагаем лишь двумя видами оружия, хотя каждое из них имеет многочисленные варианты.

Во-первых, в некоторых случаях спеклы можно сделать меньше, чем детали объекта, представляющие интерес. По существу размеры спеклов являются дифракционно-ограниченными, так что,

если детали объекта крупные, то спеклы становятся ненаблюдаемыми. Однако это означает, что в случаях, когда требуется максимальное разрешение изображения (микроскопия и т. п.), присутствие спеклов представляет трудноразрешимую проблему.

Во-вторых, спеклы можно усреднить. Осуществляется это движением рассеивателей [8], использованием разных длин волн [6], изменением апертур на той же голограмме [12] и другими более сложными методами [10]. Каждый из этих методов имеет свои преимущества. Но все они снижают разрешение изображения ниже дифракционного предела, соответствующего полной апертуре голограммы. Во всех этих работах использовалось некогерентное сложение изображений; исключения составляют работа, которую выполнил автор [3] и в которой улучшение изображения получено обычными методами, а также работа [10], в которой достигнуто улучшение изображения несколько более искусственным путем, поскольку при этом улучшение изображения достигалось за счет непрерывного изменения картин спеклов [8, 10].

По-видимому, наиболее популярным является метод двойного рассеивателя, описанный в статье [8]. Чтобы свести к нулю корреляцию спеклов, достаточно очень небольшого движения, так что, сохраняя один из рассеивателей неподвижным и при этом вращая или перемещая второй, можно получить изображение, по существу свободное от спеклов за счет усреднения по времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Budhiraja C. J., Som S. C., J. Opt., 7, 12 (1978).
2. Caulfield H. J., Proc. SPIE, 25, 111 (1971).
3. Caulfield H. J., Opt. Commun., 3, 322 (1971).
4. Collier R. J., Burckhardt C. B., Lin L. L., Optical Holography, Academic Press, New York, 1971. [Имеется перевод: Кольтер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. — М.: Мир, 1973.]
5. Laser Speckle and Related Phenomena (ed. J. C. Dainty), Springer-Verlag, Heidelberg, 1975.
6. George N., Jain A., Appl. Phys., 4, 201 (1974).
7. Goldfischer L. I., J. Opt. Soc. Amer., 55, 247 (1975).
8. Ih C. S., Baxter L. A., Appl. Opt., 17, 1447 (1978).
9. Martienssen W., Spiller S., Phys. Lett., 24A, 126 (1967).
10. Som S. C., Budhiraja C. J., Appl. Opt., 14, 1702 (1975).
11. Van Ligt R. F., Appl. Opt., 12, 225 (1973).
12. Yu F. T. S., Wang E. Y., Appl. Opt., 12, 1656 (1973).

9.3. КОПИРОВАНИЕ ГОЛОГРАММ

У. Роудз

Иногда бывает нужно получить копию голограммы или размножить ее. Копии могут потребоваться для архивных или коммерческих целей, для научных исследований, например когда изуча-

емый объект имеет слишком короткое время жизни, а по голографическим копиям его можно изучать в любое время. Копирование голограмм представляет собой более сложный процесс, чем копирование обычных фотографий. Это связано с тем, что в голограмме-оригинале расстояние между интерференционными полосами чрезвычайно мало, их плотность может достигать порядка 1000 пар линий на миллиметр. Даже репродукционная оптика не способна дать изображения таких мелких деталей, и копирование должно осуществляться другими методами. Одним из них является способ копирования при восстановлении и другим — контактное или почти контактное копирование, выполняемое при тщательно контролируемых условиях. В последующих разделах мы опишем эти два главных способа оптического копирования голограмм. Кроме того, мы кратко рассмотрим механический способ получения реплик голограммы, применяемый для массового размножения рельефно-фазовых голограмм.

9.3.1. Копирование методом восстановления изображения

Метод копирования голограммы, который по замыслу является самым прямым, заключается в том, чтобы восстановить с голограммы изображение и использовать его в качестве объекта для записи новой голограммы. Хотя этот процесс в буквальном смысле слова нельзя назвать копированием, тем не менее с его помощью достигается такой эффект. К недостаткам этого метода относится то, что он требует обеспечения такой же интерферометрической стабильности, как и при записи голограммы-оригинала. Однако он обладает тем преимуществом, что в процессе копирования можно осуществить дальнейшее улучшение различных параметров записи. Например, изменением отношения интенсивностей объектного и опорного пучков добиваются оптимальной дифракционной эффективности копии. Можно изменить даже начальную форму опорной волны. Так, если в голограмме-оригинале опорная волна была плоской, то в копии ее можно превратить в сферическую.

На рис. 1 показана геометрия схемы записи для копирования обычных «тонких» амплитудных голограмм. Заметим, что фотопластинка для копии должна быть расположена таким образом, чтобы ее освещала волна света только от желаемого «объекта» (в нашем случае это волна от мнимого восстановленного изображения) и чтобы на нее не попали ни восстанавливающая волна, ни волна от сопряженного действительного изображения. Если голограмма-оригинал проявляет достаточную брэгговскую селективность, то последние упомянутые волны могут иметь пренебрежимо малые амплитуды и пластинку для копии можно в этом случае устанавливать с большей свободой.

На рис. 2 приведен вариант рассмотренной выше геометрии копирования, который заслуживает особого внимания и в некоторых случаях играет важную роль. Здесь объектом для копии голо-

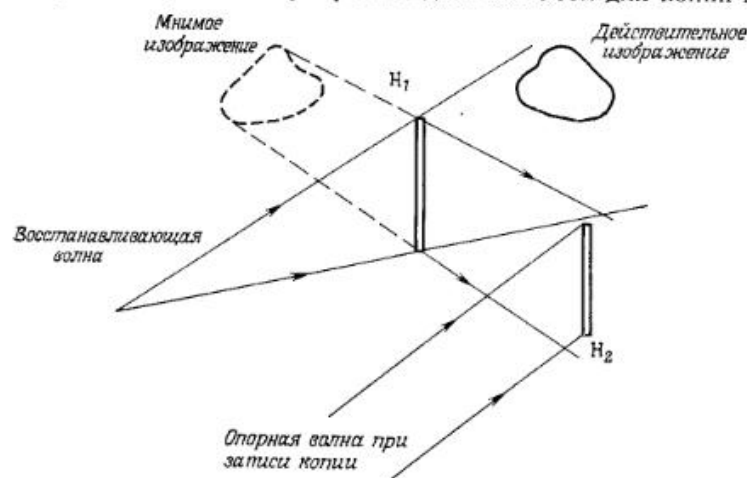


Рис. 1. Геометрия схемы копирования голограммы методом восстановления изображения. H_1 — голограмма-оригинал, H_2 — копия, которая будет экспонироваться. В этом случае записывается мнимое изображение от H_1 (следует заметить, что вид опорной волны здесь можно изменить).

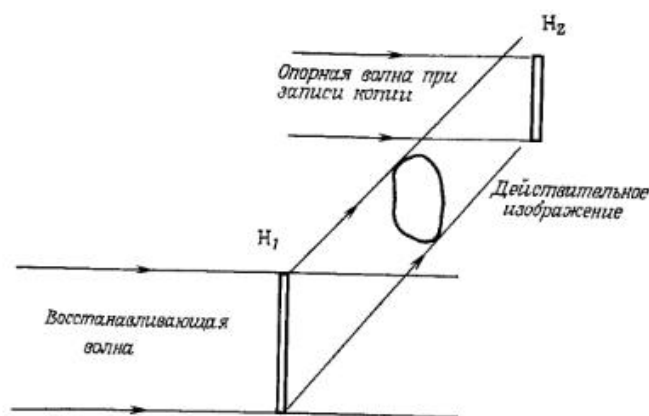


Рис. 2. Схема копирования голограммы методом восстановления, когда в качестве объекта используется восстановленное действительное изображение. Действительное изображение, восстановленное с копии, будет непсевдоскопическим (ортоскопическим).

граммы служит псевдоскопическое действительное изображение. Вспомним, что такое действительное изображение при наблюдении видится как бы с обратной стороны: ближние объекты становятся

дальними, вогнутые поверхности выпуклыми, и наоборот. Если теперь восстановить изображение с копии голограммы, то именно мнимое изображение будет псевдоскопическим, а действительное изображение, будучи дважды псевдоскопическим, приобретает нормальный вид. Эффект от наблюдения такого непсевдоскопического (ортоскопического) действительного изображения оказывает сильное впечатление на наблюдателя, который видит сцену настолько полной, насколько он этого пожелает; теперь нет никакого «окна» между ним и изображением

9.3.2. Методы контактной печати

Копирование методом контактной печати оказывается более легким, если не требуется уже упоминавшегося выше дополнительного улучшения параметров записи. Такой метод, разумеется, предпочтительно использовать при массовом производстве реплик голограмм.

В идеальном случае отпечатанную контактным способом реплику голограммы получают точно так же, как контактный отпечаток с обычного фотонегатива. Голограмму-оригинал прикладывают вплотную к фоточувствительной поверхности (обычно к поверхности фотопленки с достаточно высоким разрешением) и пропускают через нее свет; экспонированная пленка обрабатывается, как если бы это была обычная голограмма. В идеальном случае не имеет значения, какой тип источника света мы применяем, лишь бы освещение было однородным, а оригинал и копия достаточно плотно прижаты друг к другу. В (негативной) копии голограммы интерференционные полосы имеют обратный контраст. Однако это обращение контраста не оказывает влияния на вид восстановленного изображения; оно просто вводит в амплитудное распределение света в восстановленном изображении сдвиг фазы на 180° по отношению к опорной волне. Это изменение фазы можно обнаружить, только если изображение исследуется интерферометрически.

В действительности получить копию голограммы методом «плотного контакта» исключительно трудно, поскольку эмульсия исходной голограммы и эмульсия фотопленки должны быть прижаты друг к другу с микроскопическим зазором. Если пренебречь влиянием дифракции, то зазоры между оригиналом и копией не должны превышать величины порядка длины волны, а такого плотного контакта вообще невозможно достичь между неполированными поверхностями. Поэтому контактная копия голограммы почти всегда является приблизительно контактной, причем зазор между поверхностями также должен быть небольшим, возможно меньше миллиметра или около того, но уже не требуется, чтобы он был порядка длины волны. Для того чтобы приблизительно контактная копия в процессе экспонирования сохраняла информацию об

интерференционных полосах голограммы-оригинала, она должна освещаться светом, имеющим высокую степень временной и пространственной когерентности. Для этих целей обычно используют лазер. То, что происходит при этом, нельзя назвать контактной печатью в обычном смысле, причем копия не представляет собой истинную реплику голограммы-оригинала. Скорее всего, в этом случае эмульсия копии освещается недифрагировавшей частью освещающей волны и волнами восстановленных изображений; именно интерференция всех этих волн создает интерференционную картину, сохраняемую в копии. В действительности записанная картина зависит от вида голограммы-оригинала и от величины зазора между оригиналом и копией. Рассмотрим два важных случая.

9.3.2.1. Тонкая пропускающая голограмма-оригинал; двойные изображения

Если мы утверждаем, что голограмма-оригинал является тонкой, то это означает, что влиянием дифракции Брэгга можно пренебречь; при этом недифрагированная волна сопровождается двумя дифрагированными волнами, одна из которых соответствует восстановленному действительному изображению, а другая — мнимому. Эти три волны интерферируют попарно, образуя общую интерференционную картину, которая засвечивает эмульсию копии. По сравнению с другими вкладками система интерференционных полос, образуемая при взаимодействии двух волн восстановленных изображений, оказывается, как правило, слабой (из-за низкой дифракционной эффективности голограммы-оригинала), и ею можно пренебречь. Две остальные системы интерференционных полос, обусловленные взаимодействием продолженной опорной волны с каждой из двух волн восстановленного изображения, имеют одинаковые амплитуды и контраст.

Таким образом, копия голограммы представляет собой фактически две системы интерференционных полос, в то время как голограмма-оригинал состоит лишь из одной системы. При восстановлении с копии голограммы образуются четыре изображения: два действительных и два мнимых, причем каждое из них связано со своей системой интерференционных полос. Такая ситуация для случая точечного объекта и освещения плоской опорной волной, падающей по нормали, иллюстрируется на рис. 3.

Наблюдатель, глядя через обратную сторону копии голограммы, будет видеть двойное мнимое изображение, причем промежуток между изображениями равен удвоенному зазору между оригиналом и копией. Если этот промежуток достаточно мал, то оба изображения сливаются и видны как одно. Для того чтобы при изготовлении копии гарантировать это условие, эмульсия копии должна располагаться по возможности ближе к эмульсии голограммы-оригинала.

Тем не менее промежуток между ними может быть большим по сравнению с длиной волны используемого света.

Необходимо помнить, что два мнимых изображения (так же, как два действительных) складываются по амплитудам. Картина

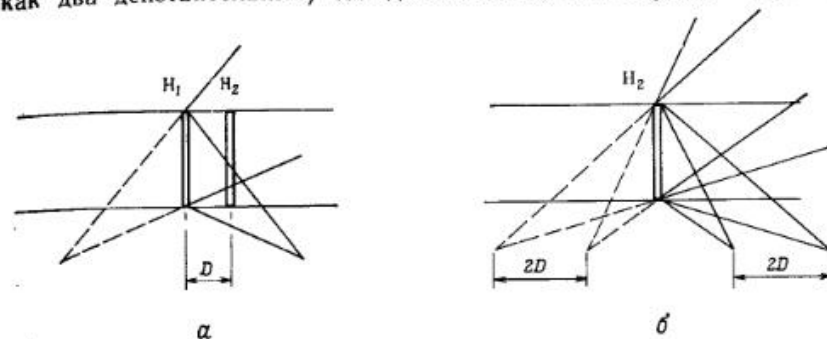


Рис. 3. Геометрия схемы копирования голограммы почти контактным методом, поясняющая возникновение двойного изображения точечного объекта. а — геометрия схемы записи копии; б — геометрия схемы восстановления с копии изображения; два действительных и два мнимых изображения находятся друг от друга на расстоянии, равном удвоенному промежутку, разделяющему H_1 и H_2 в схеме записи.

результатирующей интенсивности в двойном изображении на сетчатке глаза будет, таким образом, проявлять действие интерференции, которое зависит от расстояния между изображениями и от угла зрения. В типичном случае, когда исходный объект рассеивает свет, интерференционные картины в двойном изображении будут незначительно отличаться от картины спеклов, сопровождающих каждое из изображений по отдельности.

9.3.2.2. Копирование толстых голограмм

Если голограмма-оригинал является толстой, то при восстановлении изображения она будет проявлять брэгговскую (угловую) селективность. Кстати, у таких толстых голограмм возможно надлежащей ориентацией опорной волны восстановить яркое мнимое (или действительное) изображение, не восстанавливая сопряженного ему изображения. В этом случае возможно приблизительно контактное копирование без получения двойного восстановленного изображения, даже если промежуток между оригиналом и копией составляет несколько миллиметров. Но промежуток все же должен быть по возможности небольшим, чтобы точно знать, что опорная волна и волна восстановленного изображения перекрываются в том месте, где располагается копия. В противном случае интерференционные полосы не образуются. Значительную брэгговскую селективность проявляют большинство голограмм, записанных на

фотоэмульсиях, и влияние двойного изображения столь несущественно, что им можно пренебречь. Качество копии можно улучшить, если для уменьшения отражений между оригиналом и копией использовать иммерсионную жидкость.

Следует заметить, что при копировании толстых голограмм голограмма-оригинал должна освещаться волной, во всем аналогичной исходной опорной волне. Если это не выполняется, например в случае, когда кривизна и/или направление восстанавливающей волны не совпадает с кривизной и/или направлением исходной опорной волны, то разрешение и поле зрения восстановленного изображения могут уменьшиться. Изменение длины волны также приводит к плохому восстановлению изображения с голограммы-оригинала, а следовательно, и к плохой копии.

Если нужно получить копию отражательной голограммы, необходимо придерживаться выполнения тех же условий: кривизна, направление и длина волны восстанавливающего волнового фронта должны быть тщательно согласованными с оригиналом, чтобы получить по возможности лучшее восстановление изображения. Для этого требуется, чтобы голограмма-оригинал и копия, показанные на рис. 3, поменялись местами; при этом восстанавливающая волна, проходя через фотоэмульсию, предназначенную для копии, освещает голограмму-оригинал. В результате интерференции освещающей волны с отраженной дифрагированной волной восстановленного изображения образуется картина интерференционных полос, записываемая копией. Если в качестве голограммы-оригинала используется отражательная голограмма поглощательного типа, которой свойственна особенно низкая дифракционная эффективность, то контраст системы интерференционных полос, как правило, оказывается очень низким. Все это приводит к низкой дифракционной эффективности самой копии. С другой стороны, отражательные голограммы фазового типа, которые характеризуются значительно большей дифракционной эффективностью, во многих случаях дают великолепные реплики.

9.3.3. Массовое размножение рельефно-фазовых голограмм¹⁾

Следует также рассмотреть способ штампования копий рельефно-фазовых голограмм, поскольку ни один из способов копирования в больших масштабах не является столь экономичным, как этот.

Рельефно-фазовые голограммы во многом похожи на голограммы с отбеленным серебром. Однако в этом случае дифракционная фазовая структура определяется изменением толщины голограммы, а не локальными изменениями показателя преломления. Правильную пропускающую дифракционную решетку можно рассматривать как исключительно простую рельефно-фазовую голограмму.

¹⁾ См. также п. 8.4.8.2 настоящей книги. — *Прим. перев.*

Должным образом записанную рельефно-фазовую голограмму можно размножить простым штампованием, аналогичным тому, который применяется для массового производства грампластинок. Исходная голограмма обычно записывается на положительно работающем фоторезисте типа Shipley AZ-1350. Фоторезист тонким слоем наносится на соответствующую подложку и экспонируется таким же образом, как и обычная голограмма. Для согласования со спектральной чувствительностью фоторезиста приходится использовать лазер, излучающий в диапазоне коротких длин волн, предпочтительнее в ультрафиолете. После экспонирования фоторезист проявляется травящим раствором. Сильно экспонированные участки вытравливаются совсем, при этом на слегка освещенных участках остаются поверхностные неровности. В результате получается рельефная картина с высоким разрешением, которая соответствует освещающей структуре интерференционных полос.

Реплику голограммы можно сделать непосредственно с голограммы-оригинала на задубленном фоторезисте. Однако если необходимо получить очень много копий, лучше с голограммы-оригинала сделать штамп. Это выполняется методами гальванопластики, аналогичными тем, которые используются при производстве никелевых штампов для грампластинок. Никелевый штамп позволяет формовать реплики на прозрачной виниловой ленте. Температура и давление подбираются такими, чтобы можно было с уверенностью получать хорошие копии. Поскольку сырье для получения винила очень дешевое, стоимость дополнительных копий оказывается невысокой.

10.1. ХРАНИЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Т. Гейлорд

10.1.1. Применения голографического хранения цифровой информации

10.1.1.1. Расширение спроса

Хранение и восстановление информации имеет фундаментальное значение практически во всех сферах человеческой деятельности. Частные лица, большие и малые предприятия, правительственные учреждения и многие другие организации занимаются решением этой проблемы. Разработка электронных вычислительных машин вызвала острую необходимость в обширной, хорошо организованной и эффективной памяти. Стремительный рост мощности вычис-

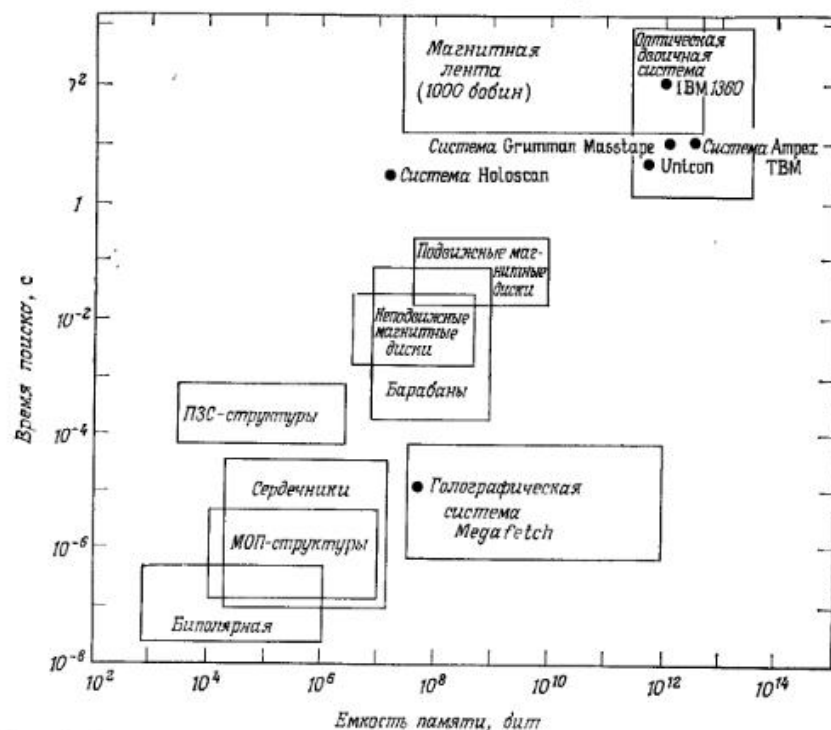


Рис. 1. Сравнение различных типов памяти по времени поиска и емкости памяти.

лений сопровождался непрерывно возрастающей потребностью в достаточно объемных, быстродействующих и недорогих системах памяти для хранения цифровой информации.

Общее представление о развитии систем памяти можно получить из рассмотрения времени поиска в системе памяти как функции ее

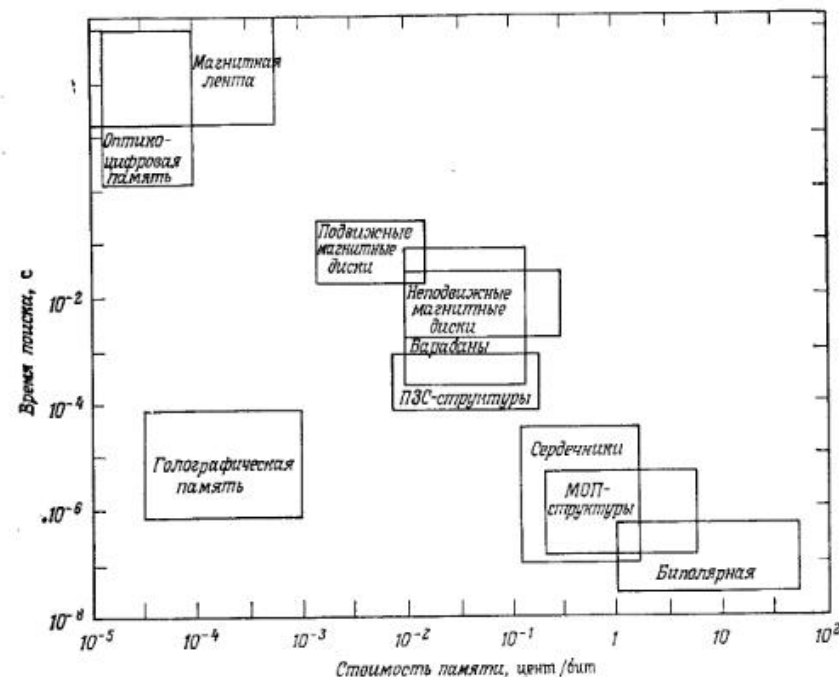


Рис. 2. Сравнение различных типов памяти по времени поиска и стоимости на бит хранимой информации.

емкости и цены на бит информации для различных технических решений систем памяти. Эти данные приводятся на рис. 1 и 2. Хотя границы между различными системами памяти весьма расплывчаты и непостоянны, совершенно очевидно, что для неголографических типов памяти существует взаимозаместимость между временем поиска, с одной стороны, и емкостью памяти или стоимостью бита — с другой; иными словами, быстрый поиск связан с малой и дорогой памятью, а для медленного поиска возможна большая и менее дорогая память. Оптическая голографическая память представляет собой одну из возможностей для преодоления этого якобы присутствующего памяти противоречия.

10.1.1.2. Архивная память

Потребности в памяти с высокой емкостью можно разделить на несколько категорий в зависимости от требуемых характеристик поиска. Возможно, наиболее мягкие требования предъявляются к категории архивной памяти, или к системе поиска документов. В этой категории большой объем информации должен храниться в центральной памяти, а поиск носит эпизодический характер. В качестве примеров можно привести библиотеки, архивы страховых, медицинских, сейсмологических, криминалистических данных, патентных документов, акционерных сведений, стандартных программ ЭВМ, оборонной и почтовой информации. Множество государственных и частных организаций постоянно пользуются библиотеками магнитных записей, содержащих свыше 200 000 катушек магнитных пленок. Такой способ хранения информации обходится недешево, а поиск информации является слишком долгим. Эта категория хранения требует главным образом памяти только со считыванием (без записи в процессе эксплуатации).

10.1.1.3. Хранение информации с преимущественным считыванием

Другая категория систем хранения, аналогичная первой, включает такое хранение информации, при котором она время от времени может изменяться. Это требует памяти с преимущественным считыванием. В памяти такого рода данные добавляются или изменяются по типу ЭВМ, но происходит это весьма редко. Примерами информации, которую необходимо хранить в таких системах памяти, являются кредитная информация, списки личного состава, информация о ценах, номера телефонов, акционерные сведения, большие инвентаризационные описи, данные о погоде для долгосрочных прогнозов и большие информационные массивы.

10.1.1.4. Скоростной регистратор

Третья категория систем хранения характеризуется высокой скоростью записи информации и временным ее запоминанием. В качестве примера можно привести оптические системы связи с высокой скоростью передачи числовых разрядов. В оптической связи эффективное использование турбулентных каналов требует очень высокой емкости, а также очень быстродействующей, реверсивной и обширной оперативной памяти, предназначенной для записи информации за временные интервалы, когда эти каналы прерваны. Другой пример — запись информации во время полета космического зонда. В обоих случаях большое количество информации необходимо записать за короткий промежуток времени. Если

информация зарегистрирована, она в дальнейшем может быть передана при низких скоростях с целью уменьшения ошибок при передаче. Решение таких задач требует скоростного регистратора.

10.1.1.5. Быстродействующая реверсивная память

Четвертая категория систем хранения требует больших скоростей считывания, записи и стирания информации. Наиболее очевидным примером этой категории памяти может служить память ЭВМ как общего, так и специального назначения. Современные ЭВМ используют сложную систему устройств памяти. К наиболее важным из них относятся магнитные ленты, диски, барабаны и сердечники, а также полупроводниковые блоки памяти. На рис. 1 и 2 графически представлены время поиска, емкость памяти, а также стоимость бита хранимой информации. Современные ЭВМ для эффективных вычислений используют комбинацию больших, но медленных устройств памяти и малых, но быстрых. Голографическая оптическая память благодаря очень высоким потенциальным возможностям по емкости и скорости произвольной выборки открывает перспективы замены большого класса современных систем памяти. В настоящее время разработаны некоторые системы памяти с высокой емкостью на неоптических принципах. Среди них система терабитной памяти, разработанная фирмой «Аптех» (ТВМ), и система фирмы «Grumman Masstape». Как видно из рис. 1, для этих систем время поиска около 10 с. Максимальные емкости составляют $8,8 \cdot 10^{11}$ бит и $2,9 \cdot 10^{12}$ бит соответственно для системы Grumman Masstape и ТВМ. Однако несмотря на достаточный для большинства практических случаев объем памяти этих систем, большие времена поиска делают их непригодными для задач, которые требуют быстрого поиска произвольной информации в памяти.

10.1.2. Виды голографической памяти

10.1.2.1. Основные конструктивные соображения

Основные конструктивные решения для создания голографической памяти в общих чертах были разработаны к 1970 г. (см., например, [3, 24, 27, 28, 31, 33]). Именно эти основы мы и обсудим в данном разделе. В разд. 10.1.4 мы подробно рассмотрим количественные аспекты технического воплощения этих конструктивных решений. Обширные обзоры по устройствам голографической памяти выполнили Хилл [16], Хаскол и Чен [13], а также Вандер Люгт [40].

а. Голограммы Фурье. Информацию предпочтительно хранить в голографической форме, а не в виде прямого изображения или дво-

ичных чисел. В типичном случае голограмма представляет собой запись интерференционной картины от фурье-образа распределения двоичной информации и плоской опорной волны. Благодаря тому что информация в голограмме содержится в распределенной форме, она защищена от локальных потерь, связанных с дефектами материала и пылью на поверхности. Голограммы Фурье обладают также тем достоинством, что они дают воспроизводимое изображение, инвариантное к смещениям вбок от опорного пучка. Более подробно голограммы Фурье рассматриваются в § 4.3 (см. т. I настоящей книги).

б. Хранение информации в плоском формате. Информацию предпочтительно хранить в виде страниц, а не в трехмерном виде. Способность голографии давать трехмерные изображения объектов не играет роли в случае хранения информации. Восстановленная информация представляется в виде двумерных массивов, называемых страницами.

в. Цифровая информация. Информацию лучше хранить в виде двоичного кода, а не в виде изображения. Восстановленная страница с двоичными данными представляет собой совокупность светлых

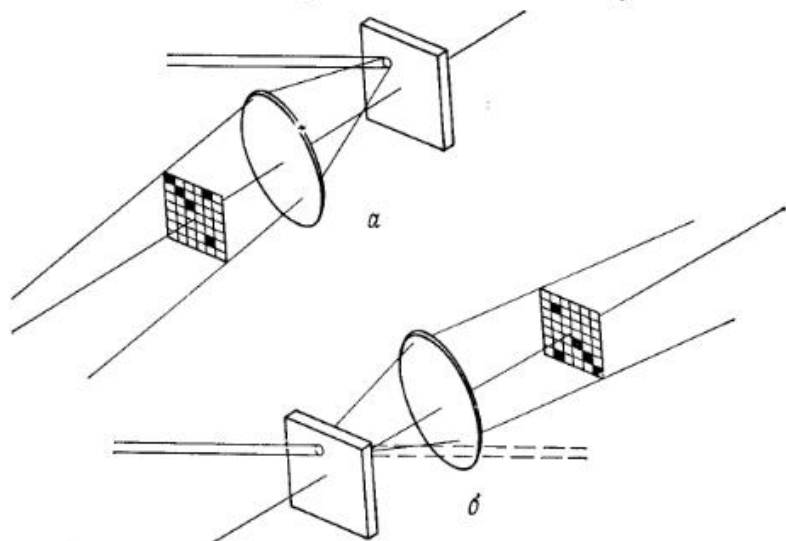


Рис. 3. Голографическая запись (а) и считывание (б) страницы двоичных данных.

и темных пятен, соответствующих единицам и нулям цифровых данных. Можно также использовать представления в виде картины, отпечатанной страницы, рисунка, карты или фотографии. Однако при очень больших плотностях информации, например для

составителей страниц и матриц детекторов, предпочтительно использовать двоичный код. На рис. 3 схематически представлены основные операции записи и считывания страницы с цифровыми данными.

г. Толстые фазовые голограммы. Информацию предпочтительно хранить в виде толстых фазовых, а не в виде тонких или поглощательных голограмм. Такое конструктивное решение связано с тем, что фазовые голограммы по сравнению с поглощательными, а толстые по сравнению с тонкими имеют наивысшую информационную емкость. Данный вывод следует из сравнения максимальных дифракционных эффективностей этих основных типов голограмм.

Обычно голограммы различают по толщине с помощью параметров Q :

$$Q = 2\pi\lambda d/nL^2; \quad (1)$$

здесь λ — длина волны света в воздухе, d — толщина голограммы, n — ее показатель преломления, а L — основной период решетки, определяемый выражением

$$L = \lambda/2\sin\theta_a, \quad (2)$$

где θ_a — половина угла между объектным и опорным пучками в воздухе, причем длина волны относится к записывающему свету (а не к считывающему). Для тонких голограмм

$$Q \ll 1, \quad (3)$$

а для толстых

$$Q \gg 1. \quad (4)$$

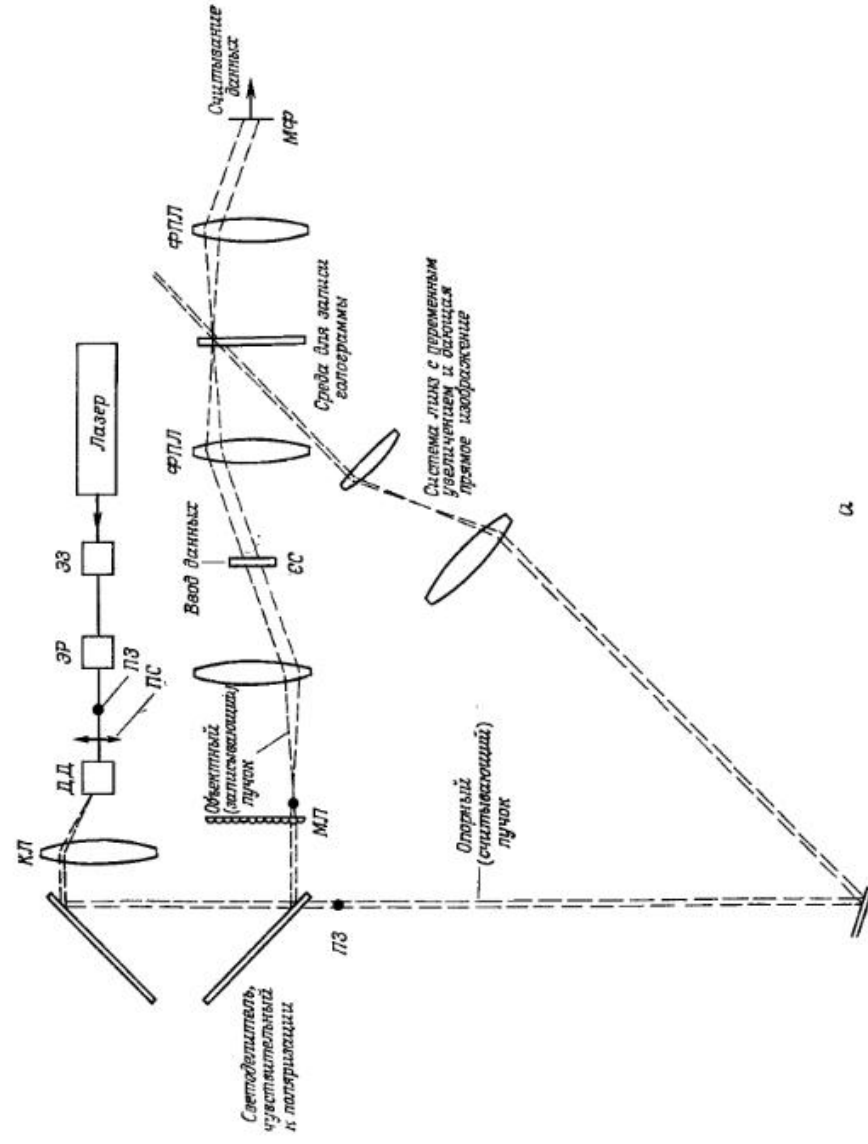
В случае пропускающих голограмм с синусоидальной модуляцией дифракционная эффективность в первом порядке при падении входного пучка под первым углом Брэгга обозначается буквой η .

Дифракционная эффективность тонких поглощательных голограмм дается выражением

$$\eta = \exp(-2\alpha d/\cos\theta_1) I_1^2(\alpha_1 d/\cos\theta_1), \quad (5)$$

где α — средний коэффициент поглощения света, α_1 — амплитуда синусоидальной модуляции поглощения, θ_1 — половина угла между объектным и опорным пучками внутри среды, а I_1 — модифицированная функция Бесселя первого рода и первого порядка. Максимальная возможная величина α_1 равна α ; таким образом, максимальная дифракционная эффективность тонкой синусоидальной поглощательной голограммы равна

$$\eta_{\max} = 4,80\%. \quad (6)$$



2

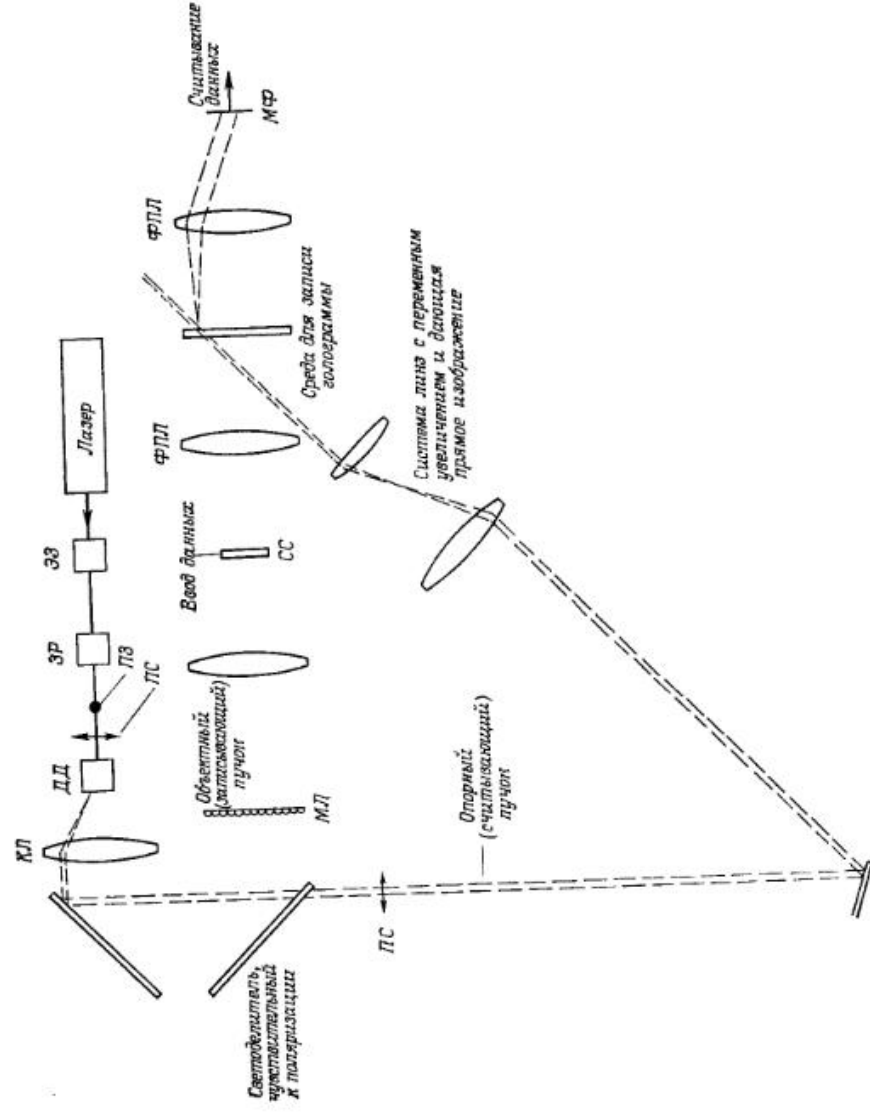


рис. 5. Голографическая запись (а) и считывание (б) страницы данных, имеющей координаты x_0 в двумерной оптической голографической памяти. Обозначения элементов см. в подписи к рис. 4.

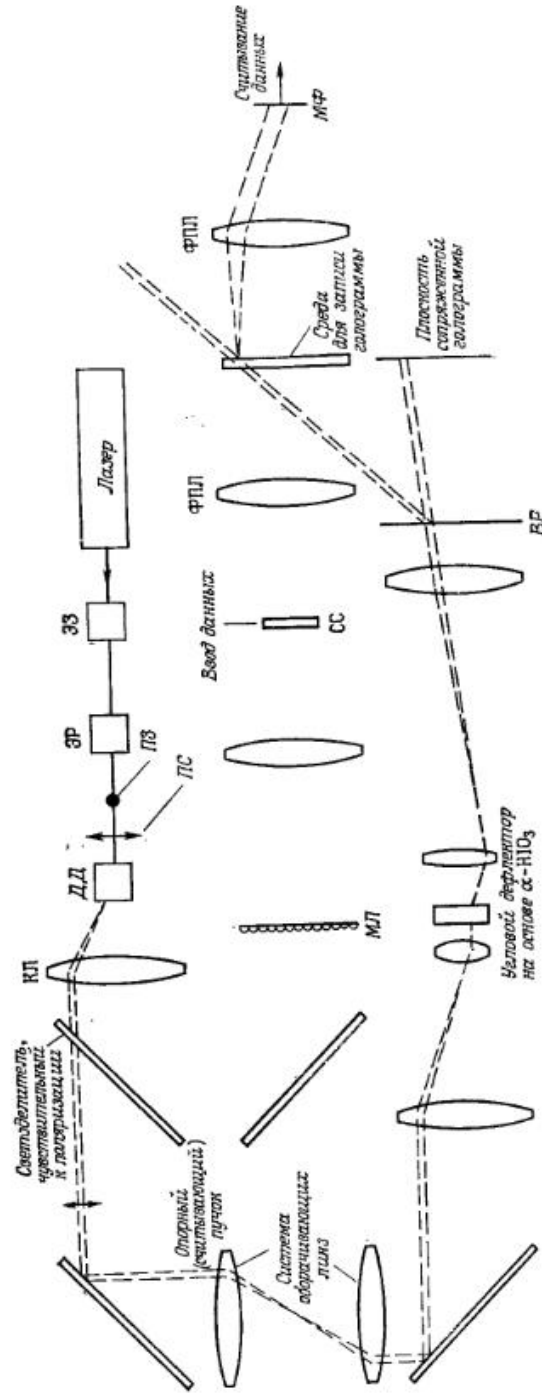
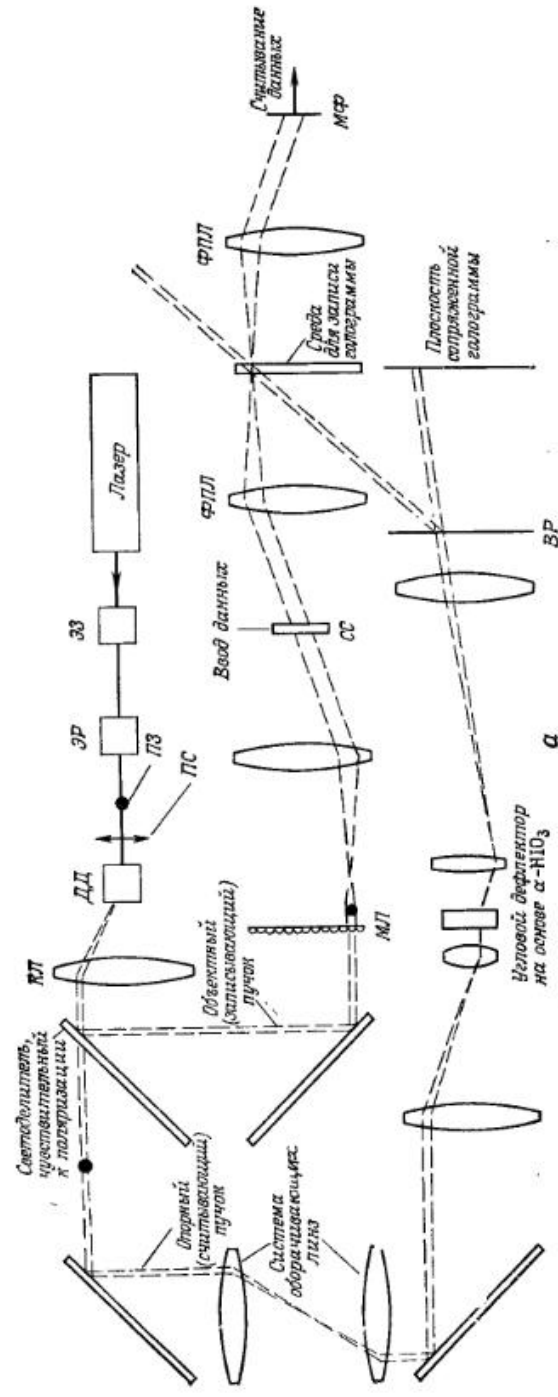


Рис. 7. Голографическая запись (а) и считывание (б) страницы данных, имеющей координаты x, y, z в трехмерной оптической голографической памяти. Обозначения элементов см. в подписи к рис. 4. ВР — высокоэффективная решетка.

одной и той же плоскости с координатами $xу$ внутри толстой среды для записи, причем для различных голограмм опорный пучок имеет разные направления. Эти голограммы обнаруживают очень сильную угловую селективность, обусловленную их объемной природой [22]; таким образом, для считывания голограммы необходимо, чтобы опорный пучок падал на нее внутри узкого углового коридора относительно угла Брэгга для данной голограммы. Освещение вне этого углового коридора вызывает быстрое падение интенсивности в восстановленном изображении. Кроме того, чем толще голограмма, тем уже становится угловой коридор, в котором возможно восстановление (см. п. 10.1.4.6). Суперпозиция многих голограмм в одном месте влечет за собой дополнительную проблему записи новых голограмм таким образом, чтобы последние не оказывали влияния на записанные ранее. Например, если в качестве трехмерной среды для записи голограммы использовать электрооптический кристалл ниобата лития, то данную проблему можно решить с помощью внешнего электрического поля [2]. При этом значительно возрастает чувствительность при записи, тогда как чувствительность при стирании остается неизменной и составляет меньшую величину. Таким образом, когда записывается новая голограмма, другие голограммы, расположенные в том же месте, стираются лишь незначительно. Кроме того, осуществлялось хранение множества голограмм на ниобате лития с помощью метода градиента температуры [32]. При этом благодаря возникающей асимметрии свойств удалось получить селекцию по записи и стиранию, требуемую для хранения наложенной голограммы. Данный метод позволил записать на ниобате лития, легированном 0,01% железа, 500 голограмм, каждую с дифракционной эффективностью более чем 2,5%. Проблема селективного стирания отдельной голограммы среди множества наложенных голограмм была решена путем записи добавочной голограммы, в которой показатель преломления изменяется таким образом, что нейтрализует голограмму-оригинал [17].

На рис. 7 схематически показано, как действует сложная система трехмерной голографической памяти, изображенная на рис. 6. На рис. 7, а иллюстрируется процесс записи с целью регистрации страницы данных в некотором объеме среды с координатами $xуф$. При этом используется та же оптическая система, что и в двумерном случае, за исключением лишь дополнительного устройства отклонения, добавленного для того, чтобы менять угол падения опорного пучка на среду для записи голограммы. Оптическая система, так же как и в предыдущем случае, заставляет опорный и объектный пучки пересекаться в среде для хранения информации независимо от того, в какое место с координатами $xуф$ мы адресуем информацию (с помощью дефлекторов света). Таким образом, автоматическое слежение снова осуществляется с помощью оптического устройства. На рис. 7, б иллюстрируется процесс считывания в

трехмерной голографической памяти. На этом рисунке показано, как восстанавливается голограмма, хранящаяся в объеме с координатами $xуф$. Здесь все происходит точно так же, как и в двумерном случае, за исключением лишь того, что теперь каждому адресату с координатами $xу$ соответствует множество угловых координат $ф$.

10.1.3. Компоненты оптической памяти

10.1.3.1. Источник света

В голографической системе памяти для обеспечения интенсивного коллимированного когерентного света требуется лазер. Он должен быть импульсным (возможно, с синхронизацией мод) или управляться внешним затвором с частотой порядка 10^6 импульсов в секунду, причем каждый импульс используется с целью записи или считывания. Кроме того, в зависимости от среды для записи голограммы и от того, какие применяются процессы записи и считывания, лазер должен обеспечивать среднюю оптическую мощность в одномодовом режиме около 1 Вт. Большинство материалов для записи голограмм и фотодетекторов наиболее чувствительны в сине-зеленой области спектра. Поэтому в качестве источника света предпочтительно использовать аргоновый лазер, поскольку он дает интенсивные синюю ($\lambda=0,488$ мкм) и зеленую ($\lambda=0,5145$ мкм) линии излучения. Он также удовлетворяет необходимым требованиям к стабильности частоты и амплитуды, длине когерентности и надежности. Недостатками аргонового газового лазера являются его высокая стоимость (около 15 000 долл.) и низкий КПД преобразования электрической мощности в оптическую (порядка 0,1%). Из твердотельных лазеров для систем голографической памяти наиболее приемлемым является Nd:YAG-лазер с удвоением частоты ($\lambda=0,530$ мкм). В импульсном режиме работы такой лазер может обеспечить очень высокую пиковую мощность (до 10^8 Вт).

Относительно короткие длины волн желательны также и потому, что плотность хранения информации пропорциональна λ^{-2} или λ^{-3} (см. п. 10.1.4.1). Однако в фиолетовом и ультрафиолетовом диапазонах возникает фоновый шум, ухудшающий восстановленные изображения; это связано с неизбежным хаотическим (рэлеевским) рассеянием, интенсивность которого пропорциональна λ^{-4} .

Более подробная информация о лазерах дается в § 8.1 и 8.2, а о материалах для голографии — в § 8.3.

10.1.3.2. Дефлекторы пучков света

В системе оптической памяти для точного направления лазерных пучков при записи, считывании и стирании применяют целый набор дефлекторов, которые должны быстро и безошибочно управлять положением светового пучка.

Как показано в табл. 1, существуют три основных типа дефлекторов: механические, акустооптические и электрооптические. В табл. 1 приведены примеры каждого типа. Количественными

Таблица 1

Типы дефлекторов светового пучка

Механические	Акустооптические	Электрооптические
Гальванометр с движущейся железной пластинкой	Альфа-иодная кислота ($\alpha\text{-HIO}_3$)	Дигидрофосфат калия (KH_2PO_4)
Гальванометр с движущейся рамкой	Молибдат свинца (PbMoO_4)	Дигидрофосфат аммония ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)
Вращающееся многоугольное зеркало	Вода (H_2O)	Ниобат лития (LiNbO_3)
	Парателлурит (TeO_2)	Ниобат стронция—бария ($\text{Sr}_{0,75}\text{Ba}_{0,25}\text{Nb}_2\text{O}_6$)
	Плотные флинт (SF-8, SF-59)	Ниобат-танталат калия (KTN)
	Ниобат лития (LiNbO_3)	
	Фосфид галлия (GaP)	

характеристиками дефлектора являются разрешение и время случайной выборки. Разрешение можно определить как максимальный угол отклонения, деленный на угол дифракционного уширения пучка. Это отношение дает полное число разрешимых угловых положений, или полное число разрешимых точек M . Роль величины M мы обсудим в п. 10.1.4.4.

Автором статьи [42] выполнена большая работа с целью сравнения свойств различных дефлекторов светового пучка. Для каждого из трех типов дефлекторов существует обусловленная конструкцией связь между числом разрешимых точек и временем произвольной выборки. Время произвольной выборки τ_a — это время, необходимое для отклонения лазерного пучка в новое угловое положение. Механические дефлекторы имеют время произвольной выборки

$$\tau_a = \frac{1}{2f_0}, \quad (13)$$

где f_0 — резонансная частота механической системы. Практически τ_a механических дефлекторов редко бывает меньше 0,1 мс. Таким образом, механические дефлекторы являются недостаточно быстродействующими, чтобы их можно было применять в системе голографической памяти с быстрой выборкой (когда требуется время выборки около 1 мкс).

В акустооптическом дефлекторе с помощью пьезоэлектрического преобразователя в акустооптический материал вводится

акустическая волна. Эта бегущая волна создает решетку с различными значениями показателя преломления, на которой дифрагирует лазерный пучок. Изменение несущей акустической частоты соответствует изменению длины волны звука и, следовательно, периода решетки. Это приводит к изменению угла дифракции светового пучка, и, таким образом, прибор действует как дефлектор пучка с переменным углом. Время случайной выборки определяется главным образом временем прохождения звуковой волны через сечение лазерного пучка. Таким образом, в случае акустооптического дефлектора

$$\tau_a = \frac{D}{v_s}; \quad (14)$$

здесь D — ширина апертуры, а v_s — скорость звука в акустооптической среде. Для воды $v_s = 1,5 \cdot 10^3$ м/с. Следовательно, дефлектор на воде с 20-миллиметровой апертурой имеет $\tau_a = 13,3$ мкс.

Чтобы увеличить дифракционную эффективность и уменьшить присущую пучку расходимость, ячейки акустооптических дефлекторов часто удлиняют в направлении распространения акустической волны. При этом лазерный пучок фокусируется, образуя эллиптическое пятно, большая ось которого параллельна направлению удлинения ячейки. Такая фокусировка осуществляется цилиндрическими линзами (рис. 8). Плоскость, содержащая дифрагированный и недифрагированный лазерные пучки, параллельна как линии фокусировки, так и оптической оси системы линз. Поэтому ячейку акустооптического дефлектора, отклоняющего пучок вдоль координаты x , помещают на горизонтальной линии фокусировки,

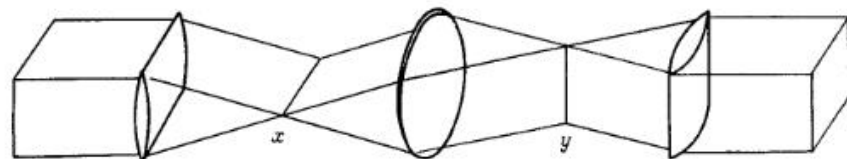


Рис. 8. Оптическая схема типичной акустооптической отклоняющей системы в плоскости xy .

а ячейку дефлектора, отклоняющего пучок вдоль оси y , — на вертикальной. Таким образом, если предположить, что эллиптическое лазерное пятно заполняет всю удлиненную акустооптическую ячейку, то ширина апертуры этой ячейки D будет связана с длиной большой оси пятна. Увеличение ширины апертуры D влечет за собой увеличение числа разрешимых точек (см. п. 10.1.4.4) и дифракционной эффективности, но при этом уменьшает скорость произвольной выборки.

Движение акустической решетки приводит к доплеровскому сдвигу частоты дифрагированного оптического луча. Поэтому акустооптические дефлекторы следует использовать до светоделителя, расщепляющего пучок на опорный и объектный. При этом необходимо, чтобы оба пучка имели одинаковую длину волны и давали стабильные интерференционные полосы. Наличие доплеровского сдвига частоты хотя бы у одного из пучков (объектного или опорного) приводит к ухудшению интерференционной картины в точках пересечения этих пучков.

Существует два типа электрооптических дефлекторов: аналоговые и цифровые. В аналоговом дефлекторе к электрооптической призме прикладывается электрическое поле, вызывающее изменение показателя преломления, что влечет за собой изменение угла прохождения лазерного пучка через призму; таким образом, данное устройство представляет собой угловой дефлектор пучка света. Однако практически электрооптические коэффициенты известных материалов слишком малы, чтобы давать большие углы отклонения при приемлемых значениях электрического поля. Поэтому с целью увеличения угла отклонения, а следовательно, и числа разрешимых точек применяют последовательные каскады призм.

В цифровом электрооптическом дефлекторе используется электрооптический модулятор света и двулучепреломляющая призма (например, кальцитовая). Электрооптический ротатор (модулятор) служит для вращения плоскости поляризации. При изменении напряжения на модуляторе на полуволновое плоскость поляризации линейно-поляризованного выходного пучка поворачивается на 90° . После прохождения через двулучепреломляющую призму пучок в зависимости от положения плоскости поляризации отклоняется в одном из двух направлений. (В двулучепреломляющем материале два возможных линейно-поляризованных пучка света испытывают два различных показателя преломления.) Каскадное соединение m цифровых дефлекторов позволяет отклонить пучок в 2^m угловых направлений. Например, 20-каскадный электрооптический дефлектор, состоящий из 10 каскадов отклонения по x и 10 каскадов отклонения по y , создает двумерную матрицу разрешимых точек 1024×1024 [26]. Время случайной выборки в этом устройстве составляет 0,8 мкс. В случае электрооптического дефлектора время случайной выборки τ_a дается выражением

$$\tau_a = 4CV_p^2/P_a, \quad (15)$$

где C — емкость дефлектора, V_p — максимальное напряжение, а P_a — полезная электрическая мощность, потребляемая от источника. Существенным препятствием для применения этих систем являются потери света при его прохождении через множество поверхностей, а также высокая стоимость таких дефлекторов.

10.1.3.3. Составитель страниц

Ввод информации в оптическую голографическую память осуществляется составителем страниц, или составителем блока данных, который преобразует цифровые электрические сигналы непосредственно в двумерную оптическую матрицу двоичных знаков. В двулучевой голографической схеме составитель страниц помещается на пути объектного пучка. При восстановлении информации голограмма будет давать изображение в плоскости матрицы фотодетекторов, которая будет копировать образуемую составителем страниц матрицу, состоящую из единиц и нулей (светлые и темные точки).

Составитель страниц должен иметь следующие характеристики:

1. *Высокая скорость кадров.* Должна быть предусмотрена возможность быстрой смены страницы данных. Желательно, чтобы время смены находилось в микросекундном диапазоне.

2. *Высокое разрешение.* Размер каждой двоичной ячейки должен быть столь малым, чтобы в небольшой области размещалось очень большое их число. Удовлетворительным считается размер 100 мкм.

3. *Большая апертура.* Общая площадь составителя страниц, пересекаемая лазерным пучком, должна быть достаточно большой, чтобы уместить желаемое число бит на страницу. Широкое распространение получили битовые матрицы размером от 64×64 до 1024×1024 элементов.

4. *Высокий контраст.* Достижение высокого контраста ослабляет последующие требования к материалам для записи голограмм и матрицы фотодетекторов. Желательно иметь контраст 100 : 1 и больше; такой контраст достигался в ряде устройств типа составителя страниц.

5. *Стабильность.* Характеристики материалов, используемые в составителе страниц, не должны ухудшаться при экспонировании высокоинтенсивным светом (объектным пучком).

6. *Однородность.* Неоднородности материала в составителе блока данных не должны вызывать в системе памяти ошибок при считывании.

7. *Адресация полной страницы.* Необходимо, чтобы в составителе страниц все двоичные ячейки могли бы одновременно и независимо находиться в состоянии либо нуль, либо единица.

Существует множество различных физических явлений, лежащих в основе действия составителей страниц. Некоторые из них приведены в табл. 2. Очевидно, что в составителях страниц в принципе можно использовать различные физические явления и самые разнообразные материалы. Весьма полезными представляются жидкокристаллические составители блока данных. Фирма «RCA» разработала жидкокристаллический составитель страниц на 1024 бит [23]. Главной проблемой для жидкокристаллических составителей страниц является относительно низкая скорость кадров (порядка

Таблица 2

Типы составителей страниц *

Физические явления, используемые в составителе страниц	Материалы	Способы адресации
Вращение плоскости поляризации индуцированным двулучепреломлением (электрооптические эффекты)	PLZT (керамика), $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, KDP, KD^*P , ADP	Матрица электродов, электронный пучок, световой пучок (с фотопроводником)
Фазовые изменения, создаваемые поверхностным рельефом	Термопластики, фотопластики, тонкие металлические мембраны	Электронный пучок, матрица электродов плюс заряд
Фазовые возмущения вследствие пьезоэлектрического возбуждения отражающих поверхностей	Зеркальные пьезоэлектрические кристаллы	Единичные переключения возбуждающим импульсом высокой частоты
Изменение оптической плотности вследствие индуцированного поглощения	Фотохромные и катодохромные материалы	Белый свет (ультрафиолет) плюс мощное освещение для стирания; электронный пучок плюс мощное освещение для стирания
Изменение оптического рассеяния при электрическом возмущении	Жидкие кристаллы	Матрица электродов, световой пучок (с фотопроводником)
Вращение плоскости поляризации с помощью магнитооптических эффектов	MnBi , $\text{EuO}:\text{Fe}$, $\text{Ni}-\text{Fe}$, FeBO_3 , FeF_3	Световой пучок (поглощение), матрица проводников
Бегущие изменения фазы при акустооптическом взаимодействии (эффекты Дебая—Сирса и Брэгга)	Вода (и другие жидкости), плавленый кварц (и другие аморфные тела), PbMoO_4 (и другие кристаллы)	Поперечное взаимодействие когерентного света и бегущих акустических волн
Термоиндуцированный сдвиг края полосы поглощения	CdS , CdSe , As_2S_3	Матрица электродов для нагревания и теплоотводящая подложка для охлаждения
Оптическое рассеяние поляризованными и неполяризованными участками сегнетоэлектрика	PLZT (керамика)	Матрица электродов
Фазовые изменения, связанные с изменениями длины оптического пути	Электрострикционные материалы, PLZT (керамика)	Матрица электродов, метод двойной записи голограмм
Изменения отражения от тонких деформируемых зеркальных элементов	Металлические пленки на подложке	Электроды, подсоединенные к транзисторам на обратной стороне подложки

*Эта таблица с некоторыми изменениями заимствована из работы Робертса [30]

100 мс). Многообещающими выглядят также составители блока данных на основе цирконата-титаната свинца-лантана (PLZT). Для таких составителей страниц, имеющих достаточно высокую скорость кадров, характерны четыре основных режима работы: режим смещения деформации, режим рассеяния, режим краевого эффекта и дифференциальный фазовый режим [7]. Этот последний режим работы исключает вредное влияние неоднородностей фона в PLZT, но требует двойной экспозиции голограммы через информационную маску. В табл. 2 приведены также еще три возможных принципа работы составителей блоков данных, в которых используются соответственно матрица тонких деформируемых мембранных зеркал [5], термоиндуцированный сдвиг края полосы оптического поглощения в CdS [15] и акустооптический эффект.

10.1.3.4. Среда для записи голограмм

Среды для записи (регистрации) голограмм детально рассмотрены в § 8.3. Однако, поскольку материал для записи имеет решающее значение для голографической памяти, мы здесь еще раз рассмотрим его характеристики, необходимые для конкретных применений.

К параметрам материалов для записи голограмм предъявляется ряд требований, играющих важную роль для обеспечения той высокой емкости системы хранения, которая ожидается в случае оптической памяти. Эти требования следующие:

1. *Высокая чувствительность.* Желательно, чтобы при записи голограммы страницы данных использовалась лишь небольшая удельная оптическая энергия. Практически плотность энергии не должна превышать $1,0 \text{ мкДж/мм}^2$.

2. *Высокая дифракционная эффективность.* Дифракционная эффективность характеризуется долей считываемого света (опорного пучка), которая дифрагирует в пучок восстановленного изображения. Для того чтобы на практике можно было записать множество голограмм в одном месте, необходимо иметь высокую дифракционную эффективность записи отдельных голограмм.

3. *Возможность стирания и перезаписи.* Система памяти с быстрым циклом считывание — запись — стирание должна быть способна непрерывно менять данные, содержащиеся в памяти, без какого-либо ухудшения характеристик материала.

4. *Большое время хранения информации.* Данные, содержащиеся в памяти, должны сохраняться в течение длительного времени до их смены. В идеальном случае хранение должно быть постоянным.

5. *Неразрушаемость хранимой информации.* Данные должны сохраняться в памяти в отсутствие питания в системе.

6. *Неразрушающее считывание.* Материал для записи должен быть таким, чтобы он допускал по существу неограниченное число

операций считывания без ухудшения или изменения хранимой информации.

7. *Трехмерное хранение.* Чтобы добиться очень высокой емкости хранения, необходимо хранить информацию в толстых (объемных) голограммах. При этом, чтобы одновременно удовлетворить требованию высокой дифракционной эффективности, необходимо применять толстые фазовые (непоглощающие) голограммы.

8. *Высокое разрешение.* Очевидно, что материал для записи голограмм должен быть в состоянии записывать очень малые (размером порядка длины волны) изменения интерференционной картины, образующейся при пересечении объектного и опорного пучков.

10.1.3.5. Матрица фотодетекторов

Матрица фотодетекторов необходима для преобразования восстановленной с голограммы информации в электрический сигнал. Эта фоточувствительная матрица считывания должна включать в себя один чувствительный фотодиод или фототранзистор и один или два переключающих (адресующих) прибора на каждый бит информации восстановленной страницы (см., например, [4]). Каждый чувствительный элемент матрицы должен играть роль порогового детектора, указывающего на наличие или отсутствие света (двоичные 1 или 0). Одна и та же матрица фотодетекторов должна считывать все записанные голограммы.

В идеальном случае фотодетекторы должны обладать высокой обнаружительной способностью, чтобы отличать 0 от 1 в присутствии шумов. В п. 10.1.4.3 обсуждается вопрос о необходимой обнаружительной способности для получения заданного отношения сигнал/шум.

Второе основное требование к матрице фотодетекторов заключается в том, чтобы такую бездефектную матрицу можно было реализовать конструктивно при существующем уровне технологии. Современная полупроводниковая технология предоставляет нам такие возможности. В фирме «Bell Laboratories» разработана передающая трубка с матрицей, которая состоит из 525 000 отдельных дискретных кремниевых фотодиодов, укрепленных на одной пластине. Фирма «LSI» разработала матрицу, состоящую из 51 200 кремниевых фототранзисторов [25], используя метод многослойных соединений, в результате чего любой бит может быть считан примерно за микросекунду.

Третье полезное свойство матрицы фотодетекторов — это способность запоминать входную световую энергию. Поскольку считываемая страница обычно содержит слова или блоки слов, то полезно было бы иметь кратковременное хранение восстановленной битовой картины.

Наконец, четвертым требованием является то, чтобы матрица фотодетекторов в комбинации с электронным устройством обеспечивала полную произвольную выборку всех слов или блоков слов внутри восстановленной страницы.

10.1.3.6. Прочие оптические элементы

Помимо лазера, дефлекторов пучка, составителя страниц, среды для записи голограмм и матрицы фотодетекторов, для соединения главных элементов схемы необходимо множество других оптических элементов и электронных устройств. Некоторые из необходимых оптических элементов показаны на рис. 4—7. Как правило, приходится использовать большое число линз. Одни из них формируют пучок, другие осуществляют преобразование Фурье. При этом линзы должны быть высококачественными, чтобы не вносить больших искажений в волновой фронт. Если применяются акустооптические дефлекторы, то приходится использовать также цилиндрические линзы, причем их светосила должна быть больше, чем у сферических линз (см. рис. 8). Кроме простого светоделителя, расположенного под углом Брюстера, как показано на рис. 4—7, применяются светоделители, чувствительные к поляризации света.

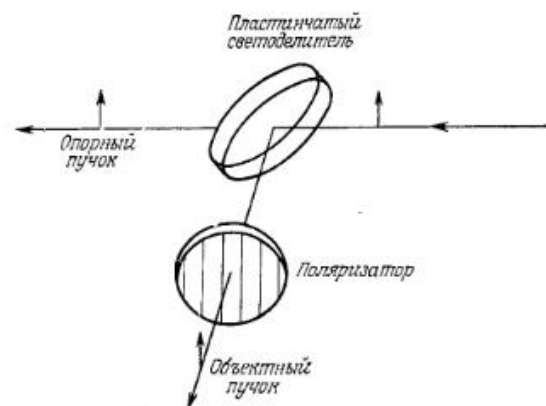


Рис. 9. Оптическое устройство для переключения между двухлучевой схемой записи и однолучевой схемой считывания, основанное на повороте плоскости поляризации пучка.

Для переключения между однолучевой схемой считывания и двухлучевой схемой записи можно использовать простой пластинчатый светоделитель совместно с поляризатором (рис. 9). Матрицу линз можно изготовить из отдельных короткофокусных стеклянных линз в виде монолитной матрицы спрессованных пластмассовых линз, или в виде матрицы оптических волокон с различными показателями преломления [36], либо в виде матрицы голографических

оптических элементов. Например, в работе [19] в голографической памяти использовалась матрица линз, представляющая собой матрицу из 32×32 голографических бинарных фазовых зонных пластинок.

Применение тех или иных электронных устройств в значительной степени зависит от того, какими были выбраны главные элементы схемы. Например, если используются акустооптические дефлекторы, то для управления ими необходимы высокочастотные генераторы с линейно регулируемым напряжением. При использовании электрооптических дефлекторов возникает необходимость в программно-управляемом высоковольтном источнике питания.

10.1.4. Соотношения между конструктивными параметрами устройства голографической памяти и его информационной емкостью

10.1.4.1. Теоретическая битовая емкость

В случае двумерной записи теоретическим пределом емкости хранения является один бит на площадь величиной λ^2 , а в случае трехмерной записи — один бит на объем размером λ^3 [41]. Этот теоретический предел справедлив как при хранении непосредственно записанной двоичной, так и голографической информации. Таким образом, теоретическая плотность хранения S_{2D} для двух измерений записывается в виде

$$S_{2D} = 1/\lambda^2. \quad (16)$$

В случае трех измерений теоретическая плотность хранения равна

$$S_{3D} = n^3/\lambda^3 \quad (17)$$

для материала с показателем преломления n . Таким образом, если $n=1,5$, а длина волны света в воздухе $\lambda=0,5145$ мкм, то теоретическая плотность хранения для двумерной (тонкой) голограммы равна $S_{2D}=3,78 \cdot 10^6$ бит/мм², а для трехмерной (толстой) голограммы $S_{3D}=2,48 \cdot 10^{10}$ бит/мм³. Эти значения являются теоретическими; на практике плотность хранения оказывается существенно меньше.

Емкость голографической памяти ограничивается рядом факторов, не позволяющих достичь вычисленных выше теоретических значений плотностей хранения. К настоящему времени не все эти факторы полностью выявлены, но часть причин проанализирована, и результаты этого анализа мы изложим ниже. Каждый ухудшающий эффект рассматривается в аспекте того ограничения, к которому он приводит. Если некоторый параметр хранения ограничивается более чем одним эффектом, то очевидно, что для определения емкости памяти необходимо выбрать меньшее значение

этого параметра; иными словами, если имеет место множество эффектов, ограничивающих параметр, то следует принимать во внимание при расчете полной емкости лишь эффект, дающий наибольшее (доминирующее) ограничение.

10.1.4.2. Ограничение полной битовой емкости, связанное с эффектами оптической апертуры

За апертуру воспроизводящего пучка для каждого бита в плоскости изображения (матрицы фотодетекторов) можно принять диаметр голограммы a в плоскости голограммы. Эти единицы информации будут различимы, если удовлетворяется критерий Рэлея, т. е.

$$\theta_{\min} = 1,22\lambda/a, \quad (18)$$

где θ_{\min} — минимально разрешимый угол битового изображения в плоскости фотодетекторов, измеренный из точки, расположенной в плоскости голограммы на расстоянии r от плоскости фотодетекторов. Площадь, которую занимает один бит в плоскости детекторов (считаем θ_{\min} малым), дается выражением

$$A_{\text{бит}} = 1,49\lambda^2 r^2 / a^2. \quad (19)$$

Число бит на страницу равно

$$N_1 = A_D / A_{\text{бит}} = 0,67 A_D a^2 / \lambda^2 r^2, \quad (20)$$

где A_D — площадь матрицы фотодетекторов. Число положений голограммы N_2 в материале для записи дается выражением

$$N_2 = A_H / (a/\mathcal{E})^2, \quad (21)$$

где A_H — площадь матрицы голограмм, а \mathcal{E} — линейный коэффициент заполнения голограммы в среде для записи. Таким образом, в случае двумерной записи полная битовая емкость памяти

$$C_{2D} = N_1 N_2 = 0,67 A_H A_D \mathcal{E}^2 / \lambda^2 r^2 = 0,67 A_H \mathcal{E}^2 / \lambda^2 F^2, \quad (22)$$

а плотность хранения

$$S_{2D} = 0,67 \mathcal{E}^2 / \lambda^2 F^2, \quad (23)$$

где F — светосила матрицы фотодетекторов, измеренная из точки в плоскости голограммы. Используя, например, значения $\mathcal{E}=0,70$, $\lambda=0,5145$ мкм и $F=4$, получаем $S_{2D}=7,75 \cdot 10^4$ бит/мм². Это значительно меньше теоретического предела $3,78 \cdot 10^6$ бит/мм². Если размеры плоскости голограммы составляют 50×50 мм², то полная емкость используемых выше параметров равна $C_{2D}=2 \cdot 10^8$ бит.

Емкость хранения в голографической памяти может быть значительно увеличена, если использовать объемные материалы для записи голограммы и записывать много голограммных страниц в каждой голограммной плоскости с координатами xy . Если в каждой

плоскости xy среды записано N_3 страниц, то полная емкость трехмерной памяти

$$C_{3D} = N_1 N_2 N_3. \quad (24)$$

Если в каждой плоскости xy накладываются 100 страниц (т. е. $N_3 = 100$), то при значениях параметров, используемых выше, мы получим емкость памяти $C_{3D} = 2 \cdot 10^{10}$ бит. Обозначения N_1 , N_2 и N_3 , принятые выше, будут использованы всюду, и в дальнейшем обсуждении мы будем также использовать принятые выше обозначения N_1 для числа бит на странице, N_2 для числа положений xy голограмм и N_3 для числа страниц в каждом положении xy .

10.1.4.3. Ограничение числа бит на страницу, связанное с шумом фотодетектора

Мощность оптического излучения, дифрагированного на один из фотодиодов или фототранзисторов матрицы фотодетекторов, дается выражением

$$P_d = P_L \tau \eta / N_1, \quad (25)$$

где P_L — мощность лазера, τ — коэффициент пропускания опорного пучка через оптику системы в плоскость голограммы, η — дифракционная эффективность голограммы для случая, когда вся матрица фотодетекторов освещена (страница, состоящая только из единиц), и N_1 — число бит на страницу. Способность к обнаружению D' , необходимая для достижения данного отношения сигнал/шум (ОСШ) на фотодетекторе, записывается в виде

$$D' = (\text{ОСШ}) (\Delta f)^{1/2} / P_d \text{ [Гц}^{1/2} \text{ / Вт]}, \quad (26)$$

где Δf — полоса частот электрического сигнала. Величина, обратная D' при $\Delta f = 1$ Гц, иногда называется эквивалентной мощностью шума. Если увеличить площадь поверхности фотодетектора, то голограммы в голограммной плоскости можно сделать меньшего диаметра, поскольку теперь допустима большая дифракционная расходимость пучка. Однако при увеличении площади детекторных элементов увеличиваются также шум фотодетектора и время нарастания импульса (более медленный отклик). Чтобы скомпенсировать эти ухудшения, требуются большое отношение сигнал/шум и большая полоса частот, а следовательно, и большая способность к обнаружению. Полоса частот является величиной, обратной наименьшему возможному времени произвольной выборки. Из выражений (25) и (26) получаем предельное число бит на страницу:

$$N_1 = P_L \tau \eta D' / (\text{ОСШ}) (\Delta f)^{1/2}. \quad (27)$$

Например, если $P_L = 1$ Вт, $\tau = 0,1$, $\eta = 0,01$, $D' = 10^{12}$ Гц^{1/2}/Вт, ОСШ = 10, $\Delta f = 10^6$ Гц, то предельное число бит на страницу, ограниченное шумом фотодетектора, равно $N_1 = 100\,000$.

10.1.4.4. Ограничение на число адресов xy в голограммной плоскости, накладываемое дефлекторами

В среде для записи голограммы полное число положений голограмм с координатами xy ограничено максимальным углом отклонения Θ и расхождением лазерного пучка $\Delta\theta$. Полное число разрешимых точек в одном измерении дается выражением

$$M = \Theta / \Delta\theta. \quad (28)$$

Обычно максимальные углы отклонения совсем невелики (меньше градуса). Однако если расходимость пучка много меньше, то можно получить большое число разрешимых точек. Эти адресуемые элементы можно увеличить оптическими средствами до размеров, необходимых для заполнения формата любых размеров. Расходимость (полный угол) гауссова пучка, измеренная в радианах, обратно пропорциональна апертуре D дефлектора:

$$\Delta\theta = 4\lambda / \pi D. \quad (29)$$

Например, если $D = 10$ мм и $\lambda = 0,5145$ мкм, угол расходимости (конический) $\Delta\theta$ составляет 0,0655 мрад, или 0,00375°.

Полный угол отклонения Θ (например, для акустооптического дефлектора) дается формулой

$$\Theta = \lambda \Delta f_s / v_s, \quad (30)$$

где Δf_s — максимально возможное для данного дефлектора изменение частоты акустической волны, а v_s — скорость звука в акустооптическом материале. Например, в случае молибдата свинца $v_s = 3,75 \cdot 10^3$ м/с. Если диапазон акустических частот находится в пределах 50—150 МГц, а $\lambda = 0,5145$ мкм, то $\Theta = 13,7$ мрад = 0,786°. В этом случае полное число разрешимых точек в одном измерении будет равно $M = 13,7$ мрад / 0,0655 мрад = 209 точек. Два таких дефлектора, действующих во взаимно перпендикулярных направлениях, дают в двух измерениях M^2 разрешимых точек. Следовательно,

$$N_2 = \pi^2 D^2 \Delta f_s^2 / 16 v_s^2 \quad (31)$$

— это предел числа положений голограмм с координатами xy в среде для записи, определяемой акустооптической системой отклонения пучка в плоскости с координатами xy . Для рассмотренного выше примера мы имеем $N_2 = 209 \times 209 = 43\,681$.

10.1.4.5. Ограничение на число наложенных голограмм, связанное с динамическим диапазоном записи

а. Материалы для записи голограмм, не имеющие потерь, но характеризующиеся некоторым диапазоном изменения показателя преломления. Если в некоторой точке такого материала после $N_{\text{эк}}$ экс-

позиций голограмм все модуляции складываются по фазе таким образом, что используется весь диапазон изменения показателя преломления Δn данной среды, то $N_{zn} n_m = \Delta n / 2$, где n_m — амплитудная модуляция показателя преломления в каждой голограмме. Таким образом, число голограмм в плоскости с координатами xu , ограниченное диапазоном изменения показателя преломления среды, равно

$$N_{zn} = \Delta n / 2 n_m. \quad (32)$$

Если разница в соседних угловых положениях опорного пучка при записи каждой голограммы составляет θ_1 (внутри среды), то из выражения (11) мы имеем

$$n_m = [\arcsin(\eta)^{1/2}] \lambda \cos \theta_1 / \pi d. \quad (33)$$

Следовательно, полное число голограмм N_{zn} , которое можно зарегистрировать в одной плоскости с координатами xu , ограничивается конечным диапазоном записи по показателю преломления следующими величинами:

$$N_{zn} = \begin{cases} d \Delta n / \lambda \cos \theta_1, & \eta = 100\%, \\ 4,88 d \Delta n / \lambda \cos \theta_1, & \eta = 10\%, \\ 15,7 d \Delta n / \lambda \cos \theta_1, & \eta = 1\%, \\ 49,7 d \Delta n / \lambda \cos \theta_1, & \eta = 0,1\%, \\ 157 d \Delta n / \lambda \cos \theta_1, & \eta = 0,01\%. \end{cases} \quad (34) \quad (35) \quad (36) \quad (37) \quad (38)$$

Например, если $d=2$ мм, $\Delta n=10^{-3}$, $\lambda=0,5145$ мкм, $\eta=0,01$, $\theta_0=45^\circ$ (вне среды) и $n=2,00$, то $\theta_1 = \arcsin[(\sin \theta_0)/n] = 20,7^\circ$, а $N_{zn}=65$.

6. Чисто поглощающие материалы для записи. Если в некоторой точке такого материала после N_{za} экспозиций голограмм все модуляции складываются по фазе таким образом, что целиком используется имеющийся диапазон поглощения $\Delta \alpha$ среды для записи, то $N_{za} \alpha_m = \Delta \alpha / 2$, где α_m — модуляция поглощения для каждой голограммы. Таким образом, число голограмм из-за конечного диапазона записи по поглощению ограничивается величиной

$$N_{za} = \Delta \alpha / 2 \alpha_m. \quad (39)$$

Когда диапазон записи используется полностью, средний коэффициент поглощения α равен $\Delta \alpha / 2$. Следовательно,

$$N_{za} = \alpha / \alpha_m. \quad (40)$$

Оптимальное значение α не зависит от величины α_m . Оно равно [22]

$$\alpha = (\ln 3) (\cos \theta_1) / d. \quad (41)$$

Можно показать, что максимально достижимая для некоторого значения α_m дифракционная эффективность определяется выраже-

нием

$$\eta = (3/\sqrt{3} \ln 3)^{-2} \alpha_m^2 d^2 / \cos^2 \theta_1. \quad (42)$$

Таким образом, выражения (40) — (42) дают полное число голограмм N_{za} , которые можно записать в одном и том же положении с координатами xu :

$$N_{za} = 1/3 (3\eta)^{1/2}. \quad (43)$$

Предельно большое значение дифракционной эффективности, равное $\eta=3,7\%$, достигается при $N_{za}=1$. Таким образом, полное число голограмм N_{za} , ограниченное конечным диапазоном записи по поглощению, имеет следующие значения:

$$N_{za} = \begin{cases} 1, & \eta = 3,7\%, \\ 2, & \eta = 0,93\%, \\ 3, & \eta = 0,41\%, \\ 6,09, & \eta = 0,10\%, \\ 19,2, & \eta = 0,01\%. \end{cases} \quad (44) \quad (45) \quad (46) \quad (47) \quad (48)$$

Используя те же значения параметров, что и в рассмотренном выше примере записи по показателю преломления ($\eta=0,01$), получаем $N_{za}=1,92$, в то время как для фазовых голограмм мы имеем $N_{zn}=65$.

10.1.4.6. Ограничение на число наложенных голограмм, связанное с угловой селективностью

В системе оптической голографической памяти опорный пучок удобнее располагать в одной плоскости (как это показано на рис. 4—7). Угловая ширина (полная ширина по углу на уровне половины мощности) для опорного пучка, измеренная вне регистрирующей среды, записывается в виде

$$\Delta \varphi = A n L / d, \quad (49)$$

где n — средний показатель преломления материала, L — период решетки, а d — толщина голограммы. Число A называют коэффициентом угловой селективности [9].

а. Материалы для записи без потерь с определенным диапазоном изменения показателя преломления. В этом случае

$$A = 0,886 - 0,799 \text{ при } \eta = 0 - 100\%, \quad (50)$$

что соответствует увеличению n_1 от 0 до $\lambda \cos \theta_1 / 2d$.

б. Чисто поглощающие материалы для записи. В этом случае

$$A = 0,886 - 0,895 \text{ при } \eta = 0 - 3,7\%, \quad (51)$$

что соответствует увеличению α , от 0 до $\ln 3 \cos \theta_1/d$. Используемые диапазоны n_1 и α (и соответственно вышеприведенные диапазоны η) перекрывают большинство ситуаций, реализуемых на практике. Если диапазон углов опорного пучка вне материала для записи равен Φ , то полное число голограмм $N_{зас}$, которое можно записать в одном положении с координатами xu , не превышает значения $N_{зас} = \Phi/\Delta\varphi = \Phi d/\Delta n L$. (52)

Например, если для материала с записью по показателю преломления $\Phi=30^\circ$, $d=2$ мм, $\lambda=0,5145$ мкм, $\eta=0,01$, $\theta_0=45^\circ$ (вне среды) и $n=2,00$, то $L=\lambda/2 \sin \theta_0=364$ нм, а $A=0,886$. Таким образом, $N_{зас}=1624$.

10.1.4.7. Ограничение на число наложенных голограмм, вызванное взаимодействием соседних голограмм из-за случайного характера регистрируемой информации

В случае объемной суперпозиции информационных голограмм в некотором положении с координатами xu из-за дифракции света на голограммах статистический фоновый шум оказывается иным, чем в случае восстановления одной голограммы. Это явление связано со случайной природой информационных данных, регистрируемых в голографическом виде. В пучок света, дифрагированный на одной из голограмм, вносится вклад, хотя и небольшой, в среднем от каждой из остальных голограмм. Можно показать [29], что, для того чтобы при считывании получить данное отношение сигнал/шум (ОСШ), число наложенных голограмм в одном положении с координатами xu в материале ограничено величиной

$$N_{зс} = d/4\lambda (\text{ОСШ})^2, \quad (53)$$

обусловленной взаимодействием между страницами записанной информации. Например, если $d=2$ мм, $\lambda=0,5145$ мкм и если необходимо получить ОСШ=5, то в каждом положении можно записать 39 страниц.

10.1.4.8. Число наложенных голограмм, ограниченное влиянием зернистости регистрирующей среды

В фоточувствительных материалах для записи голограммы микроскопические элементы, реагирующие на свет (например, легирующие атомы), в общем случае распределены случайным образом. Запись голограммы осуществляется при сложении отдельных эффектов от каждого из этих элементов. Исходя из рассмотрения процесса записи как микроскопического процесса, можно видеть, что в каждом объеме $(\lambda/2n)^3$ для каждой записываемой

страницы должен быть по крайней мере один фоточувствительный элемент. Таким образом можно установить уровень абсолютного минимума концентрации фоточувствительных элементов. Наоборот, для данной концентрации этих элементов полное число голографически наложенных страниц в одном положении из-за наличия зернистости не может превышать величину

$$N_{зг} = c\lambda^3/8n^3. \quad (54)$$

Например, если $c=10^{15}$ мм⁻³, $\lambda=0,5145$ мкм и $n=2,0$, то максимальное число страниц $N_{зг}=2128$.

10.1.5. Некоторые системы оптической памяти, выпускаемые промышленностью

Возможным показателем того, насколько высокого технического уровня достигла разработка данного прибора, является наличие различных вариантов этого прибора на рынке. В табл. 3

Таблица 3

Некоторые коммерческие системы оптической памяти

Фирма	Модель	Применение лазера	Применение голографии	Наличие немеханического управления	Год начала производства
"IBM"	1360 (система хранения больших цифровых массивов)	Нет	Нет	Нет	1966
"Precision Instrument"	690-212 Unicon (большая лазерная система памяти)	Да	»	»	1971
"Optical Data Systems"	Holoscan	»	Да	»	1972
"3M Company"	Megafetch (система обработки данных)	»	»	Да	1974

перечислены некоторые наиболее известные системы оптической памяти, производимые промышленностью США.

Оптическая цифровая система хранения больших массивов информации фирмы «IBM» (модель 1360) была разработана в 1966 г. В этой системе для записи на специальную фотопленку размерами 35×70 мм используются электронные пучки. Каждый отрезок фотопленки имеет емкость $5 \cdot 10^6$ бит. Тридцать две фотопленки составляют ячейку, причем одна полная система памяти включает в себя 7000 ячеек внутреннего запоминающего устройства. Выборка этих 10^{12} бит осуществляется с помощью пневматической

транспортной системы. Из-за наличия механических движущихся частей время произвольной выборки этой системы памяти составляет около 100 с.

Лазерная большая система памяти модели 690-212 Unicon, разработанная фирмой "Precision Instrument", представляет собой последовательную высокеемкую систему оптической памяти с емкостью хранения $7 \cdot 10^{11}$ бит [12]. Сфокусированный луч аргонового лазера испаряет родий с небольшого участка (круг диаметром 1,5 мкм) полиэфирной информационной ленты, имеющей покрытие. На каждой такой ленте размером 794×121 мм можно записать 13 600 информационных следов, расположенных на расстоянии 7,5 мкм друг от друга. Время произвольной выборки в такой системе оптической памяти составляет около 7 с. Информация хранится постоянно, и стереть ее с ленты невозможно. Записанная информация фактически застрахована от разрушения, что обеспечивает фактор безопасности для данного типа архивного хранения и тем отличает ее от соответствующих магнитных систем.

Система Holoscap фирмы "Optical Data Systems" представляет собой голографическую систему считывания цифровых данных [36]. Она используется для кредитных карточек и проверки чеков. В 35-миллиметровой кассете на отбеленной пленке могут в голографической форме храниться до $1,2 \cdot 10^7$ бит. Механическая система управления позволяет проверить все голограммы примерно за 2 с. Запись голограмм производится устройством, которое является целиком автономным. Ограниченные емкость этой системы и время выборки вполне соответствуют тем требованиям, которые к ней предъявлялись для конкретного применения.

Система Megafetch фирмы "3M Company" — первая серийная голографическая оптическая система памяти с немеханическим управлением [35]. В ней устройство памяти является также лишь считываемым, а голографическая информация записывается на фотопластинки с помощью отдельного устройства. Каждая фотопластинка включает в себя матрицу из 1024×1024 голограмм. Полная емкость системы $5 \cdot 10^7$ бит. Применение единственного полупроводникового лазера с накачкой электронным лучом позволяет осуществлять выборку голограммы за 10 мкс. Эта система полностью совместима с ЭВМ. Скорость обработки данных в ней достигает $1,5 \cdot 10^7$ бит/с.

10.1.6. Параллельная цифровая обработка в системах памяти [10]

В таких непрерывно изменяемых средах для записи голограммы, как электрооптические кристаллы или непроявленная фотопленка, можно осуществить серию экспозиций голограмм в одном положении. В этом случае направления объектного и опор-

ного пучков по отношению к голограмме сохраняются неизменными. При многократных экспозициях происходит сложение и вычитание комплексных амплитуд голографической записи [8]. Сдвиг фазы опорного пучка на 180° можно использовать для когерентного селективного стирания голограмм в комплекте наложенных трехмерных голограмм, записанных в самопроявляющемся кристалле ниобата лития [17]. Авторы работы [17] обратили внимание на то, что этот процесс эквивалентен операции булевой логики ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ. Эта операция производится параллельно между каждым битом одной страницы данных и соответствующим битом другой страницы данных. В данном случае на странице имелось приблизительно 10 000 бит и, следовательно, параллельно осуществлялось 10 000 операций. В работе [17] было также показано, что происходит обращение контраста (это эквивалентно логической операции ДОПОЛНЕНИЕ). Позднее к операциям булевой логики, осуществляемым на страницах цифровых данных, записанных голографически, добавилась операция ИЛИ [18].

В булевой алгебре сочетания одной функции подобия (например, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ) и одной функции единственности (например, ИЛИ) достаточно для образования всех других логических операций (И, ДОПОЛНЕНИЕ, НЕ И, НЕ ИЛИ, СОВПАДЕНИЕ). Определения этих операций приводятся в табл. 4. На-

Таблица 4

Определения операций булевой логики

Вход		Выход						
A	B	ДОПОЛНЕНИЕ	ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ	ИЛИ	НЕ ИЛИ	И	НЕ И	СОВПАДЕНИЕ
0	0	1	0	0	1	0	1	1
0	1	1	1	1	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1	0	1

личие таких операций позволяет производить обобщенную обработку (например, сложение и вычитание n -битных слов). Если использовать только три основные операции, упомянутые выше (ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, ДОПОЛНЕНИЕ и ИЛИ), то при этом в значительной степени усложняется обобщенная логическая обработка. Добавление булевой логической операции И, вообще говоря, существенно упрощает обработку. Для множества страниц входных данных операция И становится возможной, если составители страниц последовательно накладываются друг на друга, образуя сандвич. Положения каждого бита ориентированы относительно положений соответствующих битов других составителей

страниц. Таким образом, если какая-либо страница в месте расположения определенного бита непроницаема для света, то свет в этом адресуемом положении не пройдет через сложный составитель страниц. После записи восстановленная страница данных в

Таблица 5

Булевы логические операции, осуществимые между двумя страницами цифровых данных *A* и *B* в один шаг с использованием двухлучевой голографической схемы и фазовой среды для записи голограмм (темные участки соответствуют 0, светлые — 1)

В составителе страниц	В среде для записи голограмм	Изменение фазы опорного пучка относительно фазы <i>B</i> , град	Операция в плоскости считывания
<i>A, B</i>	—	—	И (<i>AB</i>)
<i>A</i>	<i>B</i>	0	ИЛИ (<i>A + B</i>)
<i>A</i>	<i>B</i>	180	ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (<i>A ⊕ B</i>)
1	<i>B</i>	180	ДОПОЛНЕНИЕ (<i>B</i>)

этом месте окажется темной. Восстановленная страница будет светлой только в том адресуемом положении, для которого все отдельные составители страниц прозрачны. Приписывая темным

Таблица 6

Соответствие логических операций при изменении определений логического нуля и логической единицы

0 — темно	0 — светло
1 — светло	1 — темно
И	→ ИЛИ
ИЛИ	→ И
ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ	→ СОВПАДЕНИЕ
ДОПОЛНЕНИЕ	→ ДОПОЛНЕНИЕ

местам нули, а светлым единицы, можно видеть, что при голографической записи сложный составитель страниц осуществляет логическую операцию И. Поскольку такой процесс можно осуществить за один шаг, операция И, а также операции ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, ДОПОЛНЕНИЕ и ИЛИ, являются основными доступными операциями при голографической обработке информации. В табл. 5 представлены основные логические

операции и их одношаговые исполнения.

Во всех рассмотренных выше случаях предполагалось, что при восстановлении отсутствие света в адресуемом положении соответствует логическому нулю, а присутствие — логической единице. Следовательно, на составителе страниц непрозрачное адресуемое

положение также соответствует нулю, а прозрачное — единице. Эти определения, однако, являются произвольными. Интерпретация единиц и нулей может быть и обратной. При обратном определении меняются логические операции. В табл. 6 показано соответствие логических операций при обоих определениях. При этом, хотя каждая операция в отдельности изменяется, общая вычислительная способность в обоих случаях остается одной и той же.

Ранее основное внимание уделялось обработке цифровых данных с голографической записью и последующим считыванием в непрерывно изменяемой фоточувствительной среде. Были продемонстрированы также некоторые логические операции между страницами данных без непрерывной голографической записи. Например, операция сравнения ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ может быть осуществлена с использованием предварительно записанной постоянной голограммы на тестовой странице. Если искомая согласованная страница находится в составителе страниц и при этом фаза опорного пучка сдвинута на 180° по отношению к фазе при записи тестовой страницы, а амплитуды равны, то для прошедшей объектной волны можно получить нулевой результат (темный участок, или логический нуль). Этот принцип используется в интегрированном оптическом компараторе Баттелла (см., например, статью Кенана и др. [20]). В этом интегрированном оптическом приборе на основе ниобата лития две управляемые волны интерферируют в фоточувствительной области, легированной железом, в результате чего записывается, а затем фиксируется (из-за процессов миграции ионов) голограмма. Один из управляемых волновых фронтов уже претерпел дифракцию на распределении показателя преломления, созданном последовательностью поверхностных электродов. После того как записана и зафиксирована тестовая голограмма, на последовательность электродов можно наложить другой сигнал. При соответствующей амплитуде опорного пучка и сдвиге его фазы на 180° относительно фазы при записи нуля на выходе получается только при совпадении входного сигнала и сигнала, использованного при исходной записи. Применяя регистратор нуля, на выходе получим сигнал только в случае, когда исследуемые данные согласованы с предварительно записанным сигналом. На рис. 10 показана схема другого прибора такого типа. В этой системе канал двоичных данных непрерывно исследует сегменты *m*-битовых слов, которые путем осуществления операции ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ сравниваются с *n* словами, заранее записанными на основной голограмме Фурье. Амплитуду опорного пучка необходимо все время регулировать в соответствии с пропуском слова по ходу составителя страниц. Если слово на входе системы соответствует любому из записанных ранее слов, то на выходе появляется нуль для любых адресных положений этого слова в

выходной плоскости. Цилиндрическая линза, находящаяся за изображением, полученным после операции ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, фокусирует его на цепочку из детекторов. Нуль на выходе любого детектора указывает на то, что все биты соответствующего слова представляют собой логические нули (темно=0), и, таким

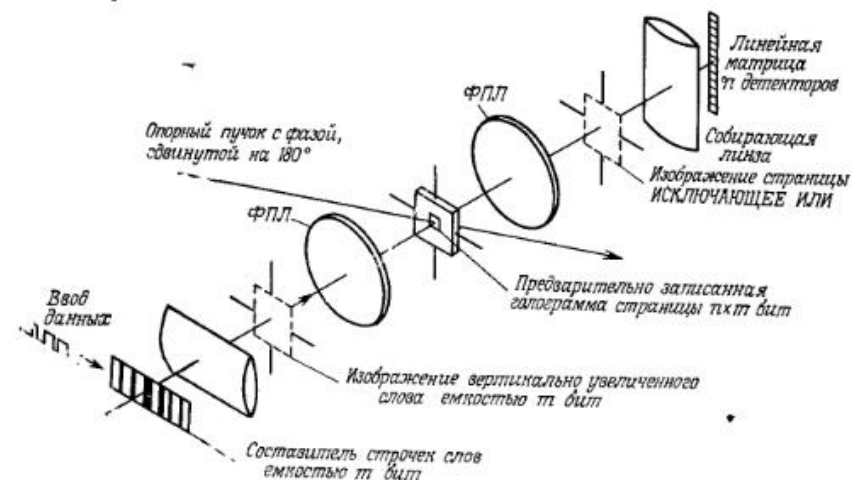


Рис. 10. Двойная система обнаружения слов, использующая операцию ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ.

образом, на странице обнаружено соответствующее слово. Следовательно, сравнение, или ассоциативный поиск, осуществляется без записи слова на исследуемую страницу. Более того, результаты параллельной логической операции не регистрируются и при дальнейшей обработке. Этот последний случай имеет место, когда требуется осуществление последовательности операций, например арифметических (сложение, вычитание, умножение, деление).

Нами были описаны различные операции голографической обработки с точки зрения цифровой логики и страниц двоичных данных. Те же самые операции могут быть выполнены и на страницах двумерных аналоговых данных (например, изображений). При этом совершаются те же операции, но они уже не двоичные, а линейные (с динамическим диапазоном, равным динамическому диапазону материала). Страницы аналоговых и цифровых данных можно совместно хранить записанными на одном электрооптическом кристалле.

Описанная выше обработка данных является строго параллельной. Вместо использования схем логических затворов, как в электронной логике, все логические операции выполнены внутри памяти (запоминающий кристалл) в одной и той же оптической системе. Логические операции произвольной сложности можно синтезиро-

вать таким же способом, как и в электронном цифровом устройстве (используя метод составления страниц Карно и т. п.). И хотя в принципе выполнимы и общие арифметические операции, однако они все же играют второстепенную роль по сравнению с параллельными ассоциативными операциями, такими, как поиск данных (последовательные и параллельные битовые операции поиска), детектирование изменений, определение наилучшего соответствия деталей, корреляция и распознавание образов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aagard R. L., Lee T. C., Chen D., Appl. Opt., **11**, 2133—2139 (1972).
2. Amodei J. J., Staebler D. L., RCA Rev., **33**, 71—93 (1972).
3. Anderson L. K., Bell Lab. Rec., **46**, 318—325 (1968).
4. Assour J. M., Lohman R. D., RCA Rev., **30**, 557—566 (1969).
5. Cosentino L. S., Stewart W. C., RCA Rev., **34**, 45—79 (1973).
6. D'Auria L., Huignard J. P., Slezak C., Spitz E., Appl. Opt., **13**, 808—818 (1974).
7. Drake M. D. Appl. Opt., **13**, 347—352 (1974).
8. Gabor D., Stroke G. W., Restrick R., Funkhouser A., Brumm D., Phys. Lett., **18**, 116—118 (1965).
9. Gaylord T. K., Tittel F. K., J. Appl. Phys., **44**, 4771—4773 (1973).
10. Gaylord T. K., Magnusson R., Weaver J. E., Opt. Commun., **20**, 365, 366 (1977).
11. Graf P., Lang M., Appl. Opt., **11**, 1382—1388 (1972).
12. Gray E. E., IEEE Trans. Magn., **MAG-8**, 416—420 (1972).
13. Haskal H., Chen D., Laser Appl., **3**, 135—230 (1977).
14. Hill B., Appl. Opt., **11**, 182—191 (1972).
15. Hill B., Schmidt K. P., Appl. Opt., **12**, 1193—1198 (1973).
16. Hill B., Adv. Holography, **3**, 1—251 (1976).
17. Huignard J. P., Herriau J. P., Micheron F., Appl. Phys. Lett., **26**, 256—258 (1975).
18. Huignard J. P., Herriau J. P., Micheron F., Rouchon J. M., IEEE J. Quantum Electron., **QE-11**, 8D—9D (1975).
19. Huignard J. P., Micheron F., Spitz E., Optical Properties of Solids, **16**, 851—925 (1976).
20. Kenan R. P., Vahey D. W., Hartman N. F., Wood V. E., Verber C. M., Opt. Eng., **15**, 12—16 (1976).
21. Kiemle H., Appl. Opt., **13**, 803—807 (1974).
22. Kogelnik H., Bell Syst. Tech. J., **48**, 2909—2947 (1969).
23. Labrunie G., Robert J., Borel J., Appl. Opt., **13**, 1355—1358 (1974).
24. LaMacchia J. T., Laser Focus, **6**, 35—39 (1970).
25. Mend W. G., McCoy E. E., Anders R. A., IEEE J. Solid-State Circuits, **SC-5**, 254—260 (1970).
26. Meyer H., Riekman D., Schmidt K. P., Schmidt U. J., Rahlff M., Schroeder E., Thust W., Appl. Opt., **11**, 1732—1736 (1972).
27. Rajchman J. A., J. Appl. Phys., **41**, 1376—1383 (1970).
28. Rajchman J. A., Appl. Opt., **9**, 2269—2271 (1970).
29. Ramberg E. G., RCA Rev., **33**, 5—53 (1972).
30. Roberts H. N., Appl. Opt., **11**, 397—404 (1972).
31. Smits F. M., Gallaher L. E., Bell Syst. Tech. J., **46**, 1267—1278 (1967).
32. Staebler D. L., Burke W. J., Phillips W., Amodei J. J., Appl. Phys. Lett., **26**, 182—184 (1975).
33. Stewart W. C., Cosentino L. S., Appl. Opt., **9**, 2271—2275 (1970).
34. Stewart W. C., Mezrich R. S., Cosentino L. S., Nagle E. M., Wendt F. S., Lohman R. D., RCA Rev., **34**, 3—44 (1973).

35. Strehlow W. H., Dennison R. L., Packard J. R., J. Opt. Soc. Amer., **64**, 543—544 (1974).
36. Sutherlin K. K., Lauer J. P., Olenik R. W., Appl. Opt., **13**, 1345—1354 (1974).
37. Tsukamoto K., Ishii A., Ishida A., Sumi M., Uchida N., Appl. Opt., **13**, 869—874 (1974).
38. Uchida T., Furukawa M., Kitano I., Koizumi K., Matsumura H., IEEE J. Quantum Electron., **QE-6**, 606—612 (1970).
39. Vander Lugt A., Appl. Opt., **12**, 1675—1685 (1973).
40. Vander Lugt A., в кн.: "Optical Information Processing" (eds. Y. E. Nesterikhin, G. W. Stone, W. E. Kock), Plenum, New York, 1976, p. 347—368.
41. Van Heerden P. J., Appl. Opt., **2**, 393—400 (1963).
42. Zook J. D., Appl. Opt., **13**, 875—887 (1974).

10.2. ДВУМЕРНЫЕ ДИСПЛЕИ

Б. Клей

10.2.1. Введение

Последние достижения голографии можно применять для изготовления дисплеев с проекцией двумерного изображения, в результате чего можно добиться некоторых преимуществ по сравнению с широко используемыми методами проекции с фотографической пленки.

К числу главных преимуществ голографических дисплеев относятся значительно более высокая яркость изображения, исключительно большая долговечность хранимого голографического изображения и меньшая стоимость копий. Другими достоинствами по сравнению с фотографией, связанными с использованием голографии, являются простота обработки, очень надежные средства восстановления, независимость колориметрии от фотосовместимых красителей и снижение входной мощности при данном значении яркости в случае негативных голограмм.

Мы опишем ряд методов, которые позволяют получить такие преимущества. В некоторых (но не во всех) типах дисплеев размер устройства, использующего голограммы, несколько больше, чем размер его фотографического аналога. Это связано с необходимостью внеосевого освещения в считывающем устройстве, работающем на ненулевом дифракционном порядке.

Поскольку для изготовления дисплеев подходит множество типов голограмм с различными характеристиками, в разд. 10.2.3 дается обзор свойств голограмм, которые выгодно использовать в дисплеях.

10.2.2. Оптимальные характеристики дисплеев

Ниже представлено обсуждение оптимальных характеристик дисплеев. Этот материал можно использовать как справочный при определении параметров, подходящих для данного применения.

10.2.2.1. Качество изображения

а. Разрешение и яркость. В большинстве случаев наблюдателю нужно, чтобы рассматриваемое им изображение обладало хорошей резкостью. Его реакция на изображение зависит главным образом от воспринимаемой резкости, размера (углового), яркости, контраста, яркости окружения и шумов. Все эти факторы взаимодействуют друг с другом и с трудом поддаются количественной оценке.

Для того чтобы установить точные критерии для изготовления дисплеев, необходимо сформулировать математическую модель системы человек — дисплей. Эту задачу решали Мезрих и др. [12]. Чтобы

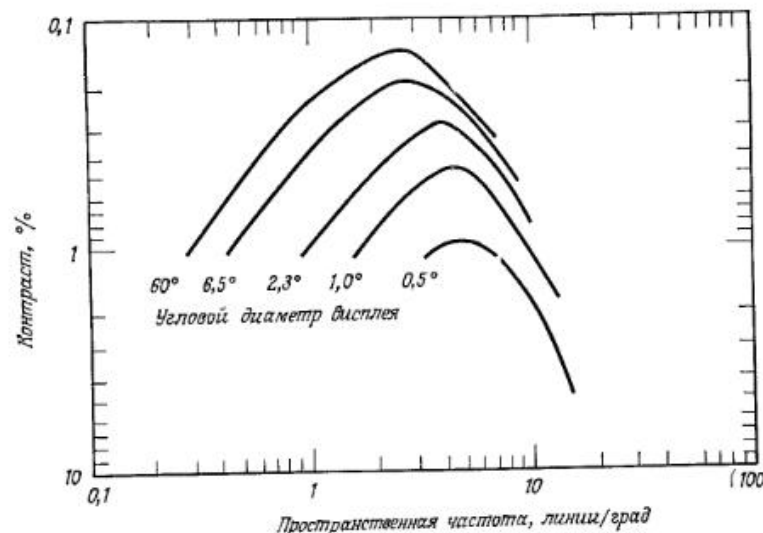


Рис. 1. Пороговая контрастная чувствительность для синусоидальных функций интенсивности при различных значениях углового размера дисплея. Яркость на экране дисплея 1070 кд/м^2 , а яркость рассеянного окружающего света $\sim 107 \text{ кд/м}^2$.

осуществить модель и получить необходимую информацию, они предложили соответствующий механизм описания изображений и проделали необходимые психофизиологические измерения. Мезрих и др. провели очень большую работу и выполнили подробные исследования; эту работу следует иметь в виду в любой серьезной разработке дисплеев. Разработчик дисплеев должен учитывать геометрию системы дисплей — наблюдатель, поскольку на воспринимаемое разрешение влияют как размеры дисплея, так и яркость.

Например, авторы работы [12] показали наличие контролируемого влияния размеров дисплея на контрастную чувствительность (рис. 1) и влияние яркости дисплея на пороговый контраст (рис. 2).

Для получения оптимальной конструкции дисплея необходимо рассмотреть эти факторы наряду с влиянием типа оптической системы (т. е. голографической или обычной).

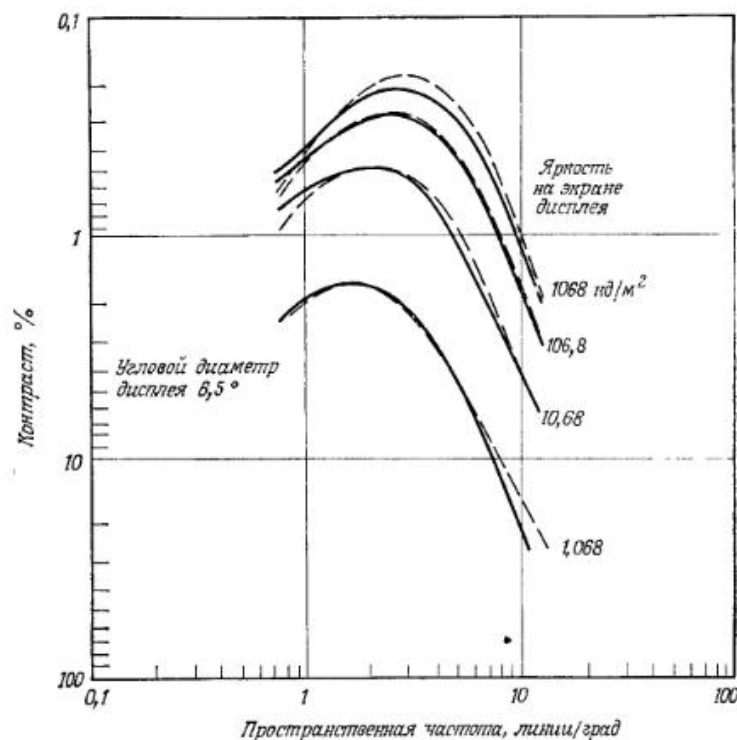


Рис. 2. Пороговая контрастная чувствительность для одно- и двумерных синусоидальных решеток интенсивности при различных значениях яркости экрана дисплея (яркость окружающего света в 10 раз меньше яркости экрана дисплея). Штриховые кривые — средние значения для одномерной решетки при $\theta=0^\circ$ и 90° ; сплошные кривые для двумерной решетки при $\theta=0^\circ$.

б. Цвет. Для многих целей вполне удовлетворительными являются дисплеи, информация в которых содержится лишь в освещенности, однако добавление цвета, несомненно, приведет к улучшению характеристик устройства по следующим причинам:

1. Для среды с высокой плотностью представления информации наблюдатель может усвоить данное количество информации быстрее с цветовым кодированием, чем без него. Исследования, выполненные Смитом [13], показали, что при выполнении задания поиска и подсчета буквенно-цифровых и малых векторных символов, представленных на черно-белом дисплее, с одной стороны, и на дисплее с цветовым кодированием пятью цветами, с другой, наблюдатели более

эффективно справлялись со своей задачей в случае, когда использовался цвет.

2. При наличии цветового кодирования выполнение вышеописанного задания сопровождается значительно меньшим числом ошибок.

3. При заданной ошибке отклонение от точности воспроизведения было значительно меньше при поиске и подсчете, когда использовалось цветовое кодирование.

в. Фон. Вообще говоря, дисплеи оказываются весьма полезными при работе в обстановке, характеризуемой широким диапазоном фоновой засветки. Если рабочее помещение является довольно темным, то ограничение контраста изображения, проецируемого с транспаранта, имеющего определенный диапазон плотности, будет определяться главным образом внутренним рассеянием проектора и качеством линз. Однако если в рабочей комнате имеется сильная фоновая засветка, то приходится сталкиваться с более серьезными проблемами. Когда свет в комнате засвечивает проекционную систему, контраст изображения ухудшается. Участки изображения, которые должны быть черными, становятся серыми, поскольку рассеянный комнатный свет попадает на проекционный экран в поле зрения наблюдателя. Контраст определяется выражением

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где I_{\min} — интенсивность света от двух источников, один из которых дает свет, проецируемый с самых темных участков объекта, а второй является фоновым светом, рассеянным с экрана в поле зрения наблюдателя; I_{\max} — свет, проецируемый с областей объекта, обладающих максимальной прозрачностью.

Если можно пренебречь внутренним рассеянием в проекторе и если рабочее помещение совершенно затемнено, то контраст

$$C_d = \frac{I_{\max} - 0}{I_{\min} + 0} = 1,$$

т. е. контраст изображения равен контрасту объекта. С другой стороны, если эффективный коэффициент отражения от экрана равен 0,1, а фоновая засветка на экране равна 1000 нит, то от экрана отразится свет 100 нит. Считая, что комната действует как протяженный источник света, приходим к выводу, что большая часть этого света попадет в поле зрения наблюдателя, и, следовательно, $I_{\min} = 100$ нит. Чтобы иметь контраст 90%, необходимо, чтобы I_{\max} на экране было бы порядка 2000 нит.

Если засветка увеличивается, скажем, до 10 000 нит, что характерно для тени в солнечный день на улице, то первоначальный контраст уменьшается до 33,3% с соответствующими потерями градаций.

Оптимальный дисплей должен передавать наблюдателю высококонтрастное изображение, даже если засветка настолько велика, насколько можно предполагать. Как мы увидим ниже, решить эту задачу позволяет применение фазовых голограмм, с помощью которых можно получить значительную яркость. Кроме того, диффузное отражение от экрана можно уменьшить, используя специальные методы, например применяя зеркальные чечевицеобразные поверхности с просветляющим покрытием, в отличие от более часто используемых диффузных поверхностей.

10.2.2.2. Требование к качеству среды для записи голограммы

а. Информационная плотность. Существенное влияние на различные параметры дисплея может оказать выбранная среда для записи голограмм. Для большинства оптимальных универсальных дисплеев среда должна хранить информацию как в виде цвета, так и в виде освещенности и иметь хорошую линейность в широком динамическом диапазоне. Кроме того, она должна быть малозумящей и при этом иметь высокое разрешение, чтобы большой массив информации занимал как можно меньший объем. Голограммы можно хранить в незернистых прозрачных средах, которые непригодны для использования в фотографии. Некоторые из этих материалов имеют очень высокое разрешение; примером может служить фоторезист Shipley AZ 1350 [1].

б. Долговечность хранения. Среда для записи голограммы должна быть устойчива к механическим воздействиям, влажности, нагреванию, падающему свету, многократным изгибам и атмосферным загрязнениям, вызывающим коррозию. В идеальном случае с течением времени не должно стираться изображение и не должна меняться прозрачность подложки. Когда требуется архивная память, особо важное значение приобретает цветовая стабильность. Красители, используемые в фотографических материалах, под действием яркого света и тепла выцветают. Голограммы же могут хранить информацию просто в виде разностей длин оптических путей, и, следовательно, как цветовая информация, так и информация, заключенная в освещенности, остаются стабильными. В разд. 10.2.3 рассмотрен ряд таких материалов.

в. Стоимость. Суммарная стоимость складывается из стоимостей материала основы, процесса изготовления среды, а также химического проявления и обработки. Поскольку в рассматриваемом случае широко используются фотографические пленки, стоимость остальных материалов мы будем сравнивать со стоимостью готовых фото-

графических транспарантов. Голографический способ записи позволяет несколько снизить стоимость; этот вопрос обсуждается в разд. 10.2.3.

10.2.2.3. Простота использования

Очевидно, что оптимальный дисплей — это такой дисплей, при работе с которым возникает минимальное число нерешенных проблем.

а. Глубина резкости. Одной из больших неприятностей, возникающих при работе, например, с проекторами стандартных микрофильмов, является чувствительность к настройке на фокус. Эти приборы должны быть тщательно сфокусированы, в противном случае качество изображений серьезно ухудшается. Во многих случаях требуемые пределы регулировки фокуса несовместимы с механическими пределами регулировки в лентопротяжном механизме. Проблема связана с тем, чтобы иметь возможность получать достаточно яркое изображение с транспаранта небольших размеров. Если увеличивать яркость источника света, то соответственно будет возрастать яркость изображения, но это приведет к тому, что пленка должна будет модулировать большие плотности светового потока. Процесс модуляции зависит от поглощения света на пленке. При поглощении световая энергия в эмульсии переходит в тепловую. Даже если использовать фильтр с целью подавления инфракрасных составляющих излучения проекционного источника света, из-за эндотермического превращения энергии температура пленки должна возрастать. В предельном случае количество света, падающего на пленку, должно быть меньше, чем требуется для ее термического разрушения. Следовательно, яркость изображений, воспроизводимых с пленок, модулирующих свет поглощением, ограничена значением оптического увеличения и относительного отверстия линзы. Стремление к малым относительным отверстиям, чтобы получать более высокую яркость, неизбежно приводит к уменьшению глубины резкости и, следовательно, создает невыполнимые требования к системе.

Очевидным решением этой проблемы является применение такого способа модуляции света, в котором не используется поглощение. Фазовые голограммы модулируют свет благодаря дифракции — процессу, который не влечет за собой нагревание. Следовательно, при этом можно безопасно пропускать чрезвычайно большие потоки падающего света. За счет возросшей яркости можно увеличить глубину резкости путем увеличения относительного отверстия проекционной линзы; следовательно, система становится более удобной в эксплуатации. Этот принцип можно применить не только к микрофильмовым системам, но также и к другим проекционным дисплеям.

б. Восстановление. Нередки случаи, когда в системах отображения с большим количеством хранимой информации требуется система восстановления. Каждый кадр кодируется распознающим числом в форме кода, считываемого на ЭВМ. Это позволяет управлять системой поиска с помощью электрического сигнала.

Плотность информации, которая достигается при использовании бинарной битовой матрицы, обычно выше, чем в случае применения других схем распознавания. Гologрафическая запись этого кода дает максимальную избыточность информации в отведенной для нее площади, так что случайное повреждение или даже вырезание существенной части площади голографического кадра не влечет за собой стирания информации. Как показано в разд. 10.2.5, дополнительные преимущества обусловлены выбором подходящего типа голограммы.

10.2.2.4. Эксплуатационные свойства

а. Надежность. Общая надежность дисплея зависит от таких факторов, как ресурс источника света, время памяти регистрирующей среды, а также сложность и число компонентов дисплея.

Голографическая система считывания имеет определенные преимущества в смысле надежности над обычными пленочными проекционными системами, если голограммы выполнены на твердой пластичной пленке и если считывание происходит с помощью лампы накаливания, а не лазера.

б. Размеры. В зависимости от типа используемых голограмм дисплей может иметь те же размеры, что и аналогичный пленочный проектор.

в. Потребление мощности. Для дисплея могут быть выбраны различные типы голограмм. Они определяют вид и схему используемого источника света. В качестве источников света для считывания используются лазеры, фильтруемые дуговые лампы и лампы накаливания; однако если необходимо минимизировать входную мощность, потребляемую системой, то надо выбирать такой тип голограмм, который можно считывать светом ксеноновой лампы высокого давления или лампы накаливания. В п. 10.2.4.2 описывается метод голограмм нулевого дифракционного порядка, который дает более яркое изображение, чем обычный цветной слайд при том же увеличении и той же входной мощности. Обстоятельства, рассмотренные в разд. 10.2.3, позволяют реализовать другие оптимальные параметры системы.

10.2.3. Типы голограмм, используемых в дисплеях

10.2.3.1. Классификация

Голограммы можно классифицировать в соответствии со структурой их интерференционных полос, а именно по внутренней морфологии среды для записи голограмм и по конфигурации полос, создан-

ных оптической системой записи. Классификация по внутренней морфологии среды связана с влиянием ее параметров и приводит к обширному обобщенным категориям поверхностных, объемных, поглощающих (или амплитудных) и фазовых голограмм. Классификация по конфигурации интерференционных полос определяется очертаниями дифракционной картины, а также ее расположением в плоскости записи.

а. Форма полос дифракции в двух измерениях. Голограммы Френеля. Эти голограммы получаются в результате интерференции между опорным пучком и дифракционной картиной ближнего поля объекта (преобразование Френеля). Из каждой точки объекта на голограмму направляется волновой фронт, радиус кривизны которого определяется расстоянием голограммы до объекта. Полученная суперпозиция интерференционных картин напоминает картину, наблюдаемую на зонной пластинке Френеля. Поскольку в каждой точке картины полос наблюдается градиент частоты, разрешение среды для записи голограммы используется не полностью, а из-за искривления полос их нельзя использовать для цветокодирования. При восстановлении приходится применять монохроматические источники света.

Голограммы Фраунгофера. Эти голограммы получаются при интерференции плоского опорного пучка с дифракционными картинками дальнего поля объекта. (Голограммы Фурье представляют собой частный случай голограмм Фраунгофера, когда плоскость записи находится в задней фокальной плоскости записывающей линзы, так что постоянная составляющая находится в начале координат.) Поскольку интерферирующие волновые фронты плоские, полосы представляют собой прямые линии. Это свойство позволяет полностью использовать разрешение среды, а также, как будет показано в разд. 10.2.4, представляет интерес для цветокодирования. Восстанавливающий источник должен быть монохроматическим.

Голограммы сфокусированного изображения. Эти голограммы в зависимости от схемы устройства записи могут быть записаны с прямыми или кривыми фоновыми полосами. Изображение объекта формируется на поверхности голограммы с помощью линзы или другой голограммы; если опорный волновой фронт плоский, то полосы будут искривлены, но если опорный волновой фронт имеет ту же кривизну, что и фоновая составляющая объекта, полосы будут прямыми. Восстанавливающий источник не обязательно должен быть монохроматическим; возможно цветокодирование. В данном случае плотность хранения в среде для записи используется оптимальным образом.

б. Форма полос в трех измерениях. Дальнейшая классификация приводит к тому, что все приведенные выше категории помещаются в группу либо тонких (двумерных), либо толстых (трехмерных, или объемных) голограмм. Это отличие соответствует тому, осуществляется ли модуляция на большое или малое расстояние по сравнению с пространственным периодом решетки. Голограммы Брэгга относятся ко второй категории. Структура полос здесь такова, что они действуют как встроенный узкополосный фильтр и их можно считать в белом свете. Эффективность на определенной длине волны может быть очень высокой, но яркость цветного изображения, полученная от источника белого света, мала из-за узости полосы пропускания решетки, играющей роль фильтра.

в. Влияние свойств среды для записи голограмм.

ПОГЛОЩАЮЩИЕ СРЕДЫ. Модуляция в голограммах, записанных на поглощающих средах (таких, как фотографические эмульсии), осуществляется за счет поглощения света, причем максимальная дифракционная эффективность таких голограмм менее 10%. На рис. 3 при-

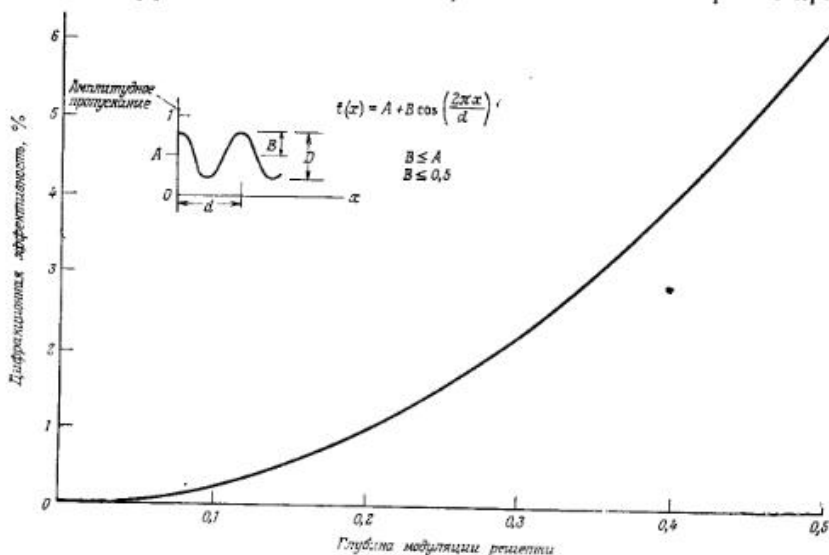


Рис. 3. Дифракционная эффективность в первом порядке для поглощающей синусоидальной решетки.

ведена зависимость дифракционной эффективности поглощающей голограммы от глубины модуляции решетки. Поскольку процесс поглощения преобразует свет в тепло, интенсивность падающего света неизбежно ограничивается ростом температуры среды для записи. Поэтому яркость восстановленного изображения ограничена

эффективностью решетки и интенсивностью падающего света, которая зависит от ухудшения качества среды, вызванного повышением температуры.

ФАЗОВЫЕ СРЕДЫ. Фазовые голограммы в принципе прозрачны; модуляция падающего света происходит на локальных разностях фаз. Процесс этот по своей природе более эффективный, чем модуляция поглощением. На рис. 4 показана зависимость дифракционной эффективности в первом порядке от глубины модуляции. Поскольку

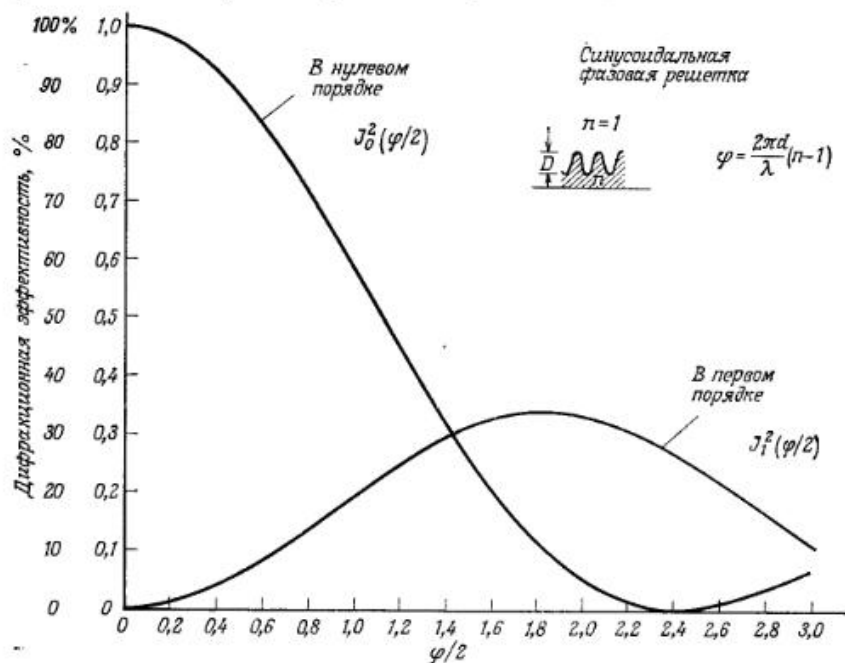


Рис. 4. Дифракционная эффективность синусоидальной фазовой решетки в первом и нулевом порядках.

интенсивность восстанавливающего пучка не ограничена преобразованием света в тепло внутри среды, использование фазовых голограмм позволяет добиться при одном и том же увеличении более ярких восстановленных изображений по сравнению с обычной фотопленкой, слайдами или поглощательными голограммами.

Дифракция света на синусоидальной фазовой решетке, обусловленная периодическими изменениями длины оптического пути, может быть связана либо с местными изменениями показателя преломления, либо непосредственно с изменениями длины оптического пути, либо с тем и другим одновременно.

Модуляция показателя преломления. Максимальная теоретическая эффективность как для толстых пропускающих голограмм, так и для толстых отражательных голограмм (Брэгга) равна 100%. Однако в действительности добиться эффективности 100% довольно трудно. Если среда для записи голограмм представляет собой галогенидосеребряный материал (отбеленный), то зернистая структура модулирующих участков рассеивает свет из-за своей дискретности, что влечет за собой некоторое снижение дифракционной эффективности.

Этот эффект можно свести к минимуму, используя тонкие эмульсии типа Eastman Kodak 649F и Agfa — Gevaert 10E75. Значения экспозиции при длине волны света 633 нм для первой пленки составляют около 1100 эрг/см², а для второй — 20 эрг/см². Максимальное разрешение этих материалов, равное примерно 2000 линий/мм, делает их удобными для очень многих голографических применений. После проявления, фиксации и отбеливания в этих материалах возникает не только модуляция показателя преломления, но и небольшой рельеф поверхности. Однако преобладающим модуляционным эффектом остается изменение показателя преломления.

Другим материалом с модуляцией показателя преломления является бихромированная желатина. С помощью специальной обработки на ней можно получить также и поверхностную модуляцию [11].

Для записи трехмерных голограмм обычно используют пять видов материалов: отбеленный галогенид серебра, бихромированную желатину, фотополимеры, фотохромные материалы и сегнетоэлектрики. Голограммы, записанные на любом из этих материалов, имеют ограничения по применению в практических системах отображения. Эти ограничения зависят от чувствительности, длительности хранения изображения [14] и возможности получения копий или от комбинаций этих факторов.

Трехмерные голограммы не приспособлены для копирования: для получения тиража необходимо в достаточном количестве изготовить отдельные голограммы. Это стоит дорого. В зависимости от используемых материалов трехмерные голограммы могут иметь ограниченное время хранения.

Модуляция поверхности. Необходимость получения копий записанных голограмм обычно легко удовлетворяется выбором среды, модуляция в которой главным образом или полностью является свойством поверхности.

Копия рельефа поверхности может быть выполнена гальваническим нанесением никеля (после создания проводящего покрытия на поверхности) толщиной в несколько тысячных долей дюйма (примерно 100 мкм) на поверхностную голограмму с последующим отделением голограммы от никеля и использованием никелевой пластины для тиражирования рельефа на кусках пластмассы. Этот процесс

аналогичен процессу производства грампластинок, где модуляция осуществляется канавками, нарезанными на лакированной поверхности. Этот лакированный диск покрывается проводящим покрытием, например серебром из раствора, а затем на него гальваническим путем наносится слой никеля необходимой толщины. Полученная матрица используется для прессовки множества поливиниловых дисков. Копии голограмм, сделанные таким способом, имеют превосходное качество [4].

Существует несколько материалов для записи голограмм с модуляцией поверхности — это галогенидосеребряные эмульсии, бихромированная желатина, фоторезисты, а также многослойные структуры фотопроводник — термопластик. В галогенидосеребряных эмульсиях можно получать модуляцию как в объеме, так и на поверхности; однако поверхностный эффект оказывается более слабым и малопригоден для тиражирования. Голограммы же на бихромированной желатине являются обычно трехмерными; Мейерхофер [11] получил голограммы, использующие поверхностный рельеф с глубиной, пригодной для копирования. При низких частотах (~300 линий/мм) профиль решетки близок к прямоугольному. При частоте 500 линий/мм и экспозиции 100 мДж/см² в случае, когда $\lambda=441,6$ нм, формируется решетка с дифракционной эффективностью, равной 26%; однако с ростом частоты чувствительность в среднем падает и дифракционная эффективность оказывается меньше; например, для получения 200 линий/мм требуется 400 мДж/см², причем дифракционная эффективность равна всего лишь 2,4%.

Голограммы на структурах термопластик — фотопроводник проявляют поверхностную модуляцию, однако они малопригодны для копирования, и поэтому мы их больше рассматривать не будем.

Очень удобным регистрирующим материалом для копирования голограмм является фоторезист. В частности, позитивный материал Shipley AZ 1350 имеет низкий уровень шумов, высокое разрешение, хорошую чувствительность и с химической точки зрения пригоден для гальванического нанесения никеля. Шум зернистости и фоторезиста отсутствует, поскольку фоточувствительная реакция

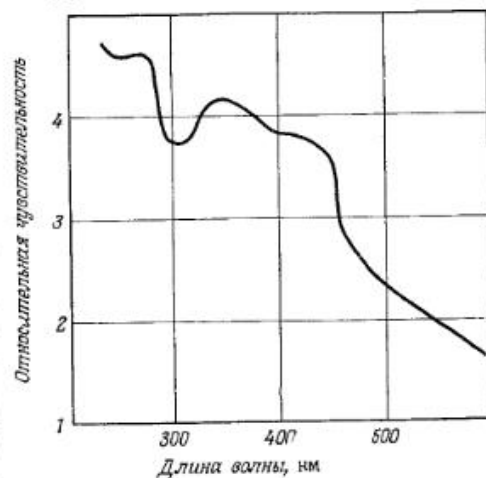


Рис. 5. Изменение относительной чувствительности фоторезистора AZ 1350 с длиной волны.

основана на взаимодействии молекулярных доменов (а не на нанесении кристаллов серебра). По той же причине фоторезисты имеют более высокое разрешение, чем галогенидосеребряные эмульсии.

Максимум чувствительности фоторезистов соответствует синему участку спектра (рис. 5). В качестве источника света удобно использовать линию излучения He—Cd-лазера с длиной волны 441,6 нм. На этой длине волны чувствительность оказывается равной примерно 10 мДж/см². Можно также использовать линию излучения аргонового лазера с длиной волны 488 нм, но при этом требуется удвоенная экспозиция.

Экспонирование светом приводит к тому, что материал становится более растворимым в проявителе по сравнению с неэкспонированным.

Фоторезисты обычно разрабатываются с целью использования их для селективного маскирования поверхности с последующим травлением. Наклон экспозиционной характеристики при этом должен быть очень большим (аналогично высокому коэффициенту γ в случае галогенидосеребряных эмульсий).

Однако в большинстве голографических применений требуется значительно меньший наклон. В конкретных случаях наклон можно регулировать, меняя состав проявителя и подбирая соответствующую экспозицию.

10.2.3.2. Выбор типа голограммы

Согласно критериям, сформулированным в разд. 10.2.2, тип голограммы, выбираемый для дисплея, должен удовлетворять следующим условиям:

1. Источник белого света при эффективной широкополосной фильтрации должен давать яркое изображение в полном цвете. Такому условию удовлетворяют голограммы сфокусированного изображения, позволяющие получать интерференционную картину с прямыми полосами [см. пп. 10.2.4.1(а)]. Выбранная голограмма может быть либо позитивной, т. е. использующей для формирования изображения первый дифракционный порядок, либо негативной, или использующей нулевой дифракционный порядок.

2. Изготовление копий длительного пользования должно быть экономически выгодным. Записанные методом модуляции поверхности голограммы сфокусированного изображения позволяют изготавливать копии с помощью прессовки.

3. Плотность хранения информации должна быть высокой. Применение высокоразрешающего фоторезиста позволяет записать дифракционную картину с очень высокой пространственной частотой полос — порядка 2000 линий/мм и выше.

4. Стоимость копий должна быть невысокой. Дешевые копии (примерно в 100 раз дешевле копий цветных фильмов) получают благодаря невысокой стоимости процессов прессовки и обработки,

чего не скажешь о галогенидосеребряных материалах. Химическая обработка галогенидосеребряных материалов состоит из пяти этапов и по крайней мере из четырех влажных процессов: проявление, мойка, фиксация, снова мойка и нейтрализация, а также сушка (при отбеливании требуется большее количество процедур). Простой является обработка фоторезистов; здесь используются три процесса, два из которых относятся к влажным процессам: проявление, мойка и сушка. Полное время обработки фоторезиста незначительно. Время проявления составляет примерно 30 с, время мойки — 2 с, а сушка сжатым воздухом длится около 1 с.

Более короткое время обработки фоторезиста частично связано с тем, что желатиновая основа галогенидосеребряного материала и лаковая основа фоторезиста по-разному поглощают воду; первая из них гидрофильна, а вторая — нет.

Материалы, предназначенные для получения отпечатков голограмм прессовкой, должны становиться мягкими при нагревании уже задолго до температуры, при которой происходит их разложение, чтобы избежать необходимости специального контроля за материалом во время производства копий. При температурах и давлениях ниже критических хорошо проявляют себя в роли основ фотопленок прозрачный поливинилкарбазол (ПВК) и поликарбонат¹.

Полиэфирные фотопленки (такие, как Kropag и Estar) практически невозможно использовать для штамповки голограмм, поскольку их температура текучести почти равна температуре разложения материала.

Хотя эти материалы имеют хорошие оптические свойства, необходимо проверить, каковы их прочность, водопоглощение, термостабильность и устойчивость к механическим воздействиям.

Поликарбонатная пленка является очень прочной, весьма незначительно поглощает воду, устойчива к механическим воздействиям и, стало быть, пригодна для прессовки оттисков. Кроме того, по сравнению с ПВК она имеет более широкий температурный диапазон хранения информации.

10.2.4. Применение голограмм сфокусированного изображения, записанных на рельефе поверхности

Этот мобильный тип голограмм допускает различные методы записи и считывания. Он позволяет получать как позитивные, так и негативные цветные системы, а также использовать схемы кодирования изменяющимся цветом.

¹ Пленка ПВК прессуется при температуре 120°C и давлении 420±10% атм, поликарбонатная пленка прессуется при температуре 150°C и давлении 720±10% атм; время прессовки не должно превышать 5 с.

10.2.4.1. Позитивная запись и восстановление

Гетерохромные цветные изображения с голограмм, записанных на рельефе поверхности, можно получить, применяя сложение цветов. По сравнению с процессом вычитания этот процесс дает гораздо больший диапазон цветов.

На рис. 6 показана цветовая диаграмма МКО (Международной комиссии по освещению), определяющая положение различных цветов в координатах визуального отклика. Эта диаграмма позволя-

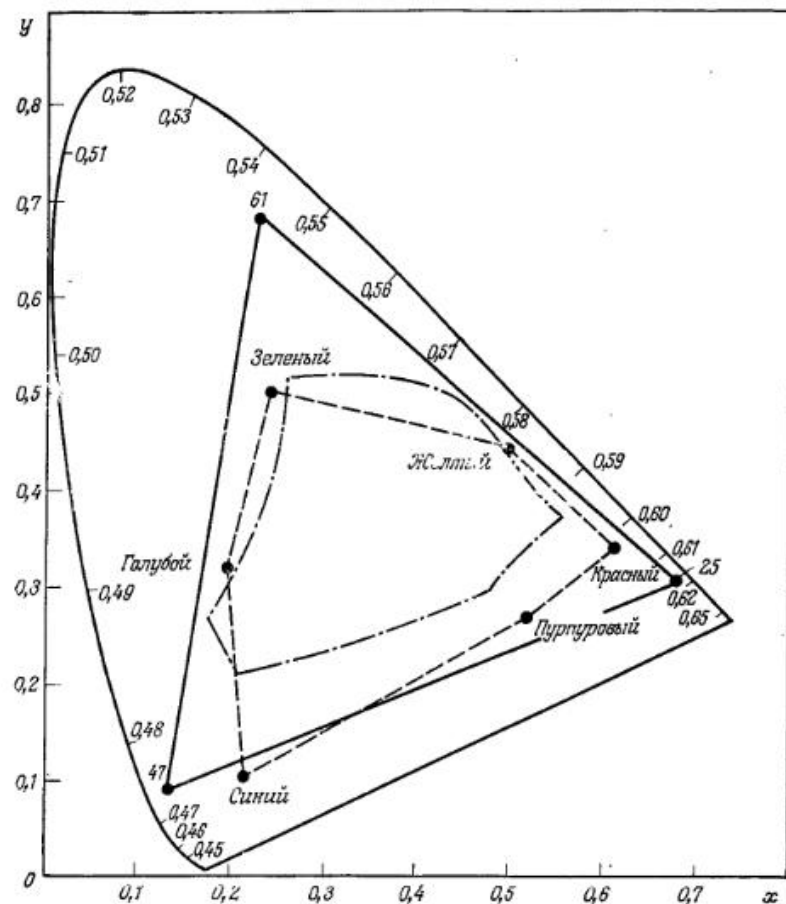


Рис. 6. Цветовая диаграмма МКО, показывающая, какие цвета можно получить при смешивании первичных цветов. Сплошной линией ограничена площадь, перекрываемая фильтрами Wrattan 47, 61 и 25; штрих-пунктирной линией ограничена площадь, занимаемая всеми известными полиграфическими красками, и штриховой линией — площадь, занимаемая цветами в нулевом дифракционном порядке.

ет определить конкретную смесь первичных цветов, необходимую для получения данного цвета. Площадь, ограниченная спектральным локусом (положением цветов чистого спектра) и прямой линией, соединяющей крайние красную и синюю точки, включает в себя все видимые цвета.

Наиболее распространенный пример получения изображения путем сложения первичных цветов — это цветное телевидение. Первичные цвета здесь выбраны так, чтобы получить наибольший объем воспроизводимых цветов (наибольшую площадь, заключенную в треугольнике, вершины которого определяются первичными координатами красного, зеленого и синего цветов). Однако в действительности достижимые в телевидении цвета определяются характеристиками фильтров, применяемых в телекамере, и люминофором, нанесенным на экран приемной телевизионной трубки.

Первичные цвета для голографии можно выбрать таким образом, чтобы они располагались к локусу по крайней мере столь же близко, как и в цветном телевидении, а при необходимости и непосредственно на локусе. В первом случае для каждого первичного цвета используются широкополосные фильтры, а во втором — узкополосные интерференционные фильтры.

Сложение цветов можно осуществить голографическим методом, записывая суперпозицию трех голограмм. Каждая из этих трех голограмм имеет компоненту освещенности объекта, полученную благодаря фильтрации спектральной функцией пропускания соответствующего первичного цвета. Например, транспаранты разделения трех цветов при записи цветного изображения выполняются на черно-белой пленке.

Транспаранты разделения трех цветов, используемые при записи голограмм как объекты, обычно изготавливаются путем экспонирования фотопленки цветным изображением через соответствующий набор трех фильтров первичных цветов. Это может в процесс записи голограммы внести нелинейность пленки, что повлечет за собой искажение цвета в окончательной записи.

Исправить такое положение можно следующим образом:

- 1) не следует выходить за пределы линейного участка кривой Хюртера — Дриффелда (H&D), однако это может привести к уменьшению динамического диапазона;
- 2) выполнить преобразование аналоговой информации на пленке в цифровую методом полутонного растривания (однако при этом, если шаг раstra не слишком мал по сравнению с элементом разрешения, может возникнуть муар);
- 3) применять коррекции с помощью полиграфических развертывателей.

В последнем случае цветной оригинал оптически считывается и его изображение преобразуется в электрические сигналы, которые затем подвергаются электронной обработке. С помощью микро-ЭВМ

осуществляются запрограммированные гамма-коррекция, расширение или сжатие диапазона плотности и другие виды коррекции. Благодаря широким возможностям этого метода можно также скорректировать в обработанных данных собственные нелинейности голограммы. Эти данные подаются затем на модулятор света, который создает на фотографической пленке изображение путем сканирования синхронно со считыванием оригинала. Такие развертыватели дают набор из четырех и более разделенных по цвету изображений, поскольку в полиграфии используются четыре и более красок для печати, однако для голографической записи их требуется только три. При записи каждое из трех разделенных по цвету изображений последовательно регистрируется на отдельном голографическом кадре.

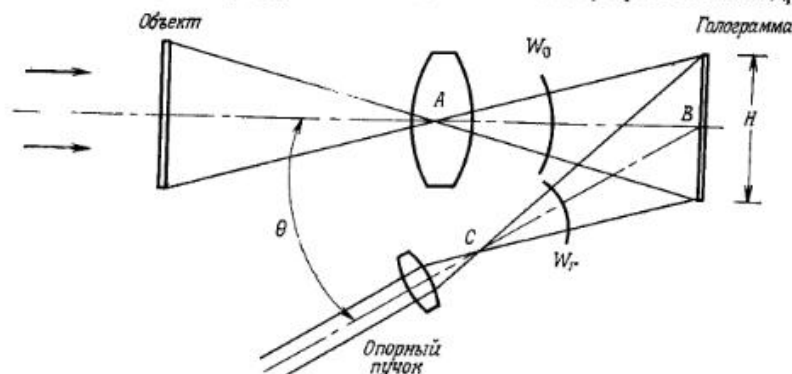


Рис. 7. Геометрия схемы записи с целью получения квазилинейных полос на голограммах сфокусированного изображения.

С помощью голограммы сфокусированного изображения можно получить требуемую линейную структуру полос методом, схема которого иллюстрируется на рис. 7. Важным условием получения прямых полос с постоянной частотой следования является одинаковая кривизна волновых фронтов объектного и опорного пучков (более подробно об этом см. в § 4.3, т. 1). Объектный волновой фронт W_0 определяется радиусом AB , где A — точка пересечения оси со второй главной плоскостью, в которой расположена линза, а B — точка на голограмме.

Кривизна опорного волнового фронта W_r определяется отрезком CB . Когда $CB = AB$, кривизны обоих волновых фронтов одинаковы; в случае $CB \gg H$ полосы являются в достаточной мере прямыми и при малых значениях угла θ имеют практически постоянную частоту следования. Фактически кривизна полос, обусловленная более высокими значениями отношения H к AB , и градиент частоты следования полос, возникающий при углах падения опорного пучка, близких к 30° , могут быть хорошо считаны при значениях H до 20 мм и более и $AB \approx 150$ мм [4].

Характеристики этой картины интерференционных полос позволяют осуществить запись трех разделенных по цвету изображений объектов на один кадр таким образом, что становится возможным считывание объекта при помощи относительно простой аппаратуры.

а. Цветокodирование. Мы опишем три метода, позволяющие идентифицировать первичные цвета, выделенные из записи трех наложенных голограмм; два из этих методов применимы к позитивному процессу сложения цветов, а третий пригоден для негативного процесса вычитания цветов. В первых двух случаях наложение первичных картин полос снижает общую дифракционную эффективность до значений, меньших, чем те, которые достигаются в случае отдельной картины полос.

Если друг на друга наложены три картины полос, то интенсивность считывающего света от каждой составляющей можно оценить при следующих предположениях:

- 1) каждая компонента имеет одну и ту же дифракционную эффективность в первом порядке;
- 2) существенную роль играют лишь составляющие первого порядка;
- 3) любой из восстанавливающих источников имеет одну и ту же интенсивность I .

На рис. 8 показаны три наложенные друг на друга дифракционные решетки G_1 , G_2 и G_3 и три первичных источника I_1 , I_2 и I_3 , свет от которых падает на решетки под углами θ_1 , θ_2 и θ_3 соответственно. Пусть каждая решетка имеет дифракционные эффективности

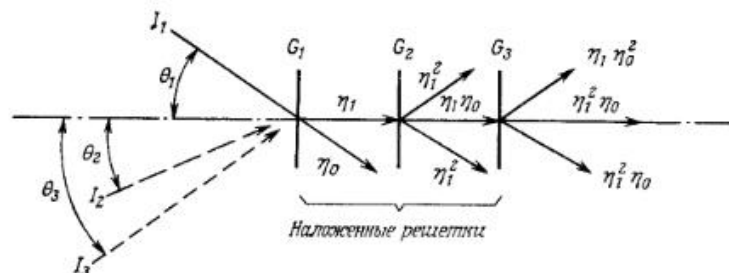


Рис. 8. Вклады, даваемые наложенными друг на друга дифракционными решетками при использовании трех считывающих пучков.

в первом и нулевом порядках соответственно η_1 и η_0 . Интенсивность света, дифрагированного вдоль оси считывания от решетки G_1 , равна $\eta_1 I_1$. Для простоты будем считать $I_1 = I_2 = I_3 = 1$. Если имеется только одна решетка, то яркость изображения будет равна η_1 ; однако когда присутствуют остальные две решетки, то на каждой из них свет дифрагирует так, как показано на рис. 8, и яркость

изображения от решетки G_1 уменьшается. Член первого порядка от G_1 действует как член нулевого порядка от G_2 и G_3 .

Свет, дифрагированный на G_1 в первом порядке, нормально падает на решетку G_2 , на которой дифрагирует в два первых порядка (η_1^2) и в нулевой порядок ($\eta_0\eta_1$). Решетка G_3 вызывает дальнейшие потери, поскольку на ней образуются еще два первых порядка ($\eta_1^2\eta_0$), а вклад в изображение от первой решетки G_1 определяется нулевым порядком ($\eta_0^2\eta_1$).

Свет от остальных двух считывающих источников (I_2 и I_3), падающий под углами θ_2 и θ_3 , подвергается тем же изменениям при прохождении этих решеток, т. е. свет I_2 дифрагирует на решетке G_2 , причем свет в первом дифракционном порядке η_1 распространяется вдоль оси. Этот свет падает на решетки G_1 и G_3 под прямым углом, и каждая из них отбирает часть интенсивности света, образующего изображение. В табл. 1 показано, как влияют на изображение

Таблица 1

Вклады в изображение от решеток и считывающих источников

Вклад только от одной первичной решетки ($I_{G_1} = I_{\eta_1}$)	Потери света на первичной решетке ($I_{G_1} = I_{\eta_0}$)	Частичный вклад		Суммарный вклад	
		от двух первичных решеток ($I_{G_2} = I_1, \eta_0\eta_1$)	от трех первичных решеток ($I_{G_3} = I_1, \eta_0^2\eta_1$)	от двух решеток* ($\sum_2 I = 2I_{G_2}$)	от трех решеток** ($\sum_3 I = 3I_{G_3}$)
0,300	0,303	0,0909	0,027	0,1818	0,081
0,250	0,444	0,111	0,049	0,222	0,147
0,200	0,572	0,114	0,065	0,228	0,195
0,150	0,685	0,103	0,0704	0,206	0,2112
0,100	0,794	0,0794	0,063	0,159	0,189

* Дают дополнительные цвета; желтый, голубой и пурпуровый.

** Дают белый свет.

различные значения η_1 и вклады каждой решетки в наложенное изображение. Соответствующие результаты приведены также на рис. 9. Нетрудно видеть, что для получения максимальной яркости изображения необходимо, чтобы эффективность трехкомпонентной голограммы составляла около 21%. При этом вклад в изображение от любой составляющей равен вкладу от всех трех составляющих; однако если участок голограммы содержит лишь две первичные составляющие, то соответствующая часть восстановленного изображения будет примерно на 10% ярче, чем области, имеющие одну или три первичные составляющие. Таким образом, красный, синий и зеленый цвета дают белый свет той же интенсивности, но цвета, составленные из двух первичных, например желтый, голубой и пурпуровый, будут несколько ярче, чем белый.

Рассмотренные приближения позволяют определять голографическую экспозицию для каждой первичной составляющей. Можно также выполнить подробный анализ с использованием точных выражений, однако сложность вычислений может оказаться неоправданной с точки зрения получения дополнительной точности,

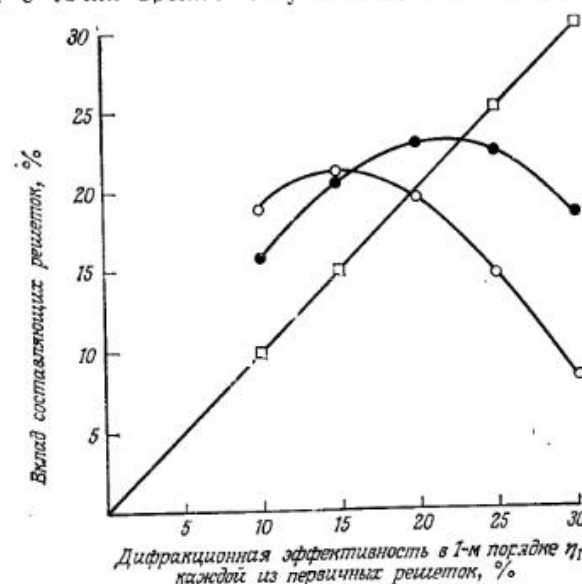


Рис. 9. Сумма вкладов в изображение от каждой из наложенных первичных решеток и от каждого считывающего источника. □ — одиночная решетка; ● — двухкомпонентная решетка; ○ — трехкомпонентная решетка.

поскольку на погрешность записывающей аппаратуры влияют различные другие факторы, требующие проверки и калибровки аппаратуры. К этим факторам относятся изменения коэффициента отражения зеркал со временем, а также некоторая разъюстировка, носящая случайный характер и вызывающая различия в интенсивностях света для различных дифракционных порядков.

6. Кодирование пространственной частотой. При кодировании пространственной частотой каждая из первичных цветных голограмм идентифицируется по присущей только ей пространственной частоте полос. Как видно из рис. 10, частота полос для каждой первичной голограммы изменяется с изменением угла падения опорного пучка при экспонировании в каждом цвете. Опорные пучки падают на голограмму под углами θ_1 , θ_2 и θ_3 , которые выбираются из условия совместимости со считывающим устройством. На рис. 11 показана одна из схем считывания, разработанная Гейлом и Кнопом [7].

Голограмма освещается светом двух внеосевых пучков, исходящих из кварцевой лампы с галогенным циклом, допускающей использование простой и малогабаритной конденсорной оптики. Внеосевые пучки формируются отражающими поверхностями S_1

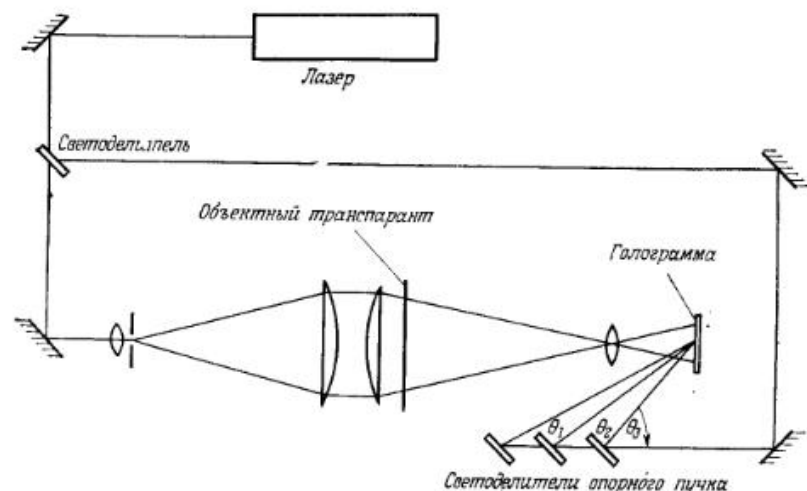


Рис. 10. Запись голограммы сфокусированного изображения при кодировании пространственной частоты.

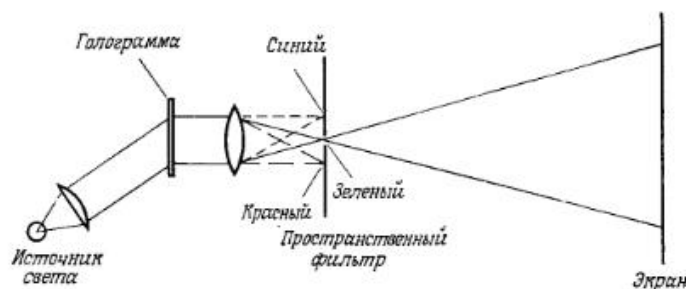


Рис. 11. Считывание голограмм в случае кодирования изображения пространственной частотой в одном из трех цветов.

и S_2 , которые могут принадлежать набору призм или отражаться плоским зеркалом. Поскольку дифракционные полосы составляющих голограмм параллельны, процесс дифракции, обеспечивающий цветное изображение, может быть ограничен одной плоскостью; следовательно, отражающие поверхности должны направлять считывающий свет в эту плоскость; апертура может представлять собой щель, а нить накаливания лампы — прямую линию.

Коллимированные составляющие светового пучка освещают голограмму под углом θ . Свет, дифрагированный решеткой в первый порядок, проходит через проекционную линзу, которая формирует изображение на экране. Пространственный фильтр (щель) в фокальной плоскости линзы отсекает лишний свет. Составляющими этого света являются высшие дифракционные порядки, а также первые дифракционные порядки, не связанные с первичным цветом составляющей голограммы, подлежащей считыванию.

Одна из составляющих пучка, идущая по оптическому пути считывания под углом θ_B , освещает синюю составляющую решетку. Для того чтобы синий свет попал в щель, угол дифракции должен выбираться из условия, чтобы пространственная частота решетки $\nu_B = (\sin \theta_B) / \lambda_B$. Щель имеет достаточную ширину и пропускает необходимую полосу синих длин волн на экран.

Зеленая составляющая записывалась при угле дифракции θ_G , соответствующем пространственной частоте ν_G , которая при считывании обеспечивает распространение зеленой компоненты падающего белого света вдоль проекционной оси, проходящей через центр щели. Опять ширина щели такова, что она позволяет зеленому свету в данной полосе длин волн попасть на экран, тогда как остальные цвета блокируются. Красная составляющая объекта записывается при наименьшем угле опорного пучка, что соответствует картине интерференционных полос с наименьшей пространственной частотой, так что при считывании экрана достигнут лишь красные составляющие белого восстанавливающего пучка. Следует заметить, что при очень небольшой ширине щели в изображении воспроизводится наиболее широкая гамма цветов, но за счет яркости на экране. В действительности полоса пропускания для каждого из первичных цветов может быть достаточно широкой при хорошей яркости и удовлетворительном цвете. В частности, ширина полосы первичных цветов, используемая в цветном телевидении, является хорошим компромиссом между цветовой насыщенностью и яркостью. Если транспаранты цветоразделенных изображений выполнены путем последовательного фотографирования цветного изображения через фильтры Wratten 25, 58 и 47B, то полученная ширина полосы пропускания вполне удовлетворительна. Для того чтобы получить высокую точность цветопередачи в восстановленном изображении, первичные составляющие необходимо подвергнуть маскированию либо методом, используемым в полиграфии для корректировки всей гаммы цветов, либо методом электронного сканирования цветного оригинала сцены, прошедшего электронную обработку с целью корректировки отдельных цветовых составляющих.

Интересной особенностью этой системы является то, что изображение с составной голограммы можно наблюдать либо в цветном, либо в черно-белом вариантах с помощью простого изменения

ширины щели. При наиболее узкой щели достигается наивысшая насыщенность цвета, а если щель приоткрыть, то насыщенность уменьшается; при широкой щели можно получить черно-белое изображение.

в. Угловое кодирование. В другом методе кодирования трех первичных цветовых составляющих используется угловая ориентация полос в образуемых ими картинах дифракции [3]. Для любой из трех составляющих угол падения опорного пучка определяется различными ограничениями, накладываемыми системой, такими, например, как оптимальное использование среды для записи голограммы; иными словами, пространственную частоту можно выбрать так, чтобы она лежала вблизи максимума модуляционной передаточной функции (МПФ), а также удобством расположения источников считывающего света в малогабаритной системе.

Для сравнения отметим, что кодирование пространственной частотой требует параллельного расположения полос трех составляющих, а это заставляет располагать источники считывающего света в одной плоскости. Отсюда следует, что фактически можно использовать одну или две лампы, но не более. С другой стороны, при наличии трех меридиональных плоскостей, возникающих при угловом кодировании, нужно использовать по паре ламп на плоскость

Разделение источников света для каждого первичного цвета позволяет оптимизировать эффективность ансамбля свет — конденсор — фильтр для любого конкретного цвета. Наоборот, при кодировании пространственной частотой оптимальные условия получаются в том случае, когда щель имеет различную ширину для каждого цвета, но поскольку в системе имеется лишь одна щель, то, добившись оптимизации для одного цвета, мы не получим оптимума для двух других; при этом мы проигрываем либо в яркости, либо в цветопередаче.

Другое преимущество углового кодирования перед частотным — это отсутствие муара, возникающего из-за биений пространственных частот, соответствующих первичным цветам, и ограничивающего разрешение. Недостатками углового кодирования являются дороговизна и сложность работы с тремя считывающими источниками света.

На рис. 12 приведена схема записи в случае углового кодирования. Лазерный пучок светоделителем S разделяется на опорный и объектный пучки (рис. 12, а). Объектный пучок фокусируется линзой L_1 в месте расположения пространственного фильтра SF , после которого расходящийся пучок попадает на конденсорную пару L_2L_3 .

На плоской поверхности линзы L_3 находится объект, который представляет собой транспарант с записанным на нем изображе-

нием в одном из разделенных цветов. Линза L_3 фокусирует падающий свет, который после отражения от зеркала M_3 проходит через линзу L_4 , формирующую изображение на голограмме H . Опорный пучок после отражения от зеркал проходит через линзу L_4 , в фокальной плоскости которой установлена точечная диафрагма.

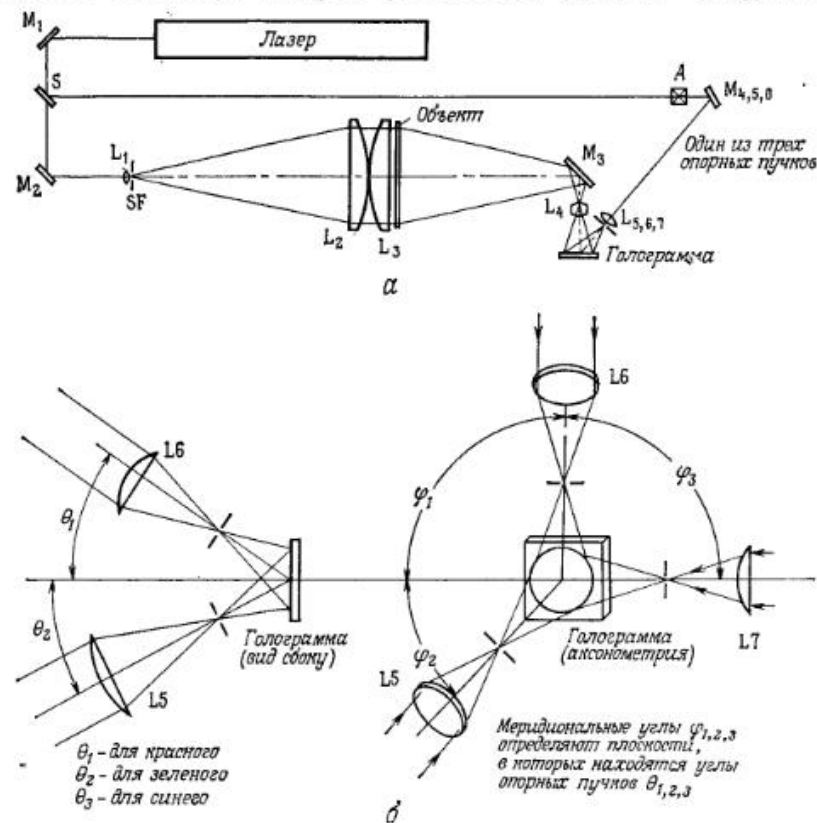


Рис. 12. Запись голограмм сфокусированного изображения в случае углового кодирования. а — показан путь одного из трех опорных пучков; б — положения опорных пучков в соответствующих меридиональных плоскостях.

Она расположена таким образом, что расстояние от нее до голограммы равно расстоянию от второго фокуса линзы L_3 , формирующей изображение, до голограммы.

При этом с целью получения достаточно прямых полос кривизна волнового фронта опорного пучка согласуется с первоначальной кривизной волнового фронта объектного пучка. Опорный пучок разделяется блоком светоделителя A на три части, которые распространяются по трем первичным меридиональным плоскостям.

Затем зеркала $M_{4,5,6}$ отражают пучки по направлению к центру голограммы. Линзы $L_{5,6,7}$ обеспечивают фильтрацию и коррекцию кривизны волнового фронта для каждого пучка.

С помощью затвора осуществляется поочередное экспонирование тремя опорными пучками, расположенными в меридиональных плоскостях $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$. Изображения в разделенных цветах при записи с угловым кодированием получаются так же, как и в случае кодирования пространственной частотой.

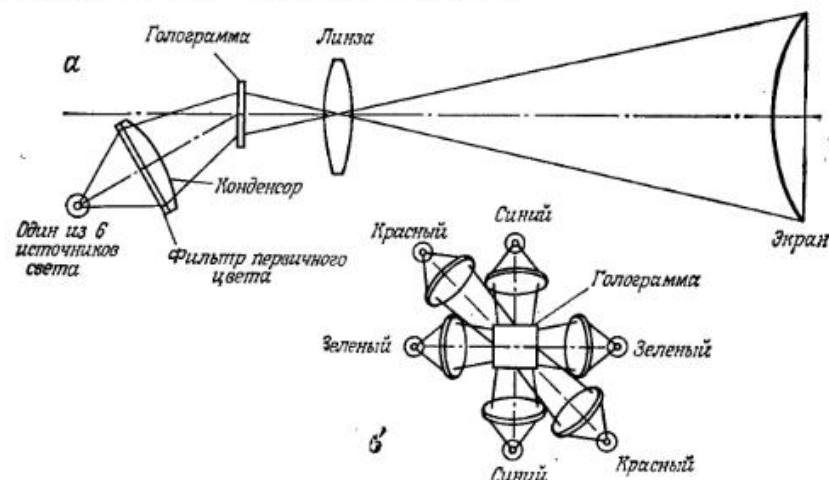


Рис. 13. а — считывание голограмм сфокусированного изображения в случае углового кодирования; б — набор источников света, видимый со стороны линзы.

Очень яркое изображение с фазовых голограмм, кодированных по углу, можно получить, используя устройство считывания, показанное на рис. 13. Для каждого первичного цвета применяется пара источников света (а не один), чтобы получить изображение с более высокой яркостью. Меридиональные плоскости и угол восстановления для синего цвета здесь те же, что и показанные на рис. 12, б, но для зеленого цвета угол восстановления несколько больше, а для красного он значительно больше; при этом должно удовлетворяться соотношение $\sin \theta = \lambda v$, где v (частота решетки) составляет 1100 линий/мм при длине волны записывающего света 441,6 нм, а углы записи равны 30° (для всех трех первичных цветов).

Дополнительная яркость изображения получается, если использовать направленный экран. Такой экран можно покрыть антиотражающим покрытием, чтобы изображения получались высококонтрастными, даже если в помещении светло.

Экран в виде матрицы небольших линз, укрепленных на поверхности конденсорной линзы, обеспечивает не только низкое

отражение, но и наблюдение более яркого изображения, чем экран, представляющий собой простой ламбертовский рассеиватель. Конденсорная линза создает изображение апертуры проекционной линзы в плоскости наблюдателя. Глаза наблюдателя должны быть расположены таким образом, чтобы он мог видеть это изображение. Чтобы обеспечить большое поле зрения, поверхность конденсора покрывается маленькими линзами, каждая из которых соответствует элементу изображения. Любая такая линза переносит соответствующий элемент изображения в плоскость наблюдателя. Диаметр участка, занимаемого элементом изображения, создаваемого этой линзой, обратно пропорционален ее фокусному расстоянию. Конденсорная линза обеспечивает совпадение изображений от каждой маленькой линзы с плоскостью наблюдателя.

Отношение яркости изображения, наблюдаемого на направленном экране, к яркости изображения, полученного с использованием ламбертовского рассеивателя, называют «усилением экрана».

Полученный таким способом дисплей обеспечивает на экране яркость 270 нит ($2,65 \cdot 10^3$ кд/м²), если дифракционная эффективность голограмм в среднем равна 15%, а для считывания используются шесть ламп по 60 Вт каждая, но при усилении экрана, равном 30, кажущаяся яркость составляет $78,4 \cdot 10^3$ кд/м². Ухудшение контраста, связанное с отражением от экрана яркого внешнего света яркостью $26,5 \cdot 10^3$ кд/м² и эффективной отражательной способностью экрана 1%, приводит к значению контраста 30 : 1, что позволяет использовать такой дисплей на открытом воздухе в солнечный день.

Разрешение, полученное на этом дисплее, составляет примерно 200 линий/мм на уровне 50% МПФ. Опорный пучок от гелий-кадмиевого лазера, падающий под углом 30° , создает картину полос с частотой 1100 линий/мм. Площадь голограммы 21×21 мм². Увеличение равно 22, т. е. можно получить изображение размерами около 46×46 см²; однако при диаметре проекционного экрана ~ 15 см можно наблюдать лишь часть изображения, которому на голограмме соответствует участок диаметром 7 мм. В этом устройстве предусмотрено перемещение голограммы с целью сканирования изображения. Разрешение на экране составляет около 6 линий/мм и ограничивается проекционной линзой. Это разрешение удовлетворяет критерию, сформулированному в п. 10.2.2.1, когда наблюдение производится с расстояния 63 см.

Каждый из описанных выше методов цветокодирования имеет свои достоинства и недостатки; однако эти методы не обязательно должны быть строго ограничены рамками либо углового кодирования, либо кодирования пространственной частотой. При необходимости можно использовать в конкретных ситуациях комбинацию этих методов [7]. Приведенные выше рассуждения подчерки-

вают дополнительный аспект голографического формирования изображений — цветовой; однако черно-белые изображения можно получать большей яркости, чем цветные, если при кодировании пространственной частотой установить соответствующим образом ширину щели, а в считывающем устройстве системы углового кодирования использовать широкополосные первичные фильтры от ламп.

10.2.4.2. Негативная запись и восстановление

Изображения можно также синтезировать от решеток, используя в качестве носителя информации члены нулевого дифракционного порядка. Отличие этого процесса от рассмотренного выше позитивного процесса, когда дифракционная решетка направляет свет по позитивному пути считывания, состоит в том, что в этом случае свет после дифракции идет по негативному пути считывания; иными словами, в позитивной системе для восстановления изображений используются первые дифракционные порядки, в то время как в негативной системе изображение формируется членами нулевого порядка дифракции.

а. Цвет. В качестве оптимальных первичных цветов выбираются те же стандартные субтрактивные цвета, что и в негативной цветной фотографии, а именно желтый, голубой и пурпуровый.

Этот подход дает несколько преимуществ:

1) при данных значениях эффективности решетки и интенсивности восстанавливающего пучка можно получить более яркие изображения, чем в случае обычных голограмм, использующих дифракцию первого порядка;

2) нет необходимости информационному пучку проходить по внеосевым считывающим путям, так что для считывания можно использовать стандартный проектор для слайдов;

3) голограмму можно записывать в некогерентном свете.

Кноп [10] продемонстрировал яркие цветные изображения с высоким разрешением, полученные методом нулевого дифракционного порядка, в котором фазовая структура имела прямоугольный профиль, а не обычный синусоидальный. Автор не утверждает, что это голография, но аналогия в принципе очевидна.

Кноп в работе [10] показывает, что пропускание $t(\lambda)$ составляющей нулевого дифракционного порядка для прямоугольной фазовой решетки равно $t(\lambda) = \cos^2(\pi a/\lambda)$, где a — разность длин оптических путей, и что решетка при $\lambda = ma$, где m — целое число, пропускает весь свет в нулевой порядок, а при $\lambda = (m + 1/2)a$ направляет весь свет в высшие порядки. Селективность к цвету основана на зависимости дифракционной эффективности нулевого порядка от длины волны. На рис. 14 показана теоретическая зависимость

пропускания трех наложенных друг на друга составляющих решеток от длины волны.

Постоянная решетки одинакова для всех трех составляющих; амплитуда каждой из трех решеток однозначна для получения первичного цвета. Градации яркости создаются растриванием.

На трех термопластичных пластинках из полихлорвинила были впечатаны электролитической металлической решеткой фазовые структуры с амплитудами 935 нм для голубого, 780 нм для пурпурового и 610 нм для желтого. Измерения пропускания $t(\lambda)$ продемонстрировали хорошее согласование с теоретическими значениями. Три первичные компоненты, впечатанные на пластинке, при записи были разделены

Диапазон цветов, который обеспечивает данная система, вполне соответствует как естественному диапазону цветов, так и имеющему место в цветных фильмах и полиграфии. Промежуточные цвета и градации яркости можно получить растриванием первичных изображений. Это выполняется таким же способом, как и для полутонной печати. Как и следовало ожидать, частота растривания оказалась меньше, чем частота решетки.

Для того чтобы можно было проводить считывание с помощью обычного проектора слайдов, частота решетки выбиралась таким образом, чтобы первые и высшие дифракционные порядки попадали за пределы апертуры считывающей линзы.

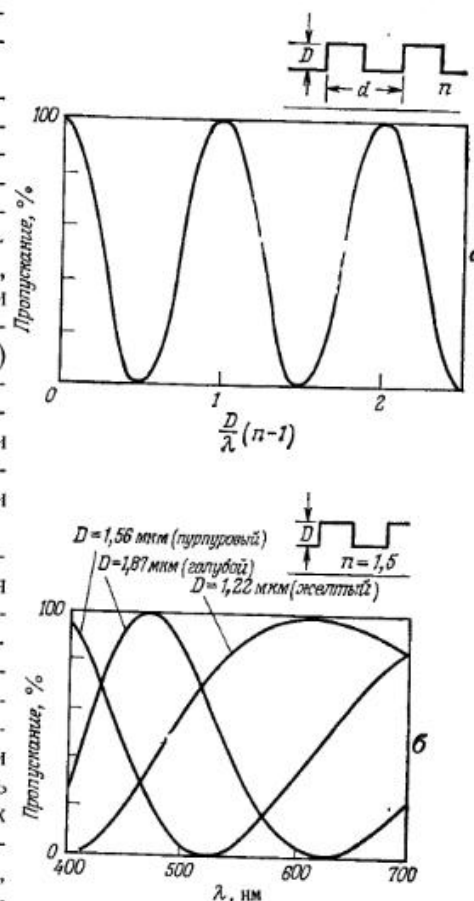


Рис. 14. Дифракция нулевого порядка для одиночной прямоугольной фазовой решетки и для трех таких наложенных решеток. а — пропускание в нулевом порядке для прямоугольной фазовой решетки; б — пропускание в нулевом порядке в видимой области спектра для прямоугольной решетки.

Поскольку для большинства проекторов слайдов относительное отверстие равно 4—2,8, для всех трех решеток был выбран период, равный 1,4 мкм. На такой системе как с микрофишей, так и с 35-мм пленкой были продемонстрированы изображения с очень хорошей точностью цветопередачи и высокими значениями разрешения и яркости.

Пресс-формы первичных решеток изготавливают методом контактной печати бинарных поглощающих решеток на фоторезисте с необходимой толщиной для каждого цвета. При этом получается прямоугольный профиль. Последующее покрытие никелем приводит к образованию пресс-формы. Затем металлизированную поверхность покрывают фоторезистом и экспонируют изображением в первичном цвете. Экспонированный фоторезист стравливается, а неэкспонированный остается. Затем пластину помещают в гальваническую ванну, в которой экспонированные участки заполняются жидкостью, а участки с целым фоторезистом с ней не контактируют. Таким образом получают пресс-формы для каждой первичной решетки.

6. Негативная запись черно-белой информации. Бестенрейнер и сотр. [2] использовали нулевой дифракционный порядок для получения ярких изображений; они записывали фотографии с не-зущей частотой на отбеленную галогенидосеребряную эмульсию с помощью контактной печати. Гленн [8] показал, что голограммы сфокусированного изображения с дифракцией в нулевом порядке могут быть записаны на термопластике.

Гейл [6] разработал новый двухступенчатый метод, с помощью которого можно получить изображения с большой яркостью, высоким контрастом и разрешением, включая градации яркости. В этом методе предпочтение отдается решетке с синусоидальным, а не с прямоугольным профилем, поскольку последняя решетка имеет более узкий минимум функции пропускания от длины волны, чем первая. Таким образом, прямоугольные решетки более удобны для передачи цветных изображений.

На рис. 15 приведена зависимость пропускания синусоидальных решеток от длины волны при нормально падающем свете. Сплошная кривая соответствует одиночной решетке. Если использовать две скрещенные решетки, то можно получить увеличение оптической плотности [9]. Штриховая кривая соответствует расчетным значениям пропускания и плотности скрещенных синусоидальных решеток с одинаковыми амплитудами.

Гейл [6] показал, что подбором относительных амплитуд решеток можно добиться нейтральности «черного»; иными словами, если, например, амплитуда одной решетки $a_1=790$ нм, а другой $a_2=450$ нм, то координаты на диаграммах МКО, вычисленные для нулевого порядка, имеют значения $x=0,44$, $y=0,4$, которые близко

соответствуют координатам цветного источника, соответствующего нейтральному черному.

Нейтральные градации яркости невозможно получить простым подбором амплитуд решеток, поэтому Гейл использовал метод полутонового растривания, применяемый в полиграфии.

Он получил прекрасные результаты, используя периоды решетки, равные 1,4 мкм, и точечные растры с частотами 40 и 80 линий/мм (или периодом $25 \times 12,5$ мкм), и предположил, что период

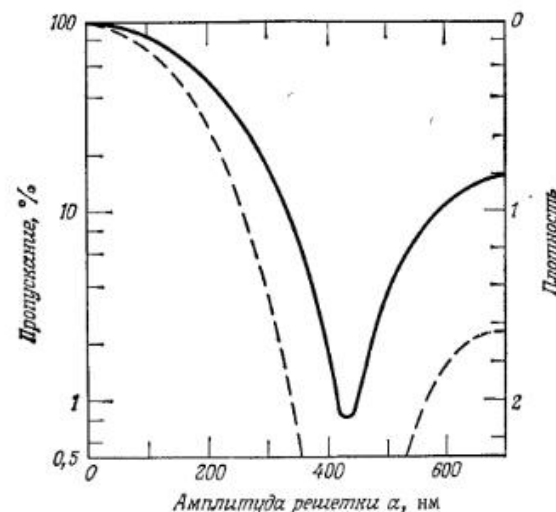


Рис. 15. Дифракция нулевого порядка для синусоидальных фазовых решеток. Сплошная кривая получена для одиночной решетки; штриховая кривая — скрещенные решетки с одинаковыми амплитудами $a_1=a_2$.

можно уменьшить еще вдвое. Записанный кадр размерами 10×10 мм, проецируемый с 20-кратным увеличением, давал изображения высокого качества при использовании раstra с частотой 120 линий/мм. Измеренное им разрешение нерастриванных изображений оказалось около 300 линий/мм. Интервал следования полос d в дифракционной картине выбирался из условия $d \leq \lambda F$, где F — относительное отверстие проекционной линзы; при этом линза выполняла роль пространственного фильтра для высших дифракционных порядков.

10.2.5. Восстановление голографическими средствами

В некоторых применениях, требующих хранения довольно большого числа изображений, необходимо, чтобы система обладала способностью восстановления. Оптические системы восстановления использовались и раньше, но их надежность во многих случаях

оставляла желать лучшего. Числа, записанные на кадрах в виде двойных изображений, занимают небольшой участок на кадре, но они очень неустойчивы к воздействию царапин и частиц пыли. В результате возможны потери битовой информации и, следовательно, неправильная адресация.

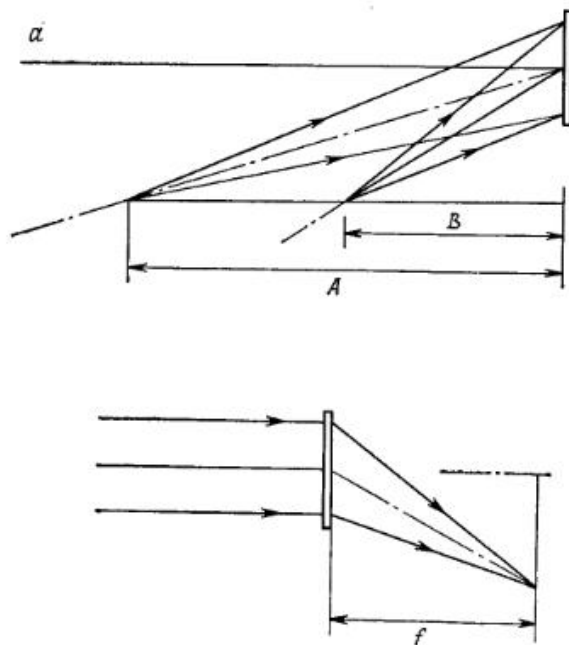


Рис. 16. Запись адресуемого кадра на длине волны $\lambda_1 = 441,6$ нм (а) и считывание на длине волны $\lambda_2 \approx 1000$ нм (б).

Для увеличения надежности система восстановления должна быть защищена от этих воздействий. Простой путь решения проблемы царапин и пыли состоит в записи кадра в виде сильно избыточной голограммы.

Помимо избыточности, характеристики голограммы должны удовлетворять следующим двум требованиям:

1) восстановленное изображение должно оставаться стационарным в направлении движения, в то время как голографический кадр движется по отношению к системе считывания (это необходимо для снижения требуемой полосы частот);

2) длины волн записи и считывания должны различаться, чтобы можно было проводить запись в коротковолновом диапазоне в соответствии со спектральной характеристикой среды, а считывать с помощью длинноволнового источника, например лазерного диода

на арсениде галлия. На рис. 16 показано, каким способом можно удовлетворить этим условиям.

Предположим, что объект состоит из линейной цепочки тесно расположенных точек, которые соответствуют всем возможным двойным цифрам огромнейшего числа адресов на кадре. Выбор любого конкретного числа определяется включением (или выключением) соответствующих точечных источников во время экспонирования. Такой принцип работы позволяет использовать линейную цепочку фотодиодов (например, типа Reticon или ПЗС), помещенных в плоскость восстановленного изображения с целью получения сигнала, пригодного для электронной обработки.

Голограмма, удовлетворяющая первому из двух вышеприведенных условий, должна иметь структуру полос Фраунгофера в направлении движения и структуру Френеля в ортогональном направлении. Для считывания такой голограммы необходимо иметь когерентный источник света. Очень удобен для этой цели маленький лазерный диод на арсениде галлия ($\lambda \approx 1000$ нм). Если в качестве среды для записи применяется фоторезист Shipley AZ 1350, а источником света является He—Cd-лазер на длине волны 441,6 нм, то в считываемом изображении могут возникнуть различные aberrации типа aberrаций Зайделя.

Вообще говоря, если записывать голограммы на одной длине волны, а считывать на другой, то в результате возникает целый ряд aberrаций волнового фронта, которые могут быть представлены в виде суммы различных aberrаций Зайделя, известных из классической оптики. Для уменьшения этих aberrаций до незначительной величины требуется приложить много усилий.

Тафт¹⁾ в сотрудничестве с автором [3] предложили метод записи голограмм Френеля малых объектов с низкими aberrациями, причем запись и считывание происходит при различных длинах волн. Геометрические параметры записи вычисляются из рассмотрения желаемой конфигурации считывания и разности длин волн между записью и считыванием. Понятие записи требует конфигурации, в которую включены точечный объект и точечный источник опорного пучка, причем они расположены на перпендикуляре к плоскости голограммы, как показано на рисунке. Эти источники являются когерентными и испускают свет с длиной волны λ .

Восстановление осуществляется с помощью параллельного пучка света с длиной волны λ_2 , перпендикулярно падающего на голограмму. С помощью подробного анализа можно показать, что если для длины волны λ_2 требуется фокусное расстояние голограммы f и если $\lambda_2 = x\lambda_1$, то расстояния A и B из рис. 16 можно определить

¹⁾ R. A. Taft, Worcester Polytechnical Inst., частное сообщение.

путем одновременного решения двух уравнений:

$$\frac{1}{A} - \frac{1}{B} = \frac{1}{\alpha f} \quad \text{и} \quad \frac{1}{A^3} - \frac{1}{B^3} = \frac{1}{\alpha f^3}$$

где A — расстояние по нормали к плоскости голограммы от точечного опорного источника до голограммы, а B — расстояние от точки на объекте до плоскости голограммы.

Если таким образом записать голограммы, то восстановленные изображения не будут содержать aberrаций Зайделя, вызываемых различием в спектре записывающего и считывающего света, причем длины волн могут различаться более чем вдвое. Были получены дифракционно-ограниченные восстановленные изображения для малых объектов (цепочка из 11 точечных объектов, разделенных десятью точечными промежутками, перекрываемая линейной цепочкой детекторов длиной 6,5 мм).

С таких голограмм восстанавливаются изображения, которые движутся, когда голограмма перемещается в системе считывания. Для того чтобы избавиться от влияния движения голограммы, на пути опорного пучка ставится цилиндрическая линза, согласующая кривизну волновых фронтов опорного и объектного пучков, что приводит к появлению прямых полос в меридиональной плоскости. Голограммы, содержащие информацию в системе прямых полос, обеспечивают стационарное считывание. Однако пространственная частота прямых полос изменяется в соответствии с френелевским распределением, поскольку в направлении, перпендикулярном полосам, цилиндрическая линза мощность не рассеивает. Цилиндрическую линзу необходимо также использовать и при считывании с целью фокусировки коллимированной составляющей в точки, расположенные на той же плоскости, на которой фокусируются сходящиеся лучи составляющей от голограммы Френеля. Таким образом, для считывания стационарного изображения можно использовать линейную цепочку диодов, а другой такой же цепочкой, но повернутой на 90° относительно первой, удобно считывать положение голограммы вдоль оси y . Другая голограмма, на которой записан один точечный объект, применяется в такой же схеме, но с одной линейной цепочкой диодов для определения положения голограммы вдоль оси x .

Таким образом, набор из двух голограмм обеспечивает точное определение положения изображения по осям x и y , а также порядкового номера адреса для каждого кадра.

10.2.6. Заключение

Применение фазовых голограмм сфокусированного изображения в системах с дисплеями позволяет получать цветные или черно-белые дисплеи с большей яркостью и более высоким разрешением,

чем соответствующие фото- и кинопроекционные системы. Стоимость копий голограмм ниже, чем стоимость копий обычных фото- и киноплёнок, поскольку первые прессуются на прозрачной основе, а во вторых используется более дорогая структура, включающая эмульсию, покрывающую прозрачную основу и требующую химической обработки. Копии голограмм более долговечны, чем цветные пленки, так как в голограммах информация записана в виде поверхностного рельефа материала, а пленки содержат красители, которые постепенно обесцвечиваются при тех значениях интенсивности считывающего света, которые обычно используются в 35-мм диапроекторах.

В новой системе восстановления и корректировки положения изображений, согласованной с методом прессовки голограмм, для повышения надежности используются голограммы с высокой избыточностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bartolini R. A., Appl. Opt., 13, 129 (1974).
2. Bestenreiner F., Deml R., Greis U., Optik, 30, 404—418 (1970).
3. Clay B. R., US Patent 3695 744, Holographic Multicolor Technique, 1972.
4. Clay B. R., Gore D. A., Proc. SPIE, 45, 149—155 (1974).
5. Clay B. R., Final Rep. Navy Contract N62269-72-C-0452 (1972).
6. Gale M. T., Opt. Commun., 18, 3 (Aug. 1976).
7. Gale M. T., Knop K., Appl. Opt., 15, 2189—2198 (1976).
8. Glenn W. E., J. Appl. Phys., 30, 1870—1873 (1959).
9. Ih C. S., J. Opt. Soc. Amer., 63, 1282 (1973).
10. Knop K., Opt. Commun., 18, 3 (Aug. 1976).
11. Meyerhofer D., Appl. Opt., 10, 416 (1971).
12. Mezrich J., Carlson C. R., Cohen R. W., RCA Labs., Princeton, New Jersey, Office of Naval Res. Rep. CR213-120-2, 1977.
13. Smith S. L., J. Appl. Phys., 47, N 6, 358—364 (1963).
14. Urbach J. C., Proc. SPIE, 25, 27 (1971).

10.3. ТРЕХМЕРНЫЕ ДИСПЛЕИ

М. Леман

10.3.1. Введение

Первоначальный этап развития трехмерной отображающей голографии был тернистым и неровным. В ранних работах, вызванных к жизни первой публикацией Габора [5], основное внимание уделялось развитию микроскопии. Лишь после того, как Лейт и Упатникс доложили о двулучевом интерферометрическом эффекте [4, 10], возникла мощная волна попыток создать голограммы, дающие трехмерное изображение, и вскоре последовало сообщение о «без-

линзовой» фотографии [12]. Пресса уже сулила всевозможные заманчивые вещи: от семейных трехмерных портретов в натуральную величину до трехмерного кино и телевидения. Наука была близка к тому, чтобы превзойти самые невообразимые фантазии!

К сожалению, это повредило спокойному ходу развития техники создания трехмерных изображений, поскольку большинство из этих ранних предсказаний были преждевременными, если не вовсе нереальными. Некоторые исследователи в пылу погони за финансированием дали необоснованные экстравагантные обещания, которые было невозможно выполнить. Неудивительно, что слово LASER нередко расшифровывали как *Loot Acquired to Support Expensive Research* (средства, награбленные для финансирования дорогостоящих исследований)! Понятно, что на дилетантов трехмерная голография производила большое впечатление. Представлялось, что, для того чтобы воплотить в жизнь замыслы, порожденные научной фантастикой, необходимо лишь решить несколько простых технических задач. Многим казались уже почти реальностью, например, трехмерные дисплеи наблюдения за прибытием и отправлением самолетов в аэропорту, точно определяющие положение и высоту всех самолетов. Проектировались даже изображения дорожных знаков; серьезно предполагалось использовать дисплеи для трехмерной рекламы более чем в натуральную величину.

Мы привыкли к тому, что изображение значительно лучше, чем словесное описание, а кинофильм лучше простой фотографии. Следуя этой логике рассуждений, нетрудно прийти к мысли о существовании множества достоинств трехмерных изображений. Однако эта логика является спорной, в чем можно убедиться, просмотрев почти любой любительский фильм! Существует множество ситуаций, когда слова оказывают больший эффект, чем изображения, и часто хорошая неподвижная фотография полностью удовлетворяет всем предъявляемым требованиям. Это вовсе не значит, что получение трехмерных изображений бесполезно. Достоинства голографических трехмерных дисплеев вполне реальны и могут быть использованы, если их применение грамотно оценить и разработать осуществимые технические решения.

Однако не следует дожидаться острой потребности в каком-либо конкретном применении трехмерной голографии. Многие из технических новшеств сами создали ситуацию, когда появилась необходимость в их использовании. В этом смысле голография не является исключением. Реклама представляет собой нередко способ убедить нас в нашем незнании того, что нам нужно, и часто утверждает, будто нам остро необходима некая новая техника или процесс, которые, скорее всего, следует отнести к дорогой роскоши [3]. Теперь, когда голография вышла из стен лаборатории и не обязательно нуждается в таких экзотических источниках света, как лазер или ртутная дуговая лампа, открывается широкий путь для

творческого и новаторского развития техники создания трехмерных голографических изображений [9]. Даже при обзоре краткой истории голографии становится ясно, что для некоторых применений использовались очень сложные голографические процессы, которые затем пришлось упрощать, пока вообще не отпала в них необходимость. Рассматривая голографическое получение изображений, целесообразно отдавать себе отчет в том, что голография может играть роль лишь катализатора в реализации окончательного решения.

10.3.2. Голографические системы, работающие на просвет

Существует множество способов изготовления голограмм, и каждый из них имеет только ему присущие особенности. Хотя обычно считается, что для голографии необходим свет лазерного источника, однако запись голограмм можно производить и с помощью ртутных дуговых ламп или источников белого света с фильтром. Тем не менее лазер остается наиболее эффективным и, безусловно, чаще всего применяемым источником света при голографической записи.

Первые эффективные трехмерные голограммы были просветными; они до сих пор наиболее популярны среди новичков и являются единственным средством начать знакомство с голографическими методами. Если справиться с ограничениями по когерентности и с проблемами стабильности, шансы на успех с первой попытки резко возрастают. Ничто не может лучше поддерживать интерес и стимулировать дальнейшее развитие исследований, чем качественная голографическая запись. Всегда разумно иметь по возможности простую оптическую схему. Каждое зеркало, линза, светодетектор, любой другой элемент усложняют проблему стабильности. Таким образом, простейшая система записи просветной голограммы не должна содержать, кроме лазера и расширителя пучка, никаких

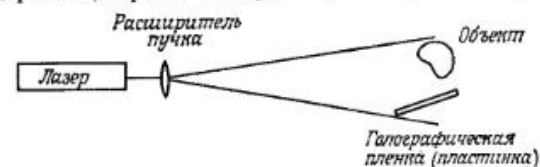


Рис. 1. Упрощенная голографическая установка.

других оптических элементов. Пространственный фильтр желателен, но не обязателен. Фотопленка или пластинка жестко закреплена на той же основе, что и объект, поэтому относительное движение между двумя элементами исключено (рис. 1). При небольшом смещении лазера или расширителя пучка меняется лишь освещенность, но дифракционная картина остается без изменения.

Идеальными объектами для голографии являются предметы из заменителя гипса или непрозрачного белого пластика, поскольку они равномерно отражают падающий свет без зеркальных бликов, которые могут засвечивать фотопленку. Металлические предметы можно обрызгать приглушающим аэрозолем из тех, что продаются в большинстве магазинов для художников. В данном случае он нужен для устранения нежелательных зеркальных отражений.

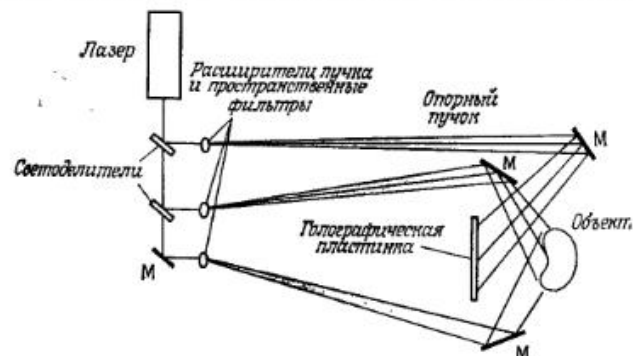


Рис. 2. Голографическая конфигурация при освещении двойным пучком.

Окрашенные металлические предметы вполне годятся на роль объекта в голографии. Коль скоро искусство голографии постигнуто (голография — это искусство в той же мере, что и наука), можно ставить и более сложные задачи. На рис. 2 приведена схема с более естественным освещением, особенно полезная, если мы намерены восстанавливать голограмму произведения искусства. Однако такое устройство усложняет проблему стабильности и требует тщательных измерений, чтобы длина когерентности лазерного источника с гарантией не была бы превзойдена. С целью повышения дифракционной эффективности изготовленных таким способом пропускающих голограмм они отбеливаются, и если стеклянная пластинка почти идеально прозрачна, то можно считать, что удовлетворены все требования для получения дисплея произведения искусства.

Просветные голограммы можно применять также для проекции действительных изображений, однако при этом возникают некоторые отклонения, которые можно исправить, придав соответствующую форму опорному пучку. Поскольку при получении действительного изображения после прохождения через голограмму направление восстанавливающего пучка меняется на противоположное (по отношению к случаю получения мнимого изображения), форма пучка должна быть также изменена с целью согласования его с опорным пучком, используемым при записи. Однако если опорная волна является коллимированной и плоской, то никаких

изменений не требуется, так как форма пучка самосопряженная. Чтобы удовлетворить обоим этим требованиям, схема должна иметь очень большие линзы даже для голограмм умеренных размеров, так что по экономическим соображениям это решение практически неоправданно. Такую задачу можно решить, например, если использовать очень длинный оптический путь (25—40 м), чтобы сферический волновой фронт практически можно было считать плоской волной как при записи, так и при восстановлении. Однако действительное изображение будет псевдоскопическим (т. е. повернутым задом наперед), но этот дефект нетрудно исправить, если изготовить вторую голограмму, в которой псевдоскопическое действительное изображение играет роль объекта.

10.3.3. Отражательные голографические системы

Особая привлекательность отражательных голограмм состоит в том, что они, будучи записаны с использованием когерентного монохроматического света лазера, могут быть затем восстановлены при освещении обычным источником белого света. Процесс записи чрезвычайно прост; нужно лишь, чтобы опорный пучок падал на пластинку с противоположной стороны по отношению к объектному. Этого легко добиться, если освещать объект опорным пучком после того, как он прошел через голографическую пластинку. Безусловно, объект должен хорошо отражать свет, поскольку опорный пучок ослабляется после прохождения через эмульсию; если же объект отражает слабо, фотопленка экспонируется очень небольшим количеством света от объекта. Нельзя использовать фотопленки и фотопластинки с антиотражательной основой, так как они недостаточно прозрачны для освещающего пучка. Поскольку интерференционные полосы образуются внутри сектора, образованного опорным и объектным пучками, в отражательных голограммах эти полосы оказываются строго параллельными поверхности эмульсии. Шаг полос d определяется длиной волны падающего света и синусом угла между опорным и объектным пучками:

$$d = \lambda / 2 \sin(\theta/2). \quad (1)$$

Таким образом, при $\theta \approx 180^\circ$ $d = \lambda/2$ (т. е. шаг полос равен половине длины волны лазерного света). Понятно, что при записи полос со столь малым шагом важную роль играет стабильность. Проблема стабильности стоит настолько остро, что существенно следить даже за мелочами: необходимо оставлять фотопластинку на держателе в течение нескольких минут после экспозиции для стабилизации температуры. Усадки эмульсии при изменении температуры на долю градуса достаточно, чтобы разрушить голограмму.

Отражательные голограммы можно восстанавливать белым светом даже от таких источников, как солнце или фара. Цвет, в котором восстанавливается голограмма, определяется шагом полос, установленным при записи. Существует еще одна проблема, связанная с тем, что при проявлении большинства фотографических эмульсий претерпевает усадку; поэтому после сушки шаг полос фактически оказывается меньше шага, установленного при записи. Голограмма, записанная в красном свете гелий-неонового лазера, восстанавливается в зеленом или желтом цвете. Понятно, что большая усадка голограммы, записанной в зеленом или синем свете, приведет к изменению цвета восстановленного изображения, который может уйти далеко в фиолетовую область и оказаться за пределом чувствительности человеческого глаза. Усадка одних фотографических материалов больше, других — меньше, а некоторые материалы, например бихромированная желатина, при проявлении даже расширяются. Таким образом, на бихромированную желатину надо записывать в более коротковолновом свете; к счастью, она чувствительна именно в сине-фиолетовой области спектра. В § 9.1 рассмотрены более детально характеристики этих фотографических материалов.

На отражательных голограммах не бывает пятен перекрытия цветов, которые появляются, когда в белом свете восстанавливают обычную просветную голограмму. Такая спектральная селективность связана с наличием системы параллельных интерференционных полос. Однако резкость изображения определяется размером восстанавливающего источника; следовательно, чем больше источник похож на точечный, тем выше качество восстановленного изображения. Это ограничение тем слабее, чем ближе находится изображение объекта к плоскости эмульсии, а лучше всего — непосредственно в этой плоскости. Такого положения можно достигнуть, если изображение спроецировать линзой или спроецировать действительное изображение объекта с его голограммы. Часть изображения, находящаяся внутри слоя эмульсии, будет резкой, даже когда оно восстанавливается протяженным источником, например флуоресцентной лампой, но часть изображения, расположенная перед эмульсией или за ней, будет рассеиваться пропорционально расстоянию от точки изображения до плоскости эмульсии. Такой метод голографической записи можно применить для улучшения резкости изображения как в случае пропускающих, так и в случае отражательных голограмм. Применяя этот метод к пропускающим голограммам, необходимо использовать цветные фильтры для исключения рассеяния цветов, поскольку цветовая фильтрация многослойными полосами осуществима лишь в отражательной голографии.

10.3.4. Радужная голография

Там, где имеется какая-либо проблема, всегда можно найти ее решение. Вид голографической записи, известный как «радужная голография», был изобретен Бентоном (фирма «Polaroid Corporation»), когда он решал ту самую проблему, связанную со смешением цветов, если при восстановлении пропускающих голограмм используется источник белого света [1, 2]. Для этого типа голограмм изображение располагается очень близко к плоскости эмульсии, в результате чего улучшается резкость, а смешение цветов сведено

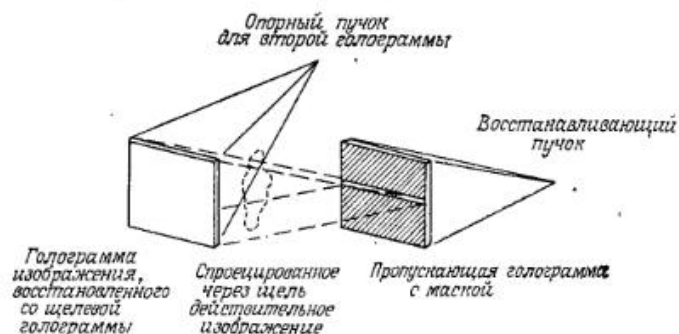


Рис. 3. Запись радужной голограммы.

к минимуму, так как отсутствует вертикальный параллакс. Такие голограммы записываются точно так же, как и обычные пропускающие голограммы, за исключением лишь того, что опорный пучок должен иметь по возможности плоский волновой фронт благодаря использованию либо большой коллимирующей линзы, либо длинного оптического пути. Голограмма-оригинал после изготовления закрывается маской, оставляющей лишь узкую щель, пригодную для наблюдения мнимого изображения. Затем действительного изображения, спроецированного со щелевой голограммы, изготавливается вторая голограмма (рис. 3). У этой второй голограммы отсутствует вертикальный параллакс, поскольку на ней записано только изображение, видимое через узкую щель на голограмме-оригинале. После восстановления второй голограммы белым светом наблюдается разделение (но не смешение) цветов в вертикальном направлении, поскольку каждое окрашенное изображение фактически представляет собой результат отдельного восстановления информации, содержащейся в узкой щели. Если для восстановления щелевой голограммы использовать цилиндрическую линзу, а для улучшения дифракционной эффективности применить отбеливание, то при освещении голограммы источником белого света можно наблюдать очень яркое изображение. Поскольку наблюда-

тель сканирует изображение вертикально, то цвета не смешиваются, а постепенно меняются и изображение имеет удовлетворительную резкость и четкость. Как и во всех случаях при восстановлении голограмм, по мере приближения изображения к плоскости эмульсии необходимость в точечном источнике уменьшается.

10.3.5. Мультиплексная голография

Другой попыткой решить проблему восстановления голограмм в белом свете является также использование метода узкой щели, но теперь щель вертикальна. Этот метод, разработанный одновременно несколькими небольшими компаниями, получил различные названия, например «мультиплексная голограмма», «интеграфы» и др., но более наглядно было бы назвать его «стереограммой». Метод состоит в фотографировании объекта на стандартную 35-мм черно-белую пленку с помощью кинокамеры. Поскольку на данном этапе используется обычная фотографическая техника, объект может перемещаться и иметь произвольные размеры. Обычно в качестве объекта используются фигуры людей, выполняющих несложные повторяющиеся движения, например играющих на музыкальных инструментах или танцующих. Кинопленка помещается на вращающийся стол, и по мере вращения стола экспонируется тысяча и более отдельных кадров. При обычных скоростях кинокамеры цикл занимает от сорока секунд до минуты. Затем каждый отдельный 35-мм кадр освещается лазерным светом и проецируется через цилиндрическую линзу на маскированную полосу пленки одновременно со сфокусированным опорным пучком от того же лазера. Таким образом изготавливается ленточная голограмма спроецированного изображения. Процесс повторяется для каждого 35-мм транспаранта, в то время как голографическая пленка перемещается и экспонируется следующая полоса. В конце концов получается стереографическая голограмма шириной 20 мм и длиной 650 мм, которая восстанавливается источником белого света с вертикальной нитью. Восстановление в белом свете вызывает некоторое разделение цветов сверху вниз, но, с другой стороны, создает иллюзию трехмерного объекта, находящегося за искривленным кадром пленки. Иллюзия трех измерений возникает из-за параллакса, связанного с наличием определенного расстояния между глазами. Хотя теоретически существует лишь одно положение для наблюдения трехмерного изображения, вызывает удивление тот факт, как хорошо человеческое зрение приспосабливается и корректирует довольно значительные искажения.

10.3.6. Голографическое кино

Так как же обстоят дела с созданием голографической полностью трехмерной кино- или телевизионной программы? До сих пор использовались побочные пути решения этой проблемы, связанные

скорее со стереографическими, чем с голографическими процессами. Вообще говоря, голограмма представляет собой дифракционную решетку, с которой при соответствующем освещении можно восстановить изображение. Проецирование голограммы и изменение размера решетки приводят к нарушению процесса восстановления. Это связано с тем, что изменение шага решетки искажает дифракцию, и спроецированное в этом случае изображение не вызывает дифракции света на нем. Кроме того, чтобы увидеть трехмерное изображение, во всех случаях необходимо смотреть непосредственно через голограмму, независимо от того, мнимое или действительное изображение мы наблюдаем.

В 1966 г. автором был сделан мультипликационный фильм на 35-мм пленке с голографической записью механически оживляемого объекта. По этому поводу было много шума в прессе, утверждалось даже, что это предтеча полнометражных голографических художественных фильмов! Мечты не только остались мечтами, но сегодня даже нет надежды на их осуществление. Тем не менее голографическое кино такого типа может найти полезное применение. С помощью голографических методов можно изучать кратковременные процессы — объекты, быстро движущиеся через фокальную плоскость. Поскольку качество голограмм не зависит от глубины фокуса, отдельные кадры голографического фильма можно использовать для перемещения исследуемого объекта в резкий фокус микроскопа. Если применяются очень короткофокусные объективы, изображение должно находиться в плоскости эмульсии или над ней. Очевидно, чтобы получить изображение без смаза, голографические фильмы следует снимать при очень коротких экспозициях. В настоящее время имеется вполне достаточное число доступных импульсных лазерных источников, позволяющих получать на пленках кадры, близкие по свойствам к фотографии со вспышкой в наносекундном диапазоне.

Другим результатом попытки создать голографический фильм явилось открытие того факта, что множество изображений или разные ракурсы одного и того же изображения можно последовательно записать на одну голограмму. Одна из попыток использовать этот метод была связана с получением изображений патологоанатомических препаратов. Эти медицинские препараты с необычными физическими дефектами сохранялись с целью их дальнейшего изучения в специальных стеклянных контейнерах, заполненных какой-либо консервирующей жидкостью. Для хранения образцов такого типа была испробована голографическая запись с регистрацией на одной пластинке двух различных положений объекта. Восстановление изображения спереди назад создавало иллюзию реальности препарата. В одну из голограмм как часть объекта была включена увеличительная линза. В процессе восстановления изображение линзы позволяло наблюдать образец в деталях, как если бы

линза действительно присутствовала. С точки зрения наблюдателя, голографические изображения выглядят такими же, как и сами образцы, но, очевидно, с изображениями значительно удобнее работать, их легче хранить, чем образцы в контейнерах, заполненных жидкостью.

10.3.7. Голография с диффузным опорным излучением

Голография с диффузным опорным излучением подробно рассматривается в другой части настоящей книги (см. 5.6); здесь мы остановимся только на тех вопросах, которые касаются получения трехмерных изображений. Можно зарегистрировать объект, используя в качестве опорного пучка зеркально отраженный свет. Однако наличие зеркальных отражений от объекта обычно нежелательно, поскольку любое отражение само по себе становится опорным пучком, и возникающее множество изображений разрушает, казалось бы, хорошую голограмму. Для того чтобы обнаружить эти вторичные отражения от объекта или другие нежелательные отражения света источника, достаточно посмотреть сквозь пластинку или пустой держатель пленки.

Одна из форм голографии с диффузным опорным излучением возникла из рассмотрения фотографий искусственных спутников Земли. В данном случае преимущество голографического отображения состоит в том, что как опорный, так и объектный пучки одинаково искажаются при прохождении через атмосферу, и, следовательно, интерференционная картина остается неизменной. Проверка этого положения при помощи кусочка рассеивающего стекла, моделировавшего атмосферу, показала, что в случае, когда пластинка находится в контакте с атмосферой, голографическая запись значительно превосходит, как показано на рис. 4, по качеству обычную фотографию [6].

10.3.8. Когерентность и стабильность

При рассмотрении любого голографического процесса для получения изображения существенно, чтобы экспериментатор определял как длину когерентности источника света, так и стабильность рабочей поверхности. Эти два фактора жизненно важны для успешной голографической записи, поскольку длина когерентности источника накладывает ограничение на размеры объекта, которые можно записать, и устанавливает точность, с которой должна быть измерена длина оптического пути. Существует очень простой способ измерения обоих этих важных параметров. Лазерный пучок направляется через светоделитель и отражается назад от зеркал, находящихся на одинаковых расстояниях от светоделителя. Оба пучка юстируются таким образом, что их отражения накладываются

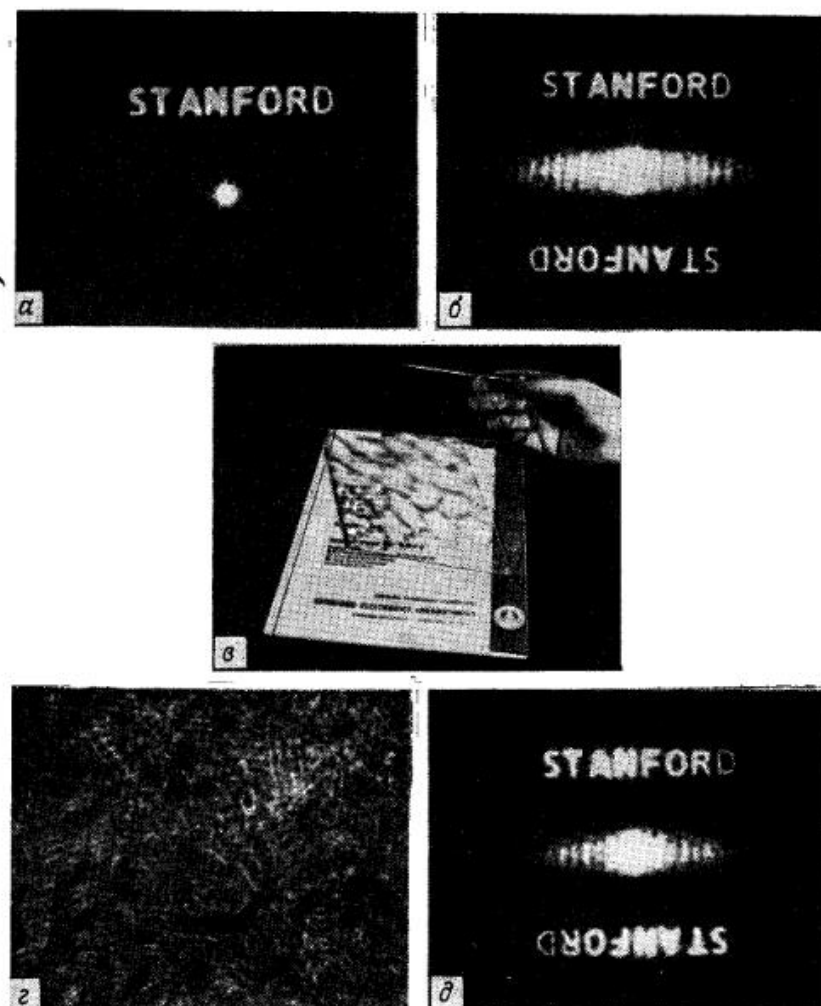


Рис. 4. Сравнение голографической записи и обычной фотографии при воздействии атмосферы (моделируемой стеклянной пластинкой). а — обычное изображение; б — голографическое восстановленное изображение; в — среда, создающая aberrации (рассеивающее стекло); г — обычное изображение, полученное сквозь стекло; д — восстановленное голографическое изображение после его прохождения сквозь стекло.

друг на друга. Если с помощью линзы расширить эти пучки, то интерференционные полосы можно будет легко наблюдать и демонстрировать на видеоконтрольном устройстве (рис. 5) [7]. Любое движение полос указывает на нестабильность рабочей поверхности

или одного из оптических элементов. Когда увеличивается длина одного пути, контраст полос уменьшается. Если полосы перестают различаться, это значит, что длина когерентности превышена. Поскольку световой пучок проходит путь до зеркал и обратно, длина когерентности равна удвоенной разности длин оптических путей.

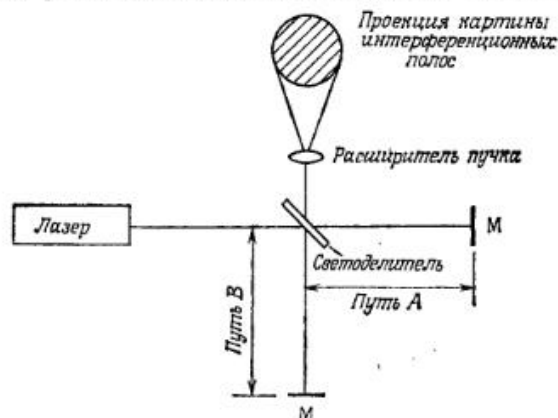


Рис. 5. Установка для определения стабильности и длины когерентности.

10.3.9. Источники света для восстановления

Усовершенствование голографической записи привело к возможности восстановления изображений без применения дорогих источников света. Вначале необходимо было применять лазерный источник, свет которого имел ту же длину волны и падал под тем же углом, что и опорная волна при записи. Однако вскоре стало ясно, что, если рассчитать необходимый угол, исходя из сохранения условия Брэгга, и если имеется возможность менять размеры и положение изображения, при восстановлении можно использовать различные длины волн. В голографии стали применяться источники света с достаточно узкой полосой излучения, которую можно эффективно отфильтровать, например такие, как ртутные дуговые лампы. После того как выяснилось, что изображения, записанные вблизи плоскости эмульсии, восстанавливаются с высокой резкостью, даже если восстанавливающий источник отличается от точечного¹⁾, большие голограммы для систем отображения сделались реальностью. Для восстановления радужных голограмм, или стереограмм, записанных методом мультиплексной голографии, можно использовать даже обычные лампы накаливания с вертикальной нитью. Смягчение требований к источнику для воспроиз-

ведения голограмм способствует развитию и использованию трехмерной голографии для систем отображения, поскольку уже требуется применение дорогих лазерных источников света.

10.3.10. Цветная голография

Для получения удовлетворительного качества цветной голографии необходимо еще решить ряд проблем. Сама природа голографического хранения путем формирования сложной дифракционной картины на фотографической эмульсии приводит к тому, что при данном шаге интерференционных полос свет с различными длинами волн не будет дифрагировать под одними и теми же углами. Многоцветная голограмма, записанная при помощи лазерного света с тремя разными длинами волн, представляет собой три независимые монохроматические голограммы, наложенные друг на друга на одной пластинке. Ширина голографических полос и точность угла опорного пучка при восстановлении связаны соотношением

$$\Delta\theta = \lambda/t, \quad (2)$$

где $\Delta\theta$ (мрад) — изменение угла, при котором полностью подавляется восстановление, t — ширина полос в микрометрах, а λ — пространственная частота, измеряемая в линиях на миллиметр.

Исходя из этого соотношения, можно сделать вывод, что возможна запись трех голограмм, такая, что они восстанавливаются каждая в своем цвете. Именно использование широких голографических полос позволяет восстанавливать многоцветные голограммы без паразитных изображений, которые появляются в случае восстановления одним опорным пучком нескольких независимо записанных изображений. Разумеется, в будущем будет интенсивно вестись разработка доступной цветной трехмерной голографии, которая смогла бы удовлетворить нашим требованиям.

В частности, Кейс¹⁾ (Политехнический институт шт. Вирджиния) предлагает новый вариант цветной голографии. Он предполагает, что цветные голограммы можно изготавливать, используя лазер с генерацией на одной линии, если восстанавливать их на отражение, поскольку отражательная голография селективна к цвету при восстановлении. При изменении угла опорного пучка будет меняться шаг полос, что вызовет дисперсию восстанавливаемого белого света при отражении, и голограмма будет восстанавливаться в цвете. Таким образом, можно последовательно записать две голограммы при разных углах опорного пучка, а затем при восстановлении получить изображение в двух цветах. Однако для

¹⁾ F. Mottier, частное сообщение о голограммах размером 90×60 см, изготовленных в Браун Бовери (Швейцария), сентябрь 1975 г.

¹⁾ S. K. Case, частное сообщение об изготовлении многоцветных голограмм с помощью одноцветного лазера, апрель 1977 г.

успешного применения этого метода необходимо решить ряд проблем, поскольку приходится менять шаг полос без изменения их ориентации. При восстановлении светом с разными длинами волн возникает проблема, связанная с тем, что разные длины волн усиливаются по-разному. Цветное изображение может искажаться, если монохроматический источник при записи передает несколько градаций яркости объекта для обеих длин волн восстанавливающего света. Однако предлагаемый метод обладает уникальными возможностями, которые могут оказаться весьма полезными для получения копий с произведений искусства, если достижение полной реальности не является единственной целью.

В схеме, разработанной недавно фирмой «Hitachi Ltd» (Япония), для получения полной цветной стереограммы используется проецирование изображений с голограмм [11]. При разработке системы был принят ряд мер, чтобы свести к минимуму влияние спеклов и получать восстановленное изображение с высокой точностью соответствия полутонов объекту. На каждом кадре фильма исходный объект записывается под разными углами на 11 цветных транспарантах через 40° . Затем на полосе голографической пленки с помощью трех отдельных лазерных пучков (синего, зеленого и

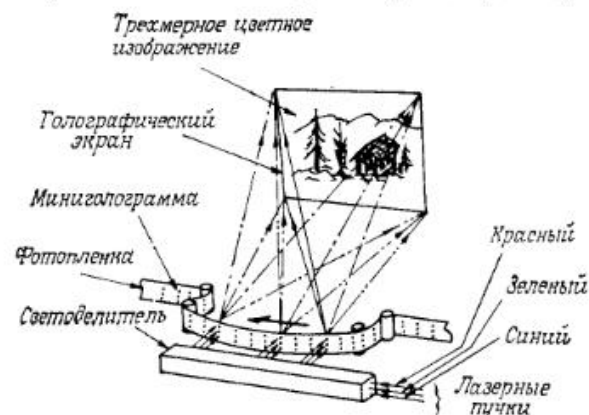


Рис. 6. Получение проекции составной цветной голографической стереограммы.

красного) изготавливаются голограммы Фурье. Цветные изображения на каждом транспаранте записаны независимо и на голографической пленке разделены по вертикали. Голограммы записаны через нерегулярный фазовый фильтр, причем выборка устраняет вертикальный параллакс, сводит к минимуму спеклы и выбирает необходимую пространственную частоту для записи голограммы. Тридцать три голограммы (по одиннадцати для каждого цвета) проецируются лазерными пучками разного цвета на линзовый экран, укрепленный на рассеивающей поверхности (рис. 6). Линзы

экрана расположены вертикально, образуя одномерную систему, чувствительную к направлению, так что при рассматривании экрана с определенного места перед ним возникает иллюзия трехмерного изображения. Экран достаточно велик, чтобы в том месте, откуда наблюдаются изображения в перспективе, могли бы разместиться несколько зрителей. Данный метод имеет определенные преимущества перед мультиплексными стереограммами, поскольку он позволяет наблюдать настоящие цветные изображения, записывать информацию на 35-мм фотопленке и не требует просмотра более широкоформатной пленки.

10.3.11. Голографические системы отображения

В любом конкретном случае приходится принимать решение, использовать ли систему отображения мнимых или спроецированных изображений. После того как телевидение широко вошло в быт, научная фантастика стала предсказывать возможность проецирования изображений артистов таким образом, чтобы зритель мог подняться на сцену и лично принять участие в действии. Когда открылась возможность проецирования голографических изображений, стало казаться, что фантастические надежды можно реализовать. Однако существует слишком много нерешенных проблем как в проекционной голографии, так и в вопросах пропускания голограммы, чтобы можно было предполагать, что научно-фантастический вымысел когда-либо воплотится в жизнь.

Применение нашла голография как мнимых, так и спроецированных изображений, причем в некоторых наиболее впечатляющих дисплеях на одной голограмме помещаются оба типа изображения. Режим, в котором должен работать дисплей, определяется целью его применения. Обычно ценные произведения искусства демонстрируются за стеклом, так что действительное изображение объекта, наблюдаемое за стеклянной перегородкой, выглядит почти так же, как если бы за ней был помещен сам оригинал. Спроецированное изображение обеспечивает отображение объекта, непохожее на демонстрацию настоящего объекта. Не совсем обычное положение изображения в пространстве перед голограммой исказило бы процесс отображения ценных произведений искусства. То же самое относится и к голографическому хранению информации в плоскости эмульсии; хотя разрешение заметно улучшается, но при этом мы не имеем реального пространственного изображения объекта.

10.3.12. Изобразительная голография

Особая привлекательность голографии состоит в объемности воспроизводимого изображения. Это качество используется при голографическом отображении ювелирных изделий. На начальном

этапе при хранении изображений на галогенидосеребряных эмульсиях мешало наличие в них темно-серых или черных образований, но этот недостаток скоро был устранен благодаря химическому отбеливанию, которое позволило получать изображения на почти чистых стеклянных пластинках. Ранние попытки отбеливания были не вполне удовлетворительными, поскольку галогенид серебра имеет тенденцию к обесцвечиванию при длительном освещении. Для того чтобы свести к минимуму этот дефект, был разработан метод отбеливания и осветления, который дает замечательные результаты, если только голограмму не продержат несколько недель под прямыми солнечными лучами [8]. Очевидным решением было применение эмульсии, не содержащей фоточувствительного галогенида серебра; для исключения обесцвечивания, были перепробованы различные фотополимеры. Пожалуй, наилучшие результаты были получены с эмульсиями из бихромированной желатины, которые имеют все достоинства галогенидосеребряных эмульсий, но не оставляют никаких фоточувствительных составляющих после проявления. Бихромированная желатина имеет очень низкую чувствительность, что ограничивает ее применение голограммами лишь сравнительно небольших размеров, поскольку в таких голограммах высокие плотности энергии могут поддерживать время экспонирования на приемлемом уровне. Эти небольшие голограммы вполне хороши для получения дисплеев таких мелких предметов, как кулоны, броши, перстни и т. п. Голограммы ювелирных изделий выполняются таким образом, чтобы их можно было наблюдать в диффузном отраженном свете; это же относится и к отражательным голограммам плоских предметов, например монет, или голограммам сфокусированного изображения, спроецированного таким образом, что информация записывается вблизи плоскости эмульсии или непосредственно на ней. Имеется сообщение [1] о возможности прессования голограмм на пластичном материале, который позволяет изготавливать копии оригиналов весьма экономичным способом.

Существует еще одна область применения голографического отображения, которая пока не исследовалась достаточно глубоко, — это использование голографических дисплеев в архитектуре. Голографическим способом можно изготавливать оконные «цветные» стекла. В проеме окон можно было бы размещать голографические решетки и изображения и ориентировать их таким образом, чтобы в зависимости от угла падения солнечного света цвет окон в помещении менялся. Отдельные голографические элементы составляют в такую композицию, что цвет и форма составного изображения будут меняться в течение дня. Можно представить себе и другие значительно более эффективные применения голографии в архитектуре, а не только изготовление трехмерных фресок, создающих иллюзию окна «наружу». Автором была изго-

товлена, например, голограмма «ветряных колоколов», дававшая куда более красочный эффект, чем аналогичная выпускаемая промышленностью система оптических призм.

10.3.13. Применения трехмерных дисплеев

К настоящему времени имеется уже несколько попыток использования голографических методов для получения дисплеев произведений искусства. К сожалению, представители музеев и комиссий по искусству все еще не убеждены в достоинствах голографических дисплеев, за исключением достоинства новизны. Однако такое применение голографии позволило бы экспонировать более широко редкие и бесценные сокровища искусства, не подвергая их опасностям. Многие произведения искусства выполнены из материалов, имеющих какую-либо одну монохроматическую окраску, например из золота, нефрита, слоновой кости или иных драгоценных материалов, так что в этих случаях не требуется многоцветной голографии, чтобы получить вполне реальную копию оригинала. Кроме того, особо ценные экспонаты, как правило, демонстрируются помещенными внутри стеклянных колпаков, так что отбеленная голографическая запись дала бы в этом случае полную

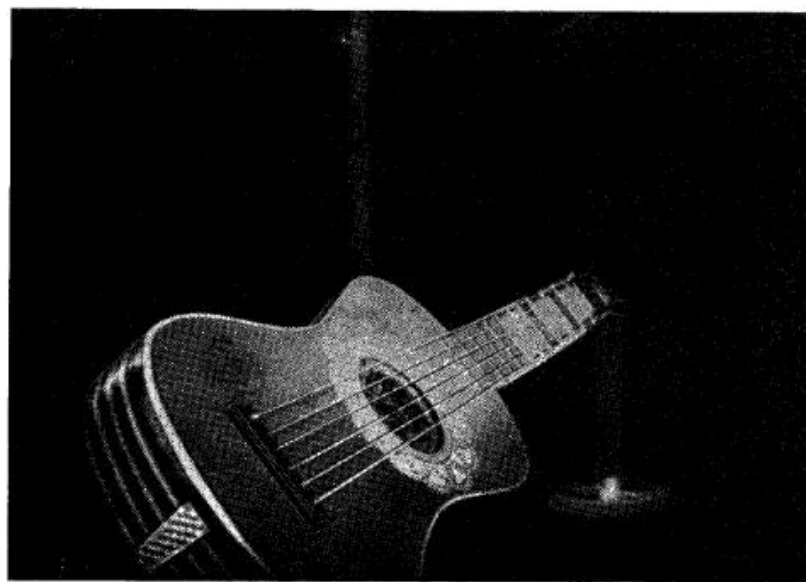


Рис. 7. Голографическое изображение гитары XVII в. (Фото печатается с любезного разрешения Ю. Упатниекса, Мичиганский институт по изучению окружающей среды.)



Рис. 8. Ж. Фурнье, как бы поддерживающий голографическое изображение Венеры Милосской в натуральную величину (1×1,5 м). (Фото печатается с любезного разрешения Ж. Фурнье и Г. Трибильона, Лаборатория общей физики и оптики, г. Безансон, Франция.)

иллюзию реальности, как если бы мы видели перед собой непосредственно сам оригинал.

Несколько лет назад Лейт и Упатниекс (Мичиганский институт по изучению окружающей среды) изготовили полный набор голографических дисплеев редких и ценных музыкальных инструментов из коллекции музыкальной школы Мичиганского университета, продемонстрировав достоинства голографического отображения тех предметов, которые обычно нелегко увидеть (рис. 7). Другую замечательную голограмму спроецированного изображения изготовили Трибильон и Фурнье¹⁾ (Лаборатория общей физики и оптики, г. Безансон, Франция). Это голографическое изображение Венеры Милосской из Лувра (рис. 8), выполненное на фотопластинке раз-

¹⁾ G. Tribillon, J. M. Fournier, частное сообщение, апрель 1977 г.

мерами 1×1,5 м, причем спроецированное изображение статуи имеет натуральную величину 2,18 м. Эти два примера ясно показывают, что голографическое отображение произведений искусства — верный путь к популяризации изящных искусств. Такое применение трехмерной изобразительной голографии, возможно, будет наиболее продуктивным.

10.3.14. Будущее изобразительной голографии

Трехмерная изобразительная голография должна выйти из стен лаборатории и стать достоянием художников, что обеспечит ей плодотворное будущее. Это не означает, что ученые перестанут проводить исследования в этой области, но новые идеи и предложения лучших путей использования метода, по-видимому, будут исходить от студентов, изучающих искусства, а также от тех, кто на практике применяет этот метод. Ученый получает удовлетворение, когда он решит задачу, опубликует результаты и получит признание своих коллег. Художнику же необходимо, чтобы его творение было признано публикой, а это как раз и есть то окружение, благодаря которому трехмерная голография будет развиваться и процветать.

Всегда рискованно предсказывать будущие события, но техника голографических дисплеев разработана более чем достаточно, и можно смело предполагать, что трехмерная голография будет использована для надежного отображения произведений искусства и сама станет видом искусства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benton S. A., «White light transmission/reflection holographic imaging», Proc. ICO Confer., Jerusalem, August 23—26, 1976.
2. Benton S. A., «Three dimensional holographic displays», Proc. Electro-optics/Laser Confer., New York, September 14—16, 1976, p. 481—485.
3. Boorstin D. J., «Tomorrow: the Republic of Technology», Time (Jan. 17), 1977, p. 36—38.
4. Dulberger L. H., Wixom C., Electron., 36, 44 (1963).
5. Gabor D., Nature, 161, 777—778 (1948).
6. Goodman J. W., Lehmann M., Jackson D. W., Knotts J., Appl. Opt., 8, 1561—1585 (1969).
7. Lehmann M., Holography, Technique and Practice, Focal Press, London, 1970.
8. Lehmann M., Lauer J. P., Goodman J. W., Appl. Opt., 9, 1948 (1970).
9. Leith E. N., Scientific American (Oct.), 80—95 (1976).
10. Leith E. N., Upatnieks J., J. Opt. Soc. Amer., 51, 1469 (1961).
11. Tsunoda Y., Takeda Y., IEEE Trans. Electr. Devices, ED-22, 784—788 (1975).
12. Upatnieks J., Leith E. N., J. Opt. Soc. Amer., 54, 579—580 (1964).

10.4. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Дж. Брандт

10.4.1. Сравнение голографической и классической интерферометрии

Любой классический интерферометр, который был разработан для измерения изменений длины оптического пути как на пропускание, так и на отражение от высококачественных оптических элементов, имеет соответствующий голографический аналог. Классические интерферометры характеризуются не столько устройством оптических элементов, сколько тем (так как это устройство может сильно меняться в зависимости от конкретного применения), являются ли интерферометрически сравниваемые волновые фронты почти плоскими или сферическими с относительно небольшими фазовыми отклонениями от идеального волнового фронта. Вследствие этого оптические элементы, используемые в составе классического интерферометра, должны изготавливаться с высокой степенью точности, чтобы не вносить паразитных полос в результирующую интерференционную картину. Наоборот, голография, позволяет восстанавливать волновые фронты с произвольным изменением фазы поперек волнового фронта, что открывает возможности применения в интерферометрии элементов с более низким оптическим качеством. Голографическая интерферометрическая система может быть выполнена на рассеивающих элементах, которые вообще нельзя использовать в классических методах. Поскольку в классических интерферометрах производится сравнение волновых фронтов, а не их запись, то такие приборы работают в реальном времени, что требует от оптических элементов интерферометра высокой стабильности и до некоторой степени столь же высокой стабильности изучаемого явления. С другой стороны, в голографическом интерферометре сравниваемые волновые фронты запоминаются, так что экспериментатору доступно еще одно измерение, а именно во времени. Наличие временной переменной является весьма существенной частью голографической интерферометрии, что привело к многочисленным новым ее применениям, играющим важную роль особенно в области изучения вибраций.

Классические интерферометры подробно обсуждаются в литературе (см. достаточно полные обзоры [37, 40]). В интерферометрах с разделением пучка, например в интерферометрах Маха — Цендера и Майкельсона, плоская волна разделяется на две волны, распространяющиеся по двум путям, один из которых проходит через исследуемую область, а по другому пути идет волна, играющая роль опорной. Второй светоделитель (или в случае интерферометра Майкельсона вторичное прохождение через светоделитель)

соединяет разделенные пучки, что приводит к образованию интерференционной картины поперек волнового фронта. Полосы этой интерференционной картины представляют собой линии, соответствующие постоянной разности длин оптических путей поперек волнового фронта. Голографически эти интерферометры получаются

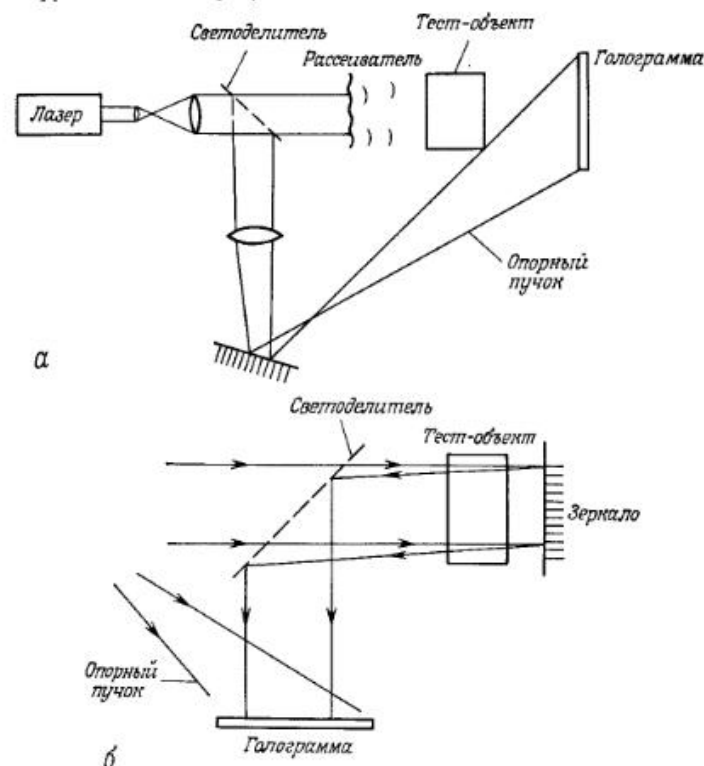


Рис. 1. Голографические аналоги классических интерферометров. *а* — однопроводный интерферометр типа интерферометра Маха — Цендера; *б* — интерферометр типа интерферометра Майкельсона с двукратным прохождением.

при замене светоделителя на голограмму (см. рис. 1, на котором изображены схемы голографической реализации двух таких интерферометров). Интерферометр образуется при записи голограммы данной последовательности оптических элементов [21, 22, 38]. Восстановление голограммы в том же месте, где она была записана, приводит к образованию опорного волнового фронта (т. е. созданного оптической системой в невозмущенном состоянии), который позволяет выполнить интерферометрические измерения последующих изменений в системе. Поэтому в принципе любая голограмма представляет собой интерферометр, в котором исходные волновые

фронты, сформировавшие эту голограмму, могут при восстановлении интерферировать.

В других классических интерферометрах светоделители и поляризующие элементы используются для сдвига волнового фронта в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Интерферометры сдвига сравнивают различные участки одного и того же волнового фронта и потому чувствительны к изменениям фазы поперек волнового фронта, а не к абсолютному значению фазы в данной точке. Голографический интерферометр сдвига реализуется на одной голограмме [14] или на двух голограммах волнового фронта (дальнейшее обсуждение этого метода см. в п. 10.4.4.3). В любом случае, независимо от того, осуществляется ли сдвиг до или после экспонирования голограммы, полученная информация оказывается идентичной той, которую дает неголографический интерферометр.

Голографические интерферометры, работающие в реальном времени, менее критичны к стабильности, чем их классические аналоги. Уникальным свойством голографии является способность записывать множество изображений на одну и ту же голограмму, причем при восстановлении они интерферируют как независимые волновые фронты. Интерферометрия с двойной экспозицией голограмм позволила ослабить на порядок критерий стабильности во времени экспозиции. Эта способность записывать волновые фронты за различное время, а также тот факт, что теперь в интерферометрии можно использовать произвольные волновые фронты [19, 20], сделали голографический подход гораздо более гибким, чем классический. Даже голограммы движущихся объектов содержат информацию о движении, причем изучение этих голограмм совершило переворот в исследованиях вибраций [32].

10.4.1.1. Рассеивающий и другие замечательные голографические интерферометры

Несмотря на то что ранние голографические интерферометры (по крайней мере, используемые при изучении течений) представлялись полными аналогами классических, скоро обнаружилось, что в оптическую систему можно включать оптические элементы без потерь интерферометрической информации [13]. Этот результат непосредственно следует из модифицированных основных уравнений голограммы, если на этапе восстановления использовать четвертый волновой фронт, распространяющийся вдоль направления исходного объектного пучка; следовательно, этот волновой фронт движется коллинеарно пучку «истинного изображения». В случае внеосевой голограммы выражение для амплитуды волны, восстановленной пучком вида $c \exp(i\varphi_c)$, дается выражением

$$V \exp i\varphi_v = \gamma c a r \exp i(\varphi_a - \varphi_r + \varphi_c), \quad (1)$$

где γ — коэффициент пропорциональности, зависящий от условий записи голограммы; c , a и r — амплитудные члены, являющиеся, как и фазовые члены φ_a , φ_r и φ_c , функциями поперечных координат x и y голограммы, причем индексы a , r и c относятся соответственно к исходной объектной, опорной и восстанавливающей волнам. При наличии исходного объектного пучка, как это бывает в случае голографической интерферометрии в реальном времени, в уравнении (1) появляется дополнительный член вида $a' \exp i(\varphi_a + \Delta\varphi(x, y))$, чтобы учесть модифицированную волну, фаза которой меняется поперек волнового фронта на величину, описываемую членом $\Delta\varphi(x, y)$. При восстановлении с одновременным использованием модифицированной объектной волны интенсивность волны вдоль направления восстановленного пучка изменяется на величину, равную квадрату суммы двух волн. Осуществляя те же операции, что и при выводе уравнения исходной голограммы, находим выражение для интенсивности интерференционной картины двух волн:

$$I = (\gamma c a r)^2 + a'^2 + \gamma c a r a' \{ \exp i(\Delta\varphi_a + \varphi_r - \varphi_c) + \exp [-i(\Delta\varphi_a + \varphi_r - \varphi_c)] \}. \quad (2)$$

Преобразуя это выражение, его можно привести к косинусному распределению интенсивности:

$$I = (\gamma c a r)^2 + a'^2 + 2(\gamma c a r a') \cos(\Delta\varphi_a + \varphi_r - \varphi_c). \quad (3)$$

Это выражение показывает, что интенсивность света изменяется по косинусу с оптической разностью фаз $\Delta\varphi_a$, причем относительная глубина модуляции имеет вид

$$F_{\text{мод}} = 2c a r a' / [(\gamma c a r)^2 + a'^2]. \quad (4)$$

Из выражения (3) следует, что интенсивность света на выходе любого голографического интерферометра, работающего в реальном времени, содержит член, который зависит от разностей фаз, вводимых в любой пучок, падающий на голограмму в промежутке времени между этапами записи и восстановления. Этот член добавляется к тем изменениям интенсивности, которые связаны непосредственно с интенсивностями самих пучков. В действительности различия между объектным, опорным и восстанавливающим пучками в голографической интерферометрии не играют никакой роли, поскольку при суперпозиции голографического и объектного волновых фронтов изменение фазы $\Delta\varphi(x, y)$ любого из них дает одну и ту же интерференционную картину.

До тех пор пока с голограммы можно восстановить один из волновых фронтов, записанных на ней, она представляет собой совершенный интерферометрический элемент, поскольку при восстановлении в точности воссоздается изменение амплитуды или фазы поперек волнового фронта. Глубина модуляции, определяемая выражением (4), имеет большое практическое значение, ибо от нее

зависит, насколько четко видны интерференционные полосы и сколь точно можно измерить их положение. Глубина модуляции, а следовательно, и контраст полос максимальны, когда амплитуда восстановленного изображения (пропорциональная величине $\gamma a r$) равна амплитуде a' на освещенном изображении, пропущенном через голограмму. На практике в голографической интерферометрии в реальном времени максимальный контраст полос поддерживается фильтрацией объектного и восстанавливающего пучков, так чтобы восстановленное изображение и объект имели одинаковую яркость. Поскольку для большинства голограмм дифракционная эффективность не превышает 10% [т. е. в выражении (1) величина $\gamma a r < 0,1$], эта операция состоит в уменьшении освещенности объекта и увеличении интенсивности восстанавливающего пучка во время работы. Очевидно, что высокая эффективность восстановления весьма полезна для исследований в реальном времени.

Применение методов двойной экспозиции или множества голограмм позволит использовать аналогичный анализ, для того чтобы предсказать интенсивность света в голографической картине восстановленного изображения. В этих случаях дифракционная эффективность обоих голографических изображений одинакова, из чего следует, что контраст полос в интерферограммах с двойной экспозицией равен приблизительно 100%. Поскольку контраст полос при голографировании методом двойной экспозиции не зависит от параметров записи голограммы и общей эффективности восстановления, во многих случаях применение этого метода значительно облегчает работу по сравнению с интерферометрией в реальном времени.

В голографических интерферометрах в отличие от классических интерференционных полосы формируются, даже если волновые фронты объектных пучков испытывают очень сложные пространственные изменения фазы. Поэтому голографическая интерферометрия позволяет изучать (с интерферометрической точностью) диффузно отражающие или пропускающие объекты, которые просто невозможно приспособить к классическим интерферометрам. Такая гибкость представляет собой лишь одно из уникальных преимуществ голографического подхода в интерферометрии.

10.4.1.2. Время как четвертое измерение в голографической интерферометрии

Классические интерферометры являются по существу устройствами, работающими в реальном времени, поскольку различные оптические элементы, входящие в их состав, зафиксированы, а запись в эксперименте производится лишь на выходе. Со времени получения первых экспериментальных результатов по голографической интерферометрии в режиме усреднения по времени [32]

были разработаны и некоторые другие методы, в том числе метод двойной экспозиции, стробоскопический метод, а также методы работы в режиме одиночного импульса и многократных импульсов [1, 5, 26, 31, 44]. Когда голограмма экспонируется, а затем обрабатывается на месте или перемещается сразу после обработки, она действует как комбинация светоделителя и формирователя волнового фронта; при этом, поскольку непосредственно сравниваются два волновых фронта в реальном времени, такая схема почти полностью аналогична классическому интерферометру. Единственное, чем отличается голографическая интерферометрия от классической, — это тем, что она использует время как четвертое измерение.

Дважды экспонированный на одной пластинке тест-объект восстанавливается как два независимых волновых фронта, и, таким образом, одна голограмма после восстановления может действовать как полный интерферометр. Многократное экспонирование голограммы дает тот же эффект, что и двойное, с той лишь разницей, что в первом случае экспозиция синхронизуется с временными изменениями изучаемого объекта. В частности, если стробоскопический голографический интерферометр синхронизован с периодом вибраций тест-объекта, то при этом на кадрах наблюдаются амплитудные значения сдвига для данного типа вибрации, если период и фаза стробирующего импульса выбраны так, что экспозиции приходятся на максимум и ноль цикла вибрации. Многократное экспонирование с переменной фазой действует так же, как и многолучевая интерферометрическая схема, в которой различные вклады суммируются с разными фазами, а результат представляет собой среднеквадратичное значение этих сумм. В этом примере интенсивность полос интерференционной картины является функцией среднего фазового изменения на голограмме за время экспозиции. Если эти фазовые изменения случайны и некоррелированы, то голограмма не получается. Коррелированные фазовые изменения, например создаваемые синусоидальным или линейным движением объекта во время экспозиции, приводят к интерференционным картинам, которые можно предсказывать [24, 44]. При этом восстановленное с голограммы изображение, вообще говоря, является функцией временной когерентности света и может быть использовано как мера этой когерентности.

10.4.1.3. Требования к источнику света

Точно так же, как и в изобразительной голографии, в голографической интерферометрии предпочтительно применять высокостабильные одномодовые лазеры, поскольку яркость восстановленного с голограммы изображения сильно зависит от когерентности света, используемого при записи голограммы. Однако, если экспериментатору недоступен источник когерентного света достаточной

мощности, интерферометрия может быть осуществлена и с менее идеальным источником, но при условии, что в оптическом устройстве происходит компенсация длин оптических путей и согласование волновых фронтов [12]. Так как ни один лазер не дает совершенно когерентного света, в любом эксперименте необходимо некоторое согласование; способы такого согласования мы обсудим в разделах, посвященных рассмотрению отдельных экспериментов.

Медленно меняющиеся явления и явления, в которых происходят периодические колебания, изучают с применением лазеров непрерывного действия. Среди них наиболее популярным является He—Ne-лазер, диапазон достижимых мощностей которого лежит в пределах от долей до 100 мВт. В тех случаях, когда для изучения больших объектов требуется более высокая выходная мощность, применяют аргоновый ионный лазер, дающий на одной линии в одномодовом режиме мощность в несколько ватт. В многомодовом режиме аргоновый лазер в видимой области спектра обеспечивает мощность 10 Вт и более. Для исследования повторяющихся явлений можно использовать либо непрерывный лазер с различными обтюраторами, либо лазер с генерацией повторяющихся импульсов. Имеются аргоновые лазеры с длительностью импульса порядка 20 мкс, пиковой мощностью 5 Вт и с частотой повторения импульсов до 20 кГц. Для многих экспериментов эти параметры являются удовлетворительными. Интерферометрия больших объектов, движущихся с высокими скоростями, требует применения рубиновых лазеров, работающих в импульсном режиме. Выходная энергия в импульсе типичного «голографического» рубинового лазера составляет 30 мДж при длительности импульса 20 нс. Для увеличения энергии до нескольких джоулей можно использовать каскады усилителей, однако большие лазерные системы на рубине недешевы и сложны в эксплуатации.

В заключение следует заметить, что в голографической интерферометрии требования к источникам света те же самые, что и в самой голографии; собственно, необходимо иметь достаточную световую энергию для освещения объекта, чтобы голограмма была проэкспонирована должным образом, и достаточную когерентность света, так чтобы голограмма могла быть сформирована. В действительности испытуемый объект предъявляет дополнительные требования к мощности и длительности экспозиции источника света. В конечном счете то, насколько источник приближается к идеальному, определяется для данной задачи финансовыми возможностями экспериментатора.

10.4.2. Интерферометры для прозрачных сред

Вообще говоря, голографические устройства, предназначенные для изучения прозрачных сред (например, потоков в них, теплопередачи и т. п.) и для проверки оптических элементов, по строению

аналогичны своим классическим аналогам. Методы восстановления голограмм могут различаться в зависимости от типа голограммы, рассеивающая она или нет. Голографические интерферограммы интерпретируются так же, как и в классическом случае, однако благодаря относительной простоте получения многократных изображений или информационных точек голографический метод практически может стать значительно более мощным, чем классический. Хотя большинство работ по голографии выполнялось в лабораторных условиях, когда вибрацию, воздушные потоки и оптическую нестабильность легко проконтролировать с помощью некоторых практических методов, аналогичные эксперименты можно успешно выполнить в относительно неблагоприятных полевых условиях.

10.4.2.1. Геометрия схемы и некоторые устройства

Наиболее простыми устройствами для изучения прозрачных сред являются голографические аналоги однопроходного интерферометра Маха—Цендера и двухпроходного интерферометра Майкельсона (см. рис. 1). В этих устройствах опорный пучок играет роль просто одного из плеч классического интерферометра. Поскольку процессы записи и сравнения волновых фронтов осуществляются голографически, очень многое зависит от схемы построения оптических элементов. Использование одного или многих прохождений света обычно определяется самим экспериментом. В случае среды с большим преломлением или с сильной турбулентностью, в которой луч света заметно отклоняется от прямой линии, предпочтительно использовать устройство с одним прохождением. В этом же случае проще осуществить интерпретацию интерференционных полос, чем когда луч дважды проходит через среду; кроме того, если луч не должен точно повторять свой путь, можно в качестве объектного пучка использовать пучок с неплоским волновым фронтом.

В некоторых экспериментах физическая природа испытуемого объекта может быть такова, что объектный пучок невозможно направить на голограмму без того, чтобы он вторично не прошел через объект. В этом случае удобно использовать аналог двухпроходного интерферометра Майкельсона, поскольку позади тест-объекта нужно установить лишь одно зеркало. Это зеркало, установленное с осторожностью, может быть смонтировано независимо от остальной части голографического устройства. При двойном прохождении пучка чувствительность интерферометра удваивается, что может быть очень важно в случае, когда исследуемое явление связано с небольшими фазовыми сдвигами и, следовательно, с малыми рефрактивными эффектами. Для правильной расшифровки интерферограмм многократного прохождения требуется, чтобы лучи объект-

ного пучка повторяли свои траектории, возвращаясь через объект; для выполнения этого условия оптическая система должна быть ретрофокусной. Иными словами, либо за объектом следует располагать плоское зеркало, которое отражало бы коллимированный объектный пучок, либо нужно использовать сферическую объектную волну с искривленным зеркалом, кривизна которого согласована с кривизной волнового фронта с обратной стороны объекта.

За исключением случая применения коллимированного объектного пучка, нет необходимости в том, чтобы диаметры линз и фокусирующих зеркал были бы равны диаметру объекта. Это позволяет удешевить аппаратуру, предназначенную для исследования крупных объектов. Если размеры объекта больше голограммной пластинки, то для сужения объектного пучка до диаметра голограммы потребуются линзы. Для этой цели можно применять простые линзы с таким же оптическим качеством, какое требуется для обеспечения необходимого качества изображения окончательной интерференционной картины. Тот факт, что в голографических интерферометрах оптические элементы не обязательно должны обладать очень высоким оптическим качеством, приводит к значительному удешевлению аппаратуры, особенно в случае больших апертур.

Если бы лазер, используемый при создании голограмм, давал абсолютно когерентный свет, то не требовались бы никакие меры для компенсации разности длин оптических путей между объектным и опорным пучками. К сожалению, линии излучения всех лазеров имеют конечную ширину, вследствие чего их можно характеризовать длиной когерентности L , которая (в грубом приближении) равна максимальной разности длин оптических путей между объектным и опорным пучками, при которой еще получаются стационарные кадры с высоким контрастом интерференционных полос. Если спектральная линия лазера имеет ширину Δf , то длина когерентности L связана с Δf следующим соотношением (см. [15, стр. 41])¹⁾:

$$L = c / \Delta f, \quad (5)$$

где c — скорость света в среде, в которой осуществляется эксперимент. Для лазеров максимальная ширина Δf генерации определяется естественной шириной линии (или линий) в среде лазера. Например, для аргонового лазера Δf составляет величину порядка 3 ГГц, что соответствует длине когерентности, когда никакой селекцией мод уже не уменьшить число осциллирующих мод внутри естественной линии, меньше сантиметра. Для уменьшения Δf , приводящего к увеличению L , используется много различных методов. Однако в некоторых случаях потери мощности излучения,

обусловленные этими методами, оказываются недопустимо большими, и поэтому приходится утешаться малой длиной когерентности. В таких случаях нужно проявить большое искусство, чтобы длины оптических путей пучков были одинаковыми. Даже при лазерах с высокой когерентностью излучения разность длин путей нужно сводить к минимуму. Компенсацию длин путей можно осуществить, используя на пути опорного пучка небольшие зеркала для того, чтобы изогнуть траекторию опорного пучка перед его фокусировкой в апертуру голограммы.

Очень важно соблюдать симметрию оптических элементов, поскольку фазы любых участков волнового фронта не идентичны, если только не используется идеальный одномодовый лазер. В случае применения многомодовых лазеров для достижения высокой мощности имеет большое значение пространственное согласование волновых фронтов опорного и объектного пучков на голограмме, так чтобы контраст полос оставался постоянным. На раннем этапе развития, когда в голографии использовались импульсные лазеры, многое зависело от тщательности согласования волновых фронтов; было разработано несколько устройств, обеспечивающих то, чтобы волны прибывали в плоскость голограммы с перекрытием одних и тех же участков [12]. После того как с помощью оптических элементов удалось скомпенсировать разности длин оптических путей и согласовать волновые фронты, необходимо соблюдать осторожность, чтобы направление поляризации обоих пучков сохранялось без изменения, ибо ортогонально поляризованные пучки не интерферируют и, следовательно, не могут сформировать голограмму.

После того как лазерный пучок разделится на опорный и объектный пучки, относительное движение этих пучков может вызвать разность длин оптических путей, в результате чего на интерферогамме появятся паразитные полосы. Относительное движение пучков должно быть сведено к минимуму либо путем использования очень жесткой конструкции оптических элементов, либо нужно уметь так управлять этим движением, чтобы экспонирование осуществлялось в тот момент, когда разность длин путей минимальна. Движение лазерного пучка относительно светоделиителя не оказывает влияния на разность длин оптических путей между объектным и опорным пучками; таким образом, не обязательно, чтобы местоположения лазерного пучка и светоделиителя были жестко связаны (это существенное замечание для случая, когда лазер слишком велик, чтобы его можно было жестко закреплять в той же системе, что и вся остальная оптика). Когда допускается движение входного пучка относительно интерферометра, то, если волновые фронты пучков не были согласованы, относительные положения соответствующих лучей в опорном и объектном пучках меняются. Интерферометрические структуры, обладающие определенной сим-

¹⁾ Ссылка на страницу дана для русского перевода книги. — Прим. ред.

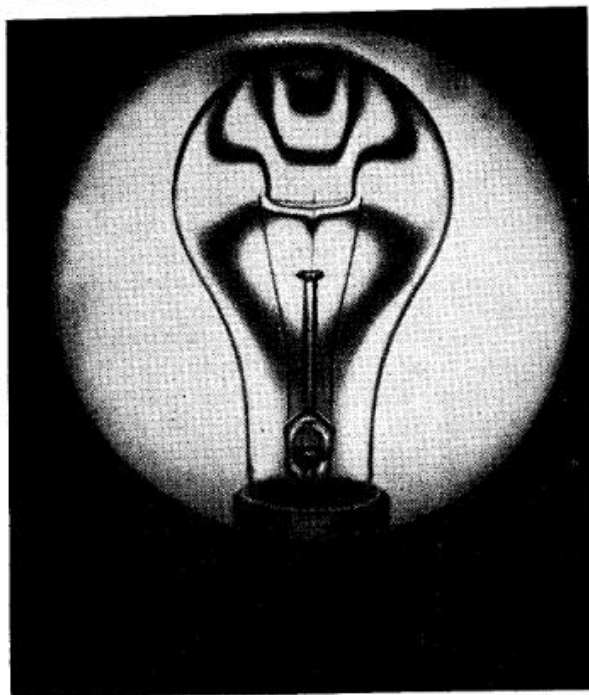


Рис. 2. Диффузная голографическая интерферограмма 100-ваттной лампы накаливания, работающей при неполной мощности. Одна экспозиция была сделана при выключенной лампе, а другая — при включенной. Видны интерференционные полосы, образуемые благодаря нагретому газу внутри колпака.

метрий, сводят на нет влияние этого относительного движения [29]. Всякий раз, когда оба пучка интерферометра испытывают одинаковое число отражений в данной плоскости, перемещение этих пучков, связанное с движением входного пучка, будет тем же по величине и направлению. Такой принцип должен использоваться в голографических экспериментах при наличии движения входного пучка.

Поскольку в голографической интерферометрии могут быть использованы волновые фронты с произвольным пространственным изменением фазы, за объектом можно поместить рассеиватель, освещающий объект лучами во многих направлениях. В этом случае в голограмме содержится информация о различных оптических путях лучей, проходящих через объект, а изображения, восстановленные с различных частей голограммы, можно использовать для получения информации о трехмерной природе искажений внутри объекта. Типичным примером такой голограммы является дважды экспонированная голограмма лампы, показанная на рис. 2. В этой структуре протяженный диффузный источник, расположенный за

исследуемым объектом, создает множество лучей, регистрируемых на голограмме, распространяющихся через объект в широком диапазоне углов и исходящих из каждой точки источника. В голограммах с двойной экспозицией диффузным светом полосы часто расположены вблизи рассеивателя, где их можно легко сфотографировать для дальнейшего изучения. Однако если в районе объекта существует сильный градиент показателя преломления, то положение полос существенно зависит от характера изменений показателя преломления среды объекта и различные части интерференционных полос могут оказаться в фокусе в различных точках пространства [43]. Тем не менее преимущества, связанные с наличием трехмерной информации о разностях длин оптических путей, перевешивают недостаток, обусловленный расфокусированностью полос.

Если уделять должное внимание геометрическим аспектам экспериментальной установки, то интерферометрические эксперименты можно успешно осуществлять в относительно неблагоприятных условиях [41, 46]. Наиболее полное использование голографического метода обычно предусматривает комбинирование диффузных и недиффузных голограмм.

10.4.2.2. Методы восстановления

Для голографической интерферометрии в реальном времени при восстановлении можно использовать лишь исходный опорный пучок; однако дважды экспонированная голограмма дает богатый выбор методов восстановления. В интерферометрии, как и в других областях применения голографии, идеальное восстановление имеет место только в том случае, когда используется точная копия опорного пучка. Для удовлетворительного восстановления диффузных голограмм прозрачных объектов необходимо монохроматическое освещение, поскольку диффузные голограммы содержат широкую полосу пространственных частот, вследствие чего в полихроматическом восстанавливающем свете изображение смазывается.

Однако в случае недиффузных объектных пучков, таких, например, какие применяются в голографических вариантах классических интерферометров, голограммы можно восстанавливать в белом свете. В таких голограммах разности углов лучей малы и информация содержится в виде, соответствующем сравнительно небольшой полосе частот около несущей пространственной частоты голограммы.

В этом примере, как и в случае голограмм сфокусированного изображения [7], пространственная и временная когерентность восстанавливающего источника света не играет роли, поскольку информация о полосах находится в плоскости голограммы. Каждый участок голограммы действует как плоский элемент решетки, ко-



Рис. 3. Восстановление голограммы сфокусированного изображения, на которой записаны потоки в аэродинамическом каскаде. Поток идет сверху вниз. Разрывы в картине полос вниз по потоку связаны с ударными волнами. Темные линии, идущие через лопасти, представляют собой опорные отметки. Голограмма восстанавливалась в белом свете, поэтому фон между полосами окрашен.

который однозначно соответствует определенному участку объекта. При восстановлении контраст изображения прямо пропорционален контрасту полос в данной точке. Так как контраст полос является функцией разностей длин оптических путей, вводимых в промежутке между экспозициями голограммы, интерферометрическая информация содержится непосредственно в плоскости голограммы. Освещение белым светом дважды экспонированной голограммы сфокусированного изображения дает вследствие дифракции окрашенное изображение при высоком контрасте полос и темное при низком. Таким образом, голограммы сфокусированного изображе-

ния сравнительно просто можно восстанавливать в белом свете. Концентрация интерферометрической информации в плоскости изображения предохраняет не только от дифракционного смаза полос, но также и от смаза изображения, связанного с конечными размерами источника света. На рис. 3 приведен пример такого восстановления.

Однако такая гибкость метода благодаря использованию источника белого света не дается бесплатно. При восстановлении изображение появляется на расстоянии Z_1 от плоскости голограммы, определяемом голографической формулой

$$1/Z_1 = 1/Z_c + 1/Z_o - 1/Z_r, \quad (6)$$

где Z_c , Z_o и Z_r соответственно расстояния от голограммы до источников восстанавливающего, объектного и опорного пучков. Из этой формулы следует, что в общем случае, когда восстанавливающий источник расположен по ту же сторону от голограммы, что и

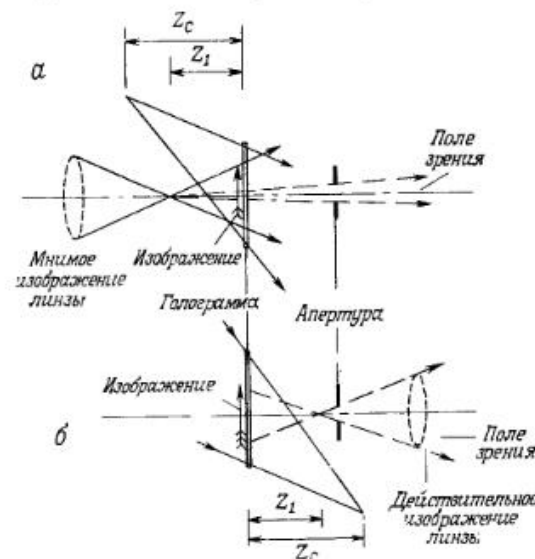


Рис. 4. Геометрия схемы восстановления голограмм сфокусированного изображения прозрачных объектов. Изображение видно в конусе света, угловая протяженность которого определяется параметрами, используемыми при изготовлении и восстановлении голограммы.

исходный опорный пучок, за голограммой создается мнимое изображение объекта. Как видно из рис. 4, это усиливает ограничение поля зрения голограммы, поскольку одновременно освещается эффективно лишь небольшая ее часть в угловом ракурсе. Однако такое положение вещей можно исправить соответствующей уста-

новой оптических элементов [9] либо при записи голограммы, либо при ее восстановлении, вследствие которой создается действительное изображение объекта. Теперь, если поместить систему, формирующую изображение, например глаз или входное окно камеры линз, в точку расположения действительного изображения, то восстановление осуществляется по всему полю голограммы. Так как оптическая система наблюдения перемещается в плоскости, перпендикулярной полосам голограммы, из-за дифракции на решетке голограммы меняется цвет восстановленного изображения. С другой стороны, поле зрения не меняется, пока оптическая система наблюдения располагается внутри конуса света, восстановленного с голограммы.

Когда при восстановлении голограмм прозрачных сред используется лазер так, как показано на рис. 4, то из голограммы можно извлечь дополнительную информацию [38]. Сведения о градиенте показателя преломления можно получить теневым методом, помещая в фокусе пучка от восстановленного объекта теневой нож или другой экран. Изображение лучей, которые прошли мимо теневого ножа, дает информацию о градиентах показателя преломления, записанных на голограмме.

Теневую информацию о вторых пространственных производных показателя преломления можно также получить с голограмм этого типа непосредственным фотографированием восстанавливающего пучка, прошедшего через голограмму. Области с очень сильным градиентом показателя преломления, такие, например, как области вокруг ударной волны, будут выглядеть на восстановленном изображении темными, поскольку лучи света, прошедшие через эти области, из-за сильной кривизны преломляются за пределы апертуры. Это явление полезно в целях определения координат таких областей, но внутри них интерферометрия невозможна, в силу того что лучи через них прямо не идут.

10.4.2.3. Преобразование данных

В любом случае, когда используются режимы работы в реальном времени или с двойной экспозицией, основная информация, обеспечиваемая интерферометрией прозрачных объектов, представляется в виде интеграла по оптическому пути, который проходит луч от источника до плоскости наблюдения, от разности длин оптических путей Δl между двумя экспозициями голограммы. В случае работы в реальном времени интеграл представляет собой разности оптических путей в состояниях между моментом записи голограммы и настоящим моментом времени. Величина Δl дается вы-

ражением

$$\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\int_{t_1}^{t_2} n(p) dp - \int_{t_1}^{t_2} n(p) dp \right], \quad (7)$$

где p — координата вдоль оптического пути, $n(p)$ — показатель преломления вдоль пути, а t_1 и t_2 — времена экспозиции. Проблема преобразования данных в основном связана с получением из выражения (7) значений показателя преломления $n(p)$ вдоль оптического пути. В общем случае этого сделать нельзя, за исключением определенных случаев с упрощенной симметрией (задача инверсии Абея). К счастью, большинство практических задач можно свести к экспериментальным построениям либо с плоской, либо с цилиндрической симметрией, для которой задача инверсии Абея решается сравнительно просто. Например, при измерении потоков в каскадах турбинных лопатки однородной толщины заключены между параллельными окнами. Если предположить, что влияние потока вблизи границы окон незначительно, то выражение (7) становится тривиальным, вследствие того что при этом предположении в любой точке величина Δl равна просто произведению показателя преломления в данной точке на расстояние между окнами. Поскольку каждый интервал Δl на определенной длине волны дает полосу (переход от белого к черному и наоборот), интерферограмма представляет собой контурную карту поля показателей преломления в потоке.

Из распределения показателей преломления можно получить информацию о температуре, давлении или поляризуемости жидкости, если использовать соответствующие данному эксперименту физические соотношения. Обсуждение этих соотношений выходит за рамки нашего изложения.

10.4.2.4. Устранение неоднозначности при расшифровке интерференционной картины

В голографической интерферометрии, как и в классической, для устранения неоднозначности, связанной с невозможностью отличить положительный фазовый сдвиг от отрицательного, полезно применять интерферограммы ограниченных полос. В случае интерферограмм стационарных явлений этой неоднозначности можно избежать путем наклона плоскости волнового фронта на некоторый угол в известном направлении между экспозициями дважды экспонируемой голограммы. В результате будет образовываться фон в виде прямых полос, которые можно использовать для определения того, насколько изменяется длина оптического пути в образце. Положительные и отрицательные отклонения величины Δl вызывают смещения полос в противоположных направлениях; аб-

солютное определение увеличения или уменьшения оптической фазы можно осуществить, если фоновая картина полос поддается расшифровке. Для этого надо знать истинный угол наклона между экспозициями или, что встречается чаще, природу изучаемого явления. Изменение угла θ объектного пучка между двумя экспозициями интерферограммы создает полосы с шагом

$$D = n\lambda/2 \sin(\theta/2) \quad (8)$$

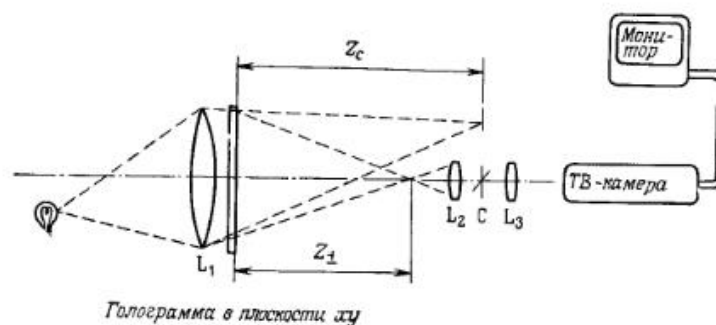
вдоль направления, перпендикулярного к оси наклона. Эта фоновая картина складывается с той, которая создается изменением показателя преломления Δn ; это изменение Δn при толщине объекта t дает увеличение разности длин оптических путей на величину $\Delta l_{\Delta n} = 2 \Delta n t/\lambda$.

(9)

Это выражение можно рассматривать как возмущающий член в картине, описываемой формулой (8). Таким образом, по отклонениям прямых полос [см. выражение (8)] можно установить относительную величину изменения Δl по формуле (9). Во многих экспериментах наблюдаются участки интерферограммы с меньшим показателем преломления, поскольку экспериментальным условиям свойственны состояния с более низкими давлением или температурой. В большинстве внелабораторных экспериментов, особенно в случае голографии с применением импульсных лазеров, такой метод расшифровки полос представляется практически более полезным, чем добавление фоновых полос.

10.4.2.5. Измерение координат интерференционных полос

Хотя путем визуального наблюдения интерферограммы и можно получить важную качественную информацию, для получения количественных характеристик информации требуется измерять координаты полос и определять их порядок в пределах крупных участков интерферограммы. Определение порядка полос лучше всего достигается визуальной их расшифровкой с учетом известной природы изучаемого явления. Координаты каждой полосы можно измерить вручную с помощью масштабной линейки или оптических компараторов, но для оператора такие измерения очень утомительны, если они хотя бы частично не механизированы. Одно из решений проблемы получения из интерферограммы количественной информации включает частичную механизацию процесса измерения, при этом такие достоинства оператора, как способность визуально определять порядок и расположение полос, сочетаются со способностью машины точно измерять и регистрировать координаты. На рис. 5 показана одна из реализаций такого прибора, в котором восстановленное с голограммы изображение с помощью оптической системы подается на телевизионный монитор. Шаговые



а



Рис. 5. а — схема полуавтоматического прибора для информационной расшифровки полос голограммы; б — внешний вид укомплектованного прибора.

двигатели и соответствующее электронное устройство позволяют перемещать голограмму относительно координатной сетки до тех пор, пока визирный крест не совпадет с измеряемой полосой. Затем оператор убирает координатную сетку и во время считывания отмечает порядок полосы нажатием сигнальной кнопки. Включается миникомпьютер, который записывает координаты и порядок полосы для данной информационной точки. Таким путем можно быстро получить данные для большого числа точек полосы. Безусловно, для специальных применений возможен и автоматический вариант системы расшифровки полос [18]. Однако система обобщенной расшифровки интерферограмм настолько сложна, что наиболее приемлемым с экономической точки зрения представляется автоматическое измерение в сочетании с визуальной расшифровкой оператором.

10.4.2.6. Интерферометрические измерения в полевых условиях

С помощью голографической интерферометрии можно осуществить много интересных и полезных экспериментов в лабораторных условиях. Однако изучение потоков, теплопередачи, ударных волн и вибраций требует, чтобы эксперименты проводились в менее идеальных условиях. Осложнения, связанные с присутствием внешнего освещения (которое может экспонировать голограмму), наличие пыли (приводящее к порче оптических элементов) и относительная нестабильность оптических элементов, составляющих голографическую установку, обязательно должны учитываться при разработке прибора. В настоящее время разработан такой прибор, называемый «голокамерой» или устройством для восстановления голограмм. Механические затворы и фильтры хорошо предохраняют от попадания случайного света, а основательная механическая конструкция гарантирует жесткость оптики. Вообще говоря, полезно заключать опорный и объектный пучки внутри непрозрачных герметичных трубок или мехов, в которых можно как уменьшить влияние турбулентности на интерферограмму, так и обеспечить безопасность персонала от случайного попадания под лазерный пучок.

Помимо того что работа в полевых условиях сопровождается шумами и вибрацией, изучаемые явления, как правило, имеют короткое время жизни (они могут быть одиночными или повторяющимися). При изучении быстротекущих процессов приходится применять импульсные лазеры, из которых самым совершенным и часто используемым является рубиновый лазер с модулируемой добротностью [12]. Номинальная длительность импульса этого лазера 20 нс, т. е. достаточно коротка, чтобы исключить влияние инфразвуковых явлений. В случае прозрачных объектов выходная

энергия лазера 10—50 мДж в одномодовом режиме достаточна для экспозиции даже не очень чувствительных голограммных пластинок, поскольку при прохождении света через оптическую систему потери очень малы даже при наличии рассеивателей. Экспонирование тестовой камеры сначала в невозмущенном, а затем в исследуемом состоянии светом от лазера с генерацией одиночных импульсов позволяет получить дважды экспонированную интерферограмму.

Быстропротекающие процессы, например околзвукковые турбулентные течения в турбинах, легче всего исследовать с помощью лазера, работающего в режиме генерации двух импульсов. В этом режиме интервалы между импульсами задаются электронной системой управления лазером и в зависимости от типа лазера могут иметь значения от 40 нс до нескольких секунд. Если необходимо иметь последовательность импульсов с интервалами, близкими к длительности импульсов, то нужно применять лазер с генерацией в режиме многократных импульсов. При работе лазера в режимах как одиночных, так и двойных импульсов необходимо обеспечить, чтобы лазер запускался одновременно с наступлением изучаемого явления. Если исследуются вращающиеся механизмы, то к вращающимся частям необходимо прикрепить магнитоиндукционный или оптический датчик, чтобы сформировать импульс, который после электронной обработки в нужное время зажжет лазер. В тех случаях, когда электрические сигналы сами создают изучаемое явление, наподобие того, как искра приводит к ударной волне, синхронизация может быть целиком электронной и составлять часть эксперимента. Если интервалы между многократными импульсами лазера должны быть порядка единиц или десятков наносекунд, то для получения фиксированной задержки между импульсами, между лазером и объектом можно ввести разность длин оптических путей. Поскольку свет в воздухе проходит за 1 нс расстояние, равное 30 см, в больших комнатах можно получать задержки, составляющие сотни наносекунд. Когда в эксперименте используются различные пути, приходится предусматривать средства компенсации опорного пучка, так чтобы в плоскости голограммы импульсы опорного и объектного пучков перекрывались одновременно.

Даже когда исследуются квазистатические явления, например каскадные потоки или теплопередача, может потребоваться синхронизация лазера, для того чтобы обеспечить работу «голокамеры» вместе с изучаемым явлением. Например, в исследованиях каскадных потоков применялся одноплечевой голографический аналог интерферометра Майкельсона [9], причем зеркало, которое помещалось за объектом, во многих случаях монтировалось на подставке, развязанной с основой, на которой крепилась остальная оптическая часть камеры. Любое движение зеркала относительно камеры влетает за собой формирование фоновой картины на голограмме. В од-

ном из экспериментов [9], для того чтобы исключить или хотя бы иметь возможность контролировать этот фон, нужно было управлять ориентацией зеркала относительно основы, на которой устанавливались оптические элементы. Пучок He—Ne-лазера низкой мощности проходил через объект, отражался от зеркала и возвращался, попадая на структуру точечных фотодиодов, расположенных на оптическом столе, который служил основой для остальных оптических элементов. Простая электронная схема совпадения гарантировала, что лазер запустится только в том случае, когда отраженный луч возвратится через диафрагму. Таким образом гарантировалась для двух экспозиций юстировка зеркала относительно оптических элементов.

Для успешной работы голографических интерферометров не требуется очень высокое оптическое качество линз и входных окон; это обусловлено тем, что голографическая интерферометрия в основном представляет собой метод сравнения произвольных волновых фронтов. Тем не менее в тех экспериментах, в которых между экспозициями имеет место значительное боковое смещение или термическая дисторсия материала окна, необходимо, чтобы окна были изготовлены из высококачественного материала во избежание возникновения паразитных интерференционных картин, связанных с оптическими неоднородностями окна. Когда необходима ширен-или теневая информация, на интерферограмме воспроизводятся полосы и другие оптические несовершенства вместе с градиентами преломления, связанными с исследуемым объектом. Наконец, если оптика недостаточно хорошего качества, чтобы четко воспроизводить объект, то очевидно, что картины, создаваемые исследуемым явлением, нельзя ассоциировать с определенным положением в исследуемом объекте.

10.4.2.7. Заключительные замечания

В тех областях применения, где для визуализации прозрачных сред необходима работа голографических систем в полевых условиях, можно получить удовлетворительные результаты при условии, что компоненты эксперимента подверглись тщательному рассмотрению. Если соответствующие зеркала и окна обеспечивают оптический доступ к области исследуемого объекта, то при правильной конструкции и герметизации оптических элементов гарантируется стабильность и нечувствительность к случайной засветке и загрязнению. Даже если конструкция оптического устройства удовлетворительная, необходимо провести вычисления, для того чтобы получить условия согласования и синхронизации экспозиции и изучаемого явления. Учитывая эти моменты, можно считать, что интерферометрические наблюдения можно организовать даже в крайне неблаго-

приятных условиях от исследований каскадных потоков вблизи турбин до изучения сгорания горючего в реактивных двигателях и ракетах.

10.4.3. Интерферометрия трехмерных диффузных объектов

Как мы показали выше, голографическая интерферометрия очень удобна и полезна при изучении прозрачных сред, поскольку она расширяет возможности классической интерферометрии. В деле же изучения трехмерных диффузных объектов голографическая интерферометрия совершила настоящий переворот; она позволяет выполнять измерения, которые в классической интерферометрии представляются невозможными. Стали доступными измерения не только поверхностей, неровность которых приводила к их абсолютной непригодности для исследования их средствами обычной оптики, но даже и таких поверхностей, глубина рельефа которых не допускает точных измерений из-за ограниченной глубины фокуса обычной оптики. Голографическая интерферометрия позволяет получать также информацию о временном течении процесса, добавляя еще одно измерение при изучении процессов вибраций и деформаций [18, 33—35]. К счастью, методы реализации таких устройств не более сложны, чем в обычной голографии. Принципиальные отличия состоят в необходимости возбуждения объекта и синхронизации источника света. Расшифровку интерферограммы, как и в случае прозрачных сред, можно успешно осуществлять либо качественно, либо количественно. В последнем случае для получения оптимальных результатов желательно использовать усовершенствованные методы преобразования данных.

10.4.3.1. Геометрия схемы устройств в интерферометрии трехмерных объектов

Голографическая интерферометрия не требует особого расположения оптических элементов, отличающегося от используемого в изобразительной голографии. Прежде всего нужно получать высококачественные голограммы объекта в невозбужденном состоянии и в состоянии, характеризующем статической деформацией или динамической деформацией при вибрациях. Типичный интерферометр для наших экспериментов, как и в случае получения любой голограммы, включает в себя светоделиТЕЛЬ, расщепляющий лазерный пучок на опорный и объектный. Вообще говоря, поскольку исследуемые объекты не имеют высокой отражательной способности, лишь небольшая часть света от объекта достигнет голограммы из-за потерь на поглощение и рассеяние объектом. В связи с этим по возможности преобладающую часть исходного лазерного света (не ме-

нее 90%) следует направить в объектный пучок, чтобы он как можно меньше ослабился за счет опорного пучка.

Поскольку экспериментатор обычно пытается исследовать объект как можно больших размеров, насколько это допускает мощность лазера, то с учетом потерь света на рассеяние предпочтительно иметь такие устройства, которые возвращают максимум света от объекта. Это означает, что необходимо стараться располагать объект как можно ближе к плоскости голограммы, чтобы уменьшить потери интенсивности, которая обратно пропорциональна квадрату расстояния от объекта, а также располагать освещающий пучок таким образом, чтобы он не освещал ничего, кроме объекта. Важную роль играет также однородность освещения, особенно для экспериментов с усреднением по времени, в связи с тем, что контраст полос уменьшается с ростом амплитуд вибрации. Видность улучшается, если те участки, которые вибрируют с наибольшей амплитудой, освещать с большей интенсивностью, чем стационарные. Огромные участки очень трудно однородно освещать пучком с гауссовым распределением интенсивности, которое характерно для большинства лазеров. Сладание интенсивности на периферии гауссовых пучков можно частично компенсировать, используя линзу с большой сферической аберрацией, за которой на пути объектного пучка помещается точечная диафрагма, играющая роль пространственного фильтра [17]. Короткофокусная конденсорная линза, обращенная наиболее выпуклой стороной к точечной диафрагме, весьма эффективно сглаживает пучок с гауссовым распределением интенсивности.

Большое значение имеет также сохранение света, несущего информацию об объекте. С этой целью желательно так подготовить поверхность объекта, чтобы гарантировать возвращение максимальной доли света на голограмму. Если это возможно, то бывает очень полезно покрасить поверхность. Можно добиться хороших результатов, если покрыть объект слоем металлической алюминиевой краски, а затем вторым слоем белой краски. Эта операция создает хороший баланс между зеркальным и диффузным отражением и не влечет за собой деполяризацию лазерного света, которая происходит в случае чисто диффузной поверхности. Важно помнить, что деполяризация объектного пучка является не менее важным разрушающим фактором, чем отражение, поскольку на голограмме записывается только та составляющая объектного пучка, поляризация которой совпадает с поляризацией опорного пучка.

Поляризационные эффекты необходимо также учитывать при измерении отношений пучков с помощью фотометра. Та составляющая объектного пучка, вектор поляризации которой перпендикулярен вектору поляризации опорного пучка, дает вклад только в фоновую засветку голограммы, но не участвует в восстановлении изображения. В тех экспериментах, в которых изучается сильно рассеивающий объект, имеет смысл проверять степень деполяризации, внося-

мой объектом. Если она велика, то для компенсации следует увеличить отношение интенсивности опорного пучка к объектному.

В голографической интерферометрии трехмерных объектов можно применять метод сфокусированного изображения, чтобы воспользоваться преимуществами восстановления в белом свете. Если объект не слишком плоский, то можно получить хорошее восстановление в белом свете только тех участков изображения, которые находятся вблизи фокальной плоскости. Когда изображение на голограмме оказывается уменьшенным, то соответственное увеличение интенсивности света на голограмме позволяет уменьшить время экспозиции.

В случае трехмерных объектов проверка равенства длин оптических путей опорного и объектного пучков играет даже еще более важную роль, чем для прозрачных объектов, в связи с тем, что наличие третьего измерения (глубины объекта) может вывести некоторые участки объекта за пределы длины когерентности источника света. Поскольку объекты имеют глубину, компенсация может быть только компромиссной, при этом та точка на объекте, для которой компенсация является точной, выбирается из условия получения максимального общего контраста интерференционной картины. Например, в интерферометрии с усреднением по времени самый низкий контраст полос наблюдается в тех участках, где амплитуда вибрации больше всего. По возможности нужно стараться строить эксперимент так, чтобы этим участкам соответствовала нулевая разница оптических путей объектного и опорного пучков.

В случае достаточно протяженного опорного пучка иногда трудно обеспечить компенсацию в пределах расстояния от объекта до голограммы. В этом случае и в случае, когда объект нельзя жестко закрепить относительно оптических элементов, опорный пучок можно получить либо непосредственно от части объекта, либо (что еще проще) от зеркала, жестко связанного с объектом.

Преимуществом такого устройства является то, что в нем автоматически компенсируется разность длин оптических путей и сводится к минимуму влияние на восстановленное изображение фазовых искажений в атмосфере между объектом и голограммой. При расшифровке интерференционных картин от получаемых таким способом голограмм следует иметь в виду, что опорный пучок может брать свое начало от нестационарного участка объекта.

Хотя в голографической интерферометрии можно использовать любую оптическую систему, пригодную для изобразительной голографии, при постановке экспериментов нужно тщательно обеспечивать однородность освещения и точную компенсацию длины пути, особенно там, где контраст полос низкий. Количественная расшифровка картины полос позволит определить, как следует выбирать расположение объектного и опорного источников, а также объекта относительно голограммы, поскольку каждая интерференционная

полоса дает информацию об изменении полного оптического пути. Обычно легче вначале создать оптимальную геометрию схемы интерферометрического устройства, чем проводить впоследствии сложную коррекцию окончательных данных.

10.4.3.2. Подготовка исследуемого объекта

Помимо описанной выше подготовки поверхности для обеспечения необходимого возврата света от объекта к голограмме, наиболее важный этап подготовки объекта включает в себя его установку таким образом, чтобы он не оказывал влияния на оптическую систему в процессе эксперимента и чтобы возбуждение объекта было естественным по амплитуде и происходило в ожидаемом направлении. От тщательности установки объекта в механической системе зависит успех или неудача эксперимента, так как нежелательные смещения и наклоны объекта во время эксперимента могут сделать невозможной расшифровку интерференционных полос в окончательной картине. Например, при исследованиях вибраций консольных структур, таких, как турбинные лопатки, на основной и более низких частотах картины для разных режимов и частот сильно зависят от жесткости закрепления структуры. Чтобы получить реальные данные для низкочастотных режимов, основы лопаток должны быть закреплены в их монтажном блоке, который в свою очередь приваривается к массивной плите. Для структур меньшего размера такие крайние методы не применяются, однако в любом случае конструкцию лучше сделать более жесткой и крепкой, чем подсказывает интуиция.

Прежде чем начать проводить серию экспериментов, очень полезно предварительно проверить голографическую систему, работающую в реальном времени. Когда голограмма закреплена на держателе, жесткость монтажа всех элементов можно проверить, попытавшись их сдвинуть или постучав по ним: при этом одновременно проверяется, не вызвала ли эта операция изменения в картине полос. В то же время можно проверить наличие любого гистерезиса в возбуждающем механизме и обнаружить любые неожиданные термические или механические деформации, вызванные возбуждающим устройством. Поскольку проверка эксперимента происходит с помощью голограммы в реальном времени, эксперименты можно продолжать с уверенностью, что система не создает паразитных полос.

10.4.3.3. Возбуждение исследуемого объекта

Когда интерферометрия используется для изучения объекта в его рабочих условиях, то особой проблемы возбуждения не возникает. При таких прямых измерениях создаются интерференционные

картины, непосредственно описывающие статические или вибрационные деформации, которые, как можно надеяться, типичны для объекта. К недостаткам этого метода можно отнести трудность расшифровки, так как на самом деле редко получается чисто статический или чисто вибрационный режим. Поэтому для характеристики механического поведения реальных структур или их моделей часто используются лабораторные испытания, в которых к испытываемому объекту прикладываются известные возбуждающие силы. Когда для выявления потоков в сложных структурах используется голографическая интерферометрия, то режим возбуждения должен быть таким, чтобы по сравнению со стационарными участками с потоками возбудились больше. Во всех случаях нужно заботиться о том, чтобы режим возбуждения гарантировал правильную амплитуду возбуждения и отвечал бы реальным условиям.

Применение голографической интерферометрии в экспериментах со статической деформацией сопряжено с трудностями, поскольку для получения определенного контролируемого числа полос на интерферограмме нужно прикладывать небольшие заранее известные напряжения. Механические устройства, такие, как микрометры, обладают люфтом и гистерезисными эффектами того же порядка величины, что и измеряемая деформация. Контактные точки имеют тенденцию к блужданию, поэтому маловероятны случаи, когда от микрометра или от другого скручивающего устройства сила прикладывается точно в правильном направлении. Наиболее предпочтительны методы возбуждения, исключающие использование движущихся соединений. Одним из эффективных способов приложения статической силы к объекту является использование термического расширения, вызванного локальным нагревом участка опоры. Термическое возбуждение можно осуществить непосредственно с помощью ламп, нагревательной нити или пламени. Если позволяют электрические параметры объекта, то его можно нагревать, пропуская через него ток; собственное сопротивление объекта обуславливает источник самонагрева. Этот метод полезен при выявлении потоков, при наличии которых будут локально нагреваться полости и расслоенные участки. Главный недостаток использования термического давления — это отсутствие пространственной селективности, а к его достоинствам относятся простота и то, что его возможности весьма велики.

Использование гидравлических сил полезно в тех случаях, когда объект имеет закрытые полости, которые можно легко сдавливать или выдавливать. В большинстве видов статических испытаний приходится предварительно сдавливать объект, чтобы он мог поместиться на держатель. Как только в системе устранен гистерезис, можно успешно изучать относительно большие деформации, образовавшиеся под действием небольших напряжений, регистрируя каждое изменение голографическим методом двух экспозиций.

Вибрацию в структурах возбудить легче, чем статическую деформацию, поскольку для этого можно использовать множество неконтактных методов. Наиболее простой из них — возбуждение акустическими волнами из воздуха; это явление часто выступает как паразитный возбуждающий механизм в плохо поставленных голографических экспериментах. Когда желательны проводить возбуждение вибраций на одной частоте, например при изучении различных режимов вибрации структуры, в качестве возбудителя можно использовать громкоговоритель. Предпочтень следует уличные громкоговорители, так как для монохроматического возбуждения требуется мощность, которая недопустима для бытовых звуковоспроизводящих систем. Преимуществом акустического возбуждения является его неселективность к положению точек, в которых производится давление на объект. Особенно это преимущество проявляется, когда имеет место возбуждение сложной вибрации и положение оптимальных точек давления (пучности) неясно. К недостаткам метода относится одновременное с объектом возбуждение всего голографического устройства.

Для возбуждения звуковых частот в диапазоне 50—20 000 Гц удобно применять магнитные возбудители. Одним из наиболее подходящих возбудителей является электромагнитный датчик, используемый для определения числа оборотов двигателей путем счета импульсов, генерированных зубьями шестерни, проходящими через этот датчик (рис. 6). Магнитные возбудители состоят из магнитного стержня диаметром около 3 мм, вокруг которого намотана спираль; электрический импеданс этого устройства составляет от 10 до 100 Ом, так что возбудители легко согласуются с видеоусилителем. Предназначенные для работы в роли индуктивных неконтактных датчиков, они также хорошо работают как индуктивные неконтактные возбудители для ферромагнитных объектов. Более крупные из них могут обеспечивать несколько ватт мощности, не сгорая при этом; такой мощности достаточно для создания необходимого уровня возбуждения на видеочастотах для многих структур. Для того чтобы использовать эти датчики в качестве возбудителей, их устанавливают в непосредственной близости от магнитной поверхности, на расстоянии от нее, равном примерно 200—300 мкм. Эффективность возбуждения при уменьшении зазора возрастает, но нужно соблюдать осторожность, чтобы сердечник возбудителя (постоянный магнит) не касался объекта. Немагнитные объекты тоже можно подвергать магнитному возбуждению, подсоединяя к ним ферромагнитную ленту. Если один возбудитель не обеспечивает достаточной амплитуды возбуждения, то можно использовать несколько возбудителей, запитываемых параллельно от одного усилителя. С целью выделения различных режимов возбуждения возбудители можно располагать в разных местах объекта. Вообще говоря, расположение возбудителя определяется из тех соображений, чтобы данная мода вибра-



Рис. 6. Некоторые типичные магнитные возбудители, используемые при изучении вибраций.

ции легче всего возбуждалась с наибольшей амплитудой вибрации в пучности. При возбуждении вибрационных колебаний сложной формы для определения наиболее подходящих мест расположения возбудителей можно использовать голографию в реальном времени. Используя отдельные возбудители, связанные с отдельными источниками, можно одновременно возбуждать много мод колебаний.

При низких частотах из-за ослабления магнитных сил эффективность электромагнитных датчиков уменьшается, а при высоких частотах увеличивается импеданс возбудителя из-за индуктивного сопротивления, однако в диапазоне видеочастот электромагнитный датчик является вполне подходящим возбудителем, и его наличие не оказывает влияния на параметры вибраций во время испытаний. Магнитные вибраторы и вибростенды, обычно используемые для вибрационных испытаний, дают значительно большие смещения, чем те, которые необходимы для голографической интерферометрии. Кроме того, для них требуется механический контакт с объектом, поэтому в данном случае результаты измерений будут соответствовать системе объект — вибратор, а не собственно объекту. Тем не менее в определенных испытаниях находят применение и такие

возбудители. Когда необходима широкая полоса частот возбуждения, например при обнаружении потоков, часто используется импульсное возбуждение. Возбудителем в данном случае служит молоток или снаряд.

Во всех экспериментах такого типа для проверки работы устройства перед изготовлением голограммы методом усреднения по времени или методом двух экспозиций полезно применять режим работы голографического интерферометра в реальном времени. Таким образом можно проверить правильность уровня возбуждения и расположения возбудителя. Одновременно можно проверить наличие нежелательного движения опоры голографического устройства. При изучении вибраций особенно полезно сочетание акустического возбуждения и голографической интерферометрии в реальном времени для сканирования спектра возбуждения. Непрерывная природа акустического возбуждения дает гарантию того, что в процессе сканирования не будет пропущена ни одна мода колебаний. При использовании для исследования вибраций стробоскопической голографии необходим контроль в реальном времени, чтобы устанавливать фазу стробирующего импульса относительно цикла вибраций. В тех случаях, когда можно использовать голограмму в реальном времени, она всегда должна предшествовать более сложным испытаниям; даже если такая голограмма может и не иметь идеального согласования нулевых полос, с ее помощью можно многое узнать о вибрационных испытаниях.

10.4.3.4. Методы временной модуляции

Голографическая интерферометрия в реальном времени, использующая стабильные лазеры непрерывного действия, согласно временной шкале, представляет собой одну из крайностей, тогда как голография с импульсными лазерами относится к другой. Если очевидно, что две голограммы, записанные с помощью достаточно коротких импульсов, чтобы избавиться от смаза, вызываемого движением объекта, можно интерферометрически сравнивать, как и голограммы статически деформированных объектов, полученные методом двух экспозиций, то абсолютно неясно, какого рода информация будет получена от голограммы, сделанной с непрерывным источником света при движении объекта во время экспозиции.

Движение объекта во время экспозиции голограммы создает на ней интерференционные полосы, природа которых определяется функциональным видом движения [24, 25, 32]. В случае синусоидального движения Пауэлл и Стетсон [32] получили аналитическое выражение, связывающее амплитуду вибраций и видность полос. Выполненные этими авторами эксперименты и проведенный ими анализ положили начало исследованиям вибраций с помощью

голографии. Этот вопрос также освещается в более поздней работе [13] в связи с другими аспектами голографической интерферометрии. Когда объект вибрирует по синусоидальному закону с амплитудой a , а направления освещения и наблюдения совпадают с направлением движения объекта, возникает сдвиг оптической фазы $\varphi = 4\pi a/\lambda$. В общем случае необходимо вычислять геометрические траектории лучей. Для луча, падающего на поверхность объекта под углом θ_1 и рассеивающегося по направлению к голограмме под углом θ_0 , фаза записывается в виде

$$\varphi = (2\pi a/\lambda) (\cos \theta_1 + \cos \theta_0). \quad (10)$$

В этом случае восстановленное с голограммы изображение пересекается полосами, интенсивность которых

$$I = I_0 J_0^2(\varphi); \quad (11)$$

здесь $J_0(\varphi)$ — функция Бесселя нулевого порядка аргумента φ . Поскольку $J_0(0) = 1$, наиболее яркие полосы на голограмме возникают на участках, соответствующих стационарным деталям объекта, т. е. узлам волн вибрации. Для больших амплитуд функция Бесселя периодически осциллирует с уменьшением размаха колебаний. Каждый максимум и минимум полосы соответствует эквивалентному колебанию функции Бесселя. В случае больших φ эти колебания дают почти однородные приращения к амплитуде вибрации. Применение голографии с усреднением по времени позволяет особенно просто определять положение узловых линий вибрации, а также количественно измерять деформацию. Пример голограммы, полученной методом усреднения по времени, приведен на рис. 7, на котором показана голограмма вибраций высшего порядка в группе больших турбинных лопаток. На этой фотографии узловые линии ясно видны, как яркие полосы. Изготовление голограмм с усреднением по времени не более сложно, чем изготовление голограмм с одной экспозицией, а получаемая при этом информация полезна как сама по себе, так и в дополнение к информации, полученной другими методами.

Голография с усреднением по времени (термин, обычно применимый к процессу изготовления голограммы движущегося объекта при продолжительном освещении) фактически представляет собой специальный случай «голографии с модуляцией по времени», которую подробно рассмотрел Алекссофф [5]. Выражение (11) описывает модуляцию интенсивности в изображении, восстановленном с голограммы, когда фаза объектного пучка синусоидально модулируется за счет рассеяния на вибрирующем объекте, а опорный пучок остается немодулированным. Фазовая модуляция светового пучка (или любой другой синусоидальной волны для этого случая [23]) на частоте ω дает временные боковые порядки пучка со сдвигами частоты на ω , 2ω , 3ω , ..., причем их амплитуды пропорцио-

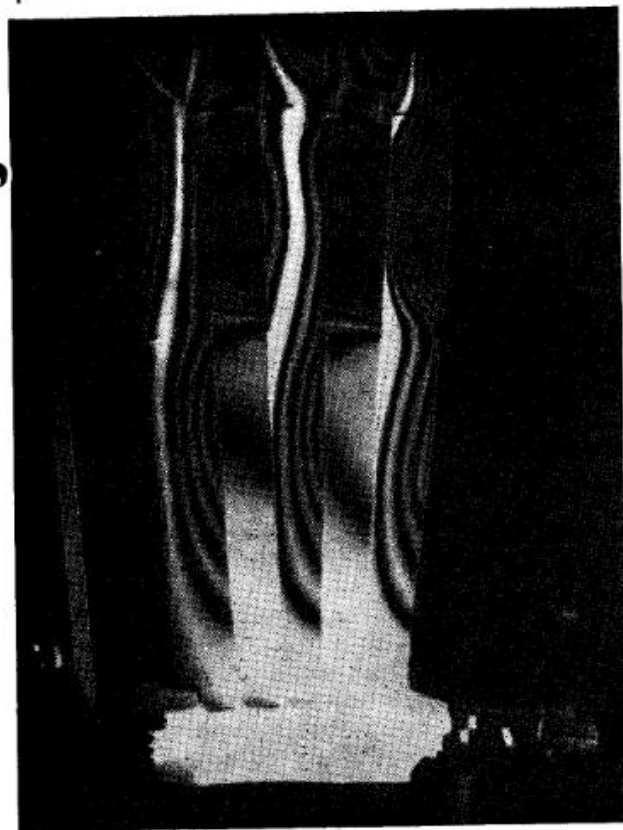


Рис. 7. Голограмма, полученная методом усреднения по времени, для пятилопасточной турбины с длиной лопаток ~ 79 см, вибрирующей на моде высшего порядка с частотой 653 Гц. Этот тип голограмм особенно хорошо демонстрирует узловые линии.

нальны функциям Бесселя порядков $1, 2, 3, \dots, n$, а именно функциям $J_1(\varphi)$, $J_2(\varphi)$, $J_3(\varphi)$, \dots (Аргумент φ относится к максимальному вносимому фазовому сдвигу.) Между тем, поскольку свет на этих сдвинутых по частоте боковых порядках должен быть получен из падающего пучка с исходной частотой, амплитуда пучка нулевого порядка или пучка, не имеющего сдвига по частоте, должна изменяться в соответствии с фазой модуляции; фактически она изменяется как функция Бесселя нулевого порядка $J_0(\varphi)$. Следовательно, объектный пучок, рассеянный на синусоидально вибрирующем объекте, содержит часть света с той же частотой, что и исходный объектный пучок, а также остальная часть волн, частота которых отличается от исходной на целое число ω , а отно-

сительные амплитуды представляют собой функцию φ , в свою очередь зависящую в соответствии с выражением (10) от амплитуды смещения во время вибрации.

Голограмма действует как гетеродинный приемник, настроенный на временную частоту опорного пучка, так как на голограмме останутся неподвижными только те полосы, которые образованы компонентами с той же частотой, что и у опорного пучка. Компоненты со сдвигом частот на ω , 2ω , 3ω , \dots образуют полосы, смещающиеся благодаря этому сдвигу по плоскости голограммы; за время экспозиции эти компоненты «смываются» и остаются лишь полосы, образованные светом, не сдвинутым по частоте. Поскольку амплитуда этого света пропорциональна функции $J_0(\varphi)$, интенсивность восстановленного изображения для участков голограммы с фазовой модуляцией пропорциональна $J_0^2(\varphi)$, как и следует из выражения (11). Голография с временной модуляцией обобщает принцип гетеродинного приема и на детектирование боковых порядков объектного пучка с более высокими частотами. Принцип работы голографии с временной модуляцией остается тем же самым, что и в случае голографии с усреднением по времени; записываются лишь те компоненты объектного пучка, частота которых точно совпадает с частотой опорного пучка.

Удобный способ восстановления информации, содержащейся в частях объектного пучка со сдвигом по частоте, дает фазовая модуляция опорного пучка. В случае, когда опорный пучок, используемый для изготовления голограмм с усреднением по времени, сдвинут на частоту вибрации объекта, максимум яркости восстановленного изображения соответствует максимуму функции Бесселя первого порядка $J_1(\varphi)$, а не максимуму функции $J_0(\varphi)$, как в случае голограммы с усреднением по времени, которая записывает нулевой порядок. Влияние такого сдвига сказывается на том, что положение максимума яркости на голограмме смещается от узловой линии (соответствующей нулевой вибрации) к тем участкам, которые создают сдвиг, соответствующий максимуму функции Бесселя первого порядка. Если опорный пучок сдвинут по частоте до согласования со второй гармоникой частоты модуляции, то яркость восстановленного изображения имеет вид функции Бесселя второго порядка от фазового сдвига. Хотя теория считает, что прямой сдвиг по частоте опорного пучка относительно частоты объектного пучка является желательным, на практике получить этот сдвиг не представляется возможным; следовательно, более реальной является осуществление синусоидальной фазовой модуляции опорного пучка на частоте, совпадающей с частотой возбуждения объекта. Анализ общего случая, когда фазы опорного и объектного пучков не совпадают, весьма сложен; однако очень полезную информацию может дать анализ частных случаев, когда опорный пучок либо находится строго в фазе с движением объектного пучка,

либо строго в противофазе относительно этого движения, поскольку в первом случае усиливаются полосы от того порядка, которому соответствует сдвиг по частоте опорного пучка, а во втором случае полосы от этого порядка ослабляются из-за деструктивной интерференции. Таким образом, фазовую модуляцию опорного пучка можно использовать, во-первых, для изучения относительных фаз узлов и пучностей вибрации. Во-вторых, коррелированный сдвиг фазовой модуляции с амплитудой опорного пучка позволяет получать качественную информацию о фазе движения различных участков объекта, даже если количественную информацию получить трудно [5]. Модуляция опорного пучка может увеличить диапазон эффективного применения голографии с усреднением по времени, обеспечивая высокий уровень фазового сдвига, что позволит осуществлять запись при взаимодействии с компонентами, обладающими большой амплитудой. Временная модуляция также эффективно увеличивает чувствительность при малом контрасте полос, так как, если правильно отрегулированы модуляция опорного пучка и фаза, от общего движения можно отвлечься, оставив только малые изменения в виде роста яркости, которые легко можно различить на темном фоне. Этим способом можно выявить движение с амплитудой в малую долю длины волны [44]. Таким образом, временная модуляция находит весьма разнообразные применения. Диапазон ее использования простирается от голографии с усреднением по времени (в этом случае движение объекта модулирует только один пучок) до голографии, при которой фаза или частота опорного пучка модулируется для усиления определенных участков движения. В п. 10.4.3.5 мы увидим, что применение временной модуляции распространяется за пределы фазовой модуляции света, используемого для получения голограммы, и включает амплитудную модуляцию. Применяя импульсную модуляцию экспозиции голограммы, информацию от относительно долгой экспозиции можно преобразовать в информацию, эквивалентную полученной при двукратных или многократных коротких экспозициях.

10.4.3.5. Стробоскопические методы

Стробоскопическая голография рассматривается как частный случай голографии с изменением функции освещения во времени [5], но в своем наиболее простом воплощении она практически эквивалентна голографии двух экспозиций. Обычно стробоскопические методы применяются в голографии так же, как и в обычной стробоскопии, а именно освещение должно быть импульсным и иметь частоту повторения импульсов, совпадающую с частотой вибрации объекта, при этом длительность импульса должна быть достаточно мала, чтобы объект не смазывался. Стробоскопические методы очень полезны при голографических исследованиях ви-

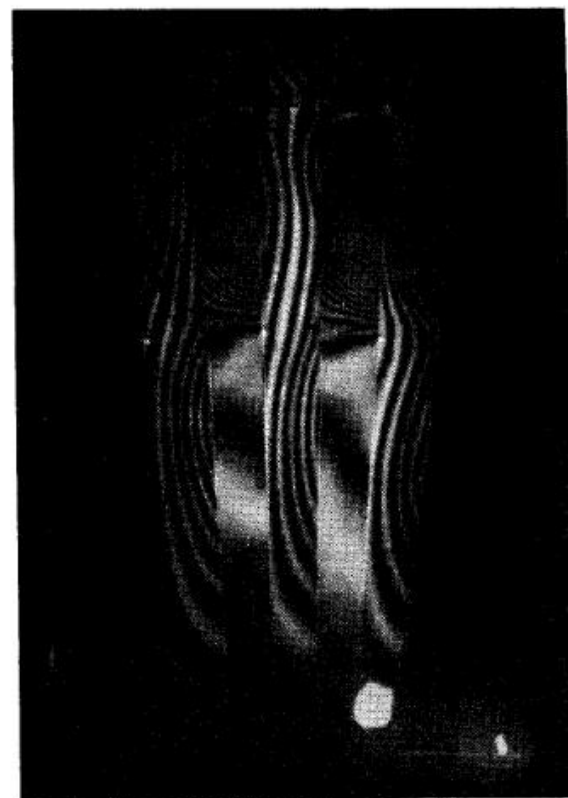


Рис. 8. Дважды экспонированная стробоскопическая голограмма той же группы лопаток, вибрирующих на той же моде, что и лопатки на рис. 7. Сечения изолиний и контраст полос устанавливались при стационарном положении лопаток, а экспозиция осуществлялась с помощью стробирующего импульса, включавшегося так, что свет от лазера поступал в систему, когда цикл вибраций достигал максимума.

брации в реальном времени с целью определения относительных фаз движения в сложных модах колебаний структуры. Если частота повторения стробирующих импульсов в интерферометре, работающем в реальном времени, слегка отличается от частоты вибрации, то интерференционные полосы перемещаются в направлении к максимумам интенсивности и от них с частотой, равной разностной частоте. Стробоскопия в реальном времени очень полезна для просмотра всего набора мод, однако при этом желательна непрерывная запись; в этом случае стробоскопические голограммы двух экспозиций являются важным дополнением к исследованиям с помощью голограмм с усреднением по времени.

При изготовлении стробируемых голограмм двух экспозиций частота стробирующих импульсов подбирается таким образом, чтобы она равнялась частоте исследуемого периодического движения, а фаза стробирующего импульса выбирается такой, чтобы движение регистрировалось в желаемый момент времени. Интервал между стробирующими импульсами нельзя сделать сколь угодно

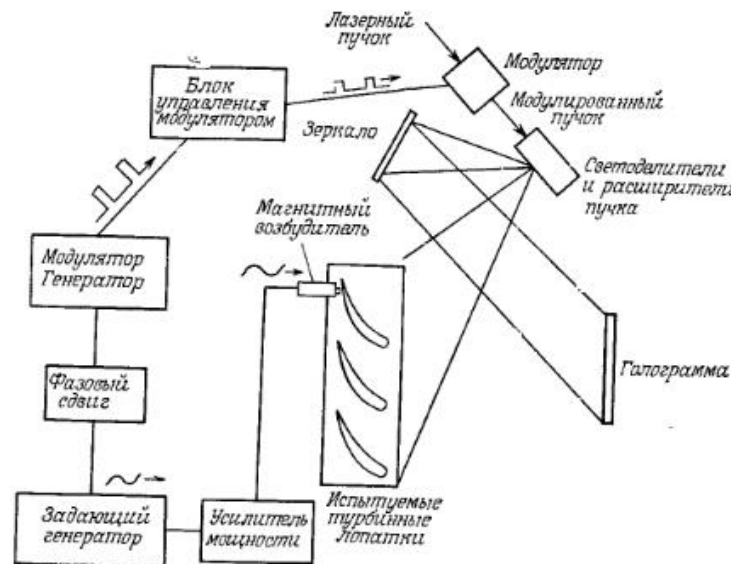


Рис. 9. Схема стробоскопического голографического эксперимента.

коротким, поскольку это может привести к чрезмерному увеличению времени экспозиции голограммы; в этом смысле лучший результат достигается, когда импульсы выбираются умеренной длительности (примерно 10—15% интервала между импульсами), а фазу выбирают таким образом, чтобы импульсы синхронизовались при максимальном значении амплитуды вибрации. На рис. 8 приведен пример голограммы двух экспозиций; в этом случае исследовался тот же объект, что и на голограмме с усреднением по времени, показанной на рис. 7. Здесь, поскольку со стационарным состоянием сравнивается только крайняя точка движения, каждая интерференционная полоса соответствует непосредственно равным приращениям амплитуды вибраций и каждый порядок полосы имеет одинаковые яркости и контраст. При тех исследованиях, когда желательно получить количественные данные о характере движения, эти голограммы наиболее удобны, поскольку они не требуют коррекции с учетом функций Бесселя, как в случае голограмм с усреднением по времени. На рис. 9 представлена схема

типичного голографического эксперимента с применением стробоскопического метода.

Стробоскопическую модуляцию лазерного пучка можно получить, используя механическое прерывание вплоть до частот порядка 10 кГц. Такие частоты можно получить, фокусируя пучок в точечную диафрагму на диске обтюратора, имеющего умеренные размеры и доступные скорости вращения. С помощью таких обтюраторов трудно регулировать частоту и особенно фазу вращения относительно управляющего сигнала. Более удобны электронные средства модуляции. Можно использовать электрооптические модуляторы, но он требует высоких управляющих напряжений и наличия второго поляризатора. Потери света в таких модуляторах обычно велики. Сейчас широкое распространение получили относительно недорогие акустооптические модуляторы, использующие дифракцию Брэгга. В качестве носителя информации в них можно использовать либо непосредственно часть недифрагированного пучка, либо часть света перераспределить в единственный брэгговский дифракционный порядок и направить его под углом к недифрагированному пучку. Недостатком первого режима работы является ограничение контраста между включенным и выключенным состояниями величиной 10 : 1, а достоинством — минимальные потери света и минимальный сдвиг пучка. Второй режим (брэгговский) обеспечивает хороший контраст, но требует переюстировки оптики в промежутке между включенным и выключенным состояниями. Главный недостаток схемы с использованием недифрагированного пучка можно смягчить, если использовать более чем одно прохождение света через ячейку, причем с пространственной фильтрацией промежуточных прохождений [10].

Интересное применение стробоскопического метода связано с временной модуляцией интервала между импульсами для выделения определенных порядков полос путем их селективного заострения [30]. В этом методе во время каждого колебательного цикла к модулятору прикладывается множество импульсов от электронного генератора. Они синхронизуются таким образом, что для тех полос, интервал между которыми равен числу стробирующих импульсов на цикл вибрации, имеет место конструктивная интерференция, и полосы усиливаются на голограмме восстановления. Таким путем можно осуществлять с высокой точностью интерферометрические исследования при более высоких амплитудах, чем в случае применения немодуляционных методов.

10.4.3.6. Многократно экспонированные голограммы

Во многих случаях для исследований как диффузных объектов с прямым освещением, так и различных потоков полезно применять голограммы двух или многократных экспозиций. Главной

проблемой здесь является получение соответствующей синхронизации. Когда исследуемое явление представляет собой непосредственно результат электрического запуска, то необходимые сигналы уже имеются. Выбор интервала между импульсами обусловлен характером движения, которое ожидается в течение интервала между импульсами. Расшифровка импульсных голограмм может оказаться более сложной, чем голограмм со стробирующими импульсами, поскольку нам неизвестно, с какой скоростью будут совпадать две экспозиции с заданным временным интервалом. Тем не менее импульсный метод двух экспозиций весьма полезен при изучении случайных и псевдослучайных процессов.

10.4.3.7. Получение информации из голограмм диффузных объектов

Иногда вполне достаточно иметь качественную информацию о диффузных объектах [11]; такую информацию можно получить из визуального наблюдения восстановленных изображений или их фотографий. Много полезной информации можно извлечь из положения узловых линий и областей пучностей в объекте. Таким образом, общее применение голографической интерферометрии, как, например, для изучения формы колебательных мод в зависимости от частоты, можно успешно выполнять, фотографируя восстановленные с голограмм изображения; тем самым можно получить полное представление об исследуемом объекте.

Если качество голограммы хорошее, то фотографирование восстановленного изображения не представляет особых трудностей; при этом голограмму можно рассматривать как окно, через которое можно сфотографировать объект и наложенные на него полосы. Поскольку желательно, чтобы голограмма была как можно лучше освещена [1], объект следует помещать столь близко к голограмме, насколько позволяют механические ограничения и освещение. Хорошую фотографию восстановленного изображения можно сделать только тогда, когда используется оптика, подходящая для макрофотографии или для крупного плана. Необходимо также соблюдать осторожность во избежание образования вуали от света, рассеянного на голограммной пластинке. Кроме того, если опорный пучок пересекает линзу, то может возникнуть проблема нежелательных бликов.

Полосы интерферограммы обычно не лежат в одной плоскости [27, 28, 36, 43], так что обычно с целью получения наибольшей глубины поля в системе полос фотографическую линзу ограничивают малой апертурой. После некоторого значения апертуры процесс становится саморазрушающимся, поскольку возрастает размер спеклов и при использовании линз с меньшей апертурой теряется нужная информация от тонких линий. Этот эффект часто трудно

визуально обнаружить, так как наблюдатель голограммы стремится усреднить мелкие шумы и обычно не обращает внимания на возникновение спеклов. Для голограмм сфокусированного изображения эти проблемы сведены к минимуму, так как глубина объектной плоскости ограничена голографическим процессом.

Если требуется получить лишь качественную информацию, то обычный фотографический метод дает необходимую точность в освещенности и в геометрическом плане. Если же нужны количественные измерения освещенности полос или их точного положения, то лучше обходиться без промежуточного этапа фотографирования, а измерения следует проводить непосредственно на восстановленном изображении. При этом можно избежать геометрических искажений и ошибок в определении освещенности, вносимых этапом фотографирования.

10.4.3.8. Расшифровка и преобразование данных

а. Геометрические эффекты. В голографической интерферометрии методом двух экспозиций или реального времени каждая полоса представляет собой геометрическое место точек, соответствующих равным разностям длин оптических путей между двумя экспозициями. За исключением случая, когда направления освещения и наблюдения параллельны направлению движения объекта, необходимо осуществлять геометрическую коррекцию положения полос, чтобы получить истинную амплитуду движения поверхности. Если угол между лучом, освещающим объект в данной точке, и направлением движения равен θ_i , а угол между вектором скорости движения и направлением наблюдения равен θ_v , то каждый порядок полос описывает изменение оптического пути, которое должно быть умножено на коэффициент, равный

$$F = (\pi/\lambda) (\cos \theta_i + \cos \theta_v). \quad (12)$$

Когда точки освещения и наблюдения расположены достаточно близко к объекту, так что в выражении (12) углы значительно меняются при сканировании объекта взглядом, расшифровка голограммы становится трудным делом. В такой ситуации существует простой способ расшифровки положения полос; он состоит в том, что выражение (12) рассматривается как уравнение эллипса, в фокусах которого расположены точки освещения и наблюдения. Это преобразование описывается в виде «голодиаграммы» [2—4], состоящей из групп эллипсоидов и ортогональных им гиперболических функций, выделяющих области пространства, в которых данные компоненты движения объекта дают одинаковые интерференционные картины. Попросту говоря, любая компонента движения вдоль эллипса, фокусы которого представляют собой точки наблюдения и освещения, не изменяет картины полос, тогда как

компоненты движения, перпендикулярные эллипсу, дают максимальное изменение картины полос. Таким образом, эллипсы голодиаграммы представляют собой геометрические места минимального изменения длины оптического пути, а ортогональные гиперболы описывают направления, вдоль которых наблюдается максимальная чувствительность к движению. Во всех случаях, когда опорный пучок неподвижен относительно голограммы, изменения длины оптического пути Δl измеряются по изменениям физического пути Δx и показателя преломления Δn и даются интегралом

$$\Delta l = \int_{\text{Источник}}^{\text{Объект}} n(x) dx + \int_{\text{Объект}}^{\text{Голограмма}} n(x) dx. \quad (13)$$

6. Расшифровка временных эффектов в голограммах. Как мы уже рассматривали, для голограмм с усреднением по времени расшифровка амплитуды полос связана с разностями длин оптических путей через функциональную зависимость в виде функций Бесселя, аргументы которых содержат в качестве переменной длину оптического пути. В случае, когда объект движется по синусоидальному закону, контраст полос голограммы уменьшается с ростом амплитуды, причем контраст определяется хорошо известной формулой, выведенной Пауэллом и Стетсоном [32] (см. п. 10.4.3.4). В тех случаях, когда вибрация объекта не является чисто синусоидальной, появление в интерференционной картине изменений свидетельствует о суперпозиции различных колебательных мод. В случае голограмм с усреднением по времени на первичную интерференционную картину накладываются вторичные узлы и картины полос от других мод. Если имеется гармоническая связь между двумя модами, то можно наблюдать интерференционные эффекты между картинками. Однако в общем случае возбужденное движение не является гармоническим, и при этом происходит просто уменьшение контраста интерференционных полос. Когда для исследования вибрации используются стробоскопические методы, то влияние дополнительных мод сказывается в усилении и ослаблении определенных участков картины полос и приводит к пятнистому виду интерферограммы. Кроме того, если в случае голографии в реальном времени частота стробирующих импульсов не синхронизована с частотой управления, то движение полос принимает прерывистый характер вместо синусоидального движения на разностной частоте, которое наблюдается в случае возбуждения чистой моды. Таким образом, можно проверять чистоту моды, если сделана группа голограмм вибрационного спектра объекта. Вообще, любое движение, которое не является результатом возбуждения чистой моды, уменьшает контраст как стробоскопических интерферограмм, так и интерферограмм с усреднением по времени. В случае, когда движение осуществляется на частоте другой моды виб-

рации, изменения в интерференционной картине соответствуют картине вибраций для этой моды.

При изучении спектра чистых мод объекта все усилия должны быть сосредоточены на возбуждении объекта только на одной моде и в определенное время путем регулировки положения возбудителя и обеспечения линейности возбуждения. (Следует заметить, что в случае магнитного возбуждения насыщение возбудителя или возбуждаемого материала легко может вызвать негармонические колебания и колебания на нежелательных модах.) Для таких объектов, как музыкальные инструменты или магнитные приборы, в которых имеет место гармоническое возбуждение, на голограммах с усреднением по времени обычно отмечаются узловые области даже при сложном возбуждении, а стробоскопические голограммы можно использовать для выделения некоторых мод вибрации. Эти случаи очень трудно поддаются расшифровке, и часто при таких исследованиях удается достичь немногим больше, чем получение очертаний областей узлов и пучностей.

в. Сглаживание данных. Для количественных измерений с помощью интерферограмм требуется тщательное определение положений интерференционных полос вне зависимости от того, хотим ли мы получить картину потоков или поля деформаций. Во всех этих случаях более четкое положение полос на голограмме, полученное либо методом многократных экспозиций, либо усилением исходной интерферограммы, улучшает точность конечного результата. Если для измерений деформации используются вибрационные или статические голограммы двух экспозиций, то существенную роль играет точное определение положения полосы и, что более важно, изменений шага между различными парами полос. Поскольку по голограмме измеряют только амплитуду движения, в исследованиях деформаций нужно использовать пространственные производные амплитудной информации, определяемой по положению полос; в этих исследованиях особенно серьезной становится проблема шума, сопровождающего информацию о полосах. В таких случаях может помочь сглаживание данных, обеспечиваемое специально подобранными функциями [8, 39]. При исследовании сглаживания положений интерференционных полос, применяемого в анализе деформаций, было обнаружено [8], что в роли сглаживающих функций успешно могут выступать сплайновые функции (кубические представления изгиба тонкой гибкой шпонки) главным образом потому, что они в основном сохраняют сглаживающую способность вплоть до высших производных, что является необходимым условием для проведения измерений, имеющих какой-то смысл. При сглаживании голографических данных, которые являются дискретным представлением непрерывного изменения на поверхности испытываемого объекта, нужно соблюдать осторожность, чтобы

не выбрать функции, изменяющиеся быстрее, чем пространственное изменение самого изучаемого явления. Успешные методы сглаживания обеспечивают снижение числа подобранных точек и регулировку их положения таким образом, чтобы довести до максимума сглаживание описываемой функции. Если этого не сделать, то окончательно полученная функция будет иметь мало отношения к информации о действительном поведении испытуемого объекта.

10.4.4. Специальные методы и технические приемы

10.4.4.1. Методы интерферометрии в реальном времени

Режим нулевых полос в голографической интерферометрии в реальном времени более сложен, чем исследования с применением голографии двух экспозиций или с усреднением во времени, главным образом потому, что в первом случае трудно избежать изменений положения голографической пластинки относительно механического устройства, на котором укреплены оптические элементы и объект. В этом случае улучшить экспериментальные результаты поможет разработка устойчивой кинематической схемы для держателей пластинки, а также монтажа оптических элементов и держателей объекта [45]. Основной принцип состоит в том, чтобы в конструкции содержался минимум ограничивающих деталей, достаточный для исключения любой конкретной степени свободы движения объекта. Например, все держатели голограммных пластинок вне зависимости от того, используются они в интерферометрии или нет, должны содержать кинематический узел, сводящий к минимуму деформацию пластинки во время экспозиции. Чтобы ориентировать прямоугольную пластинку в плоскости как по положению, так и по углу, вполне достаточно использовать только три штифта. Аналогично требуются лишь три точки, чтобы установить положение этой плоскости; следовательно, чтобы обеспечить точную ориентацию голограммной пластинки, держатель должен иметь только шесть опорных точек. Для поддержки пластинки относительно подкладок и для обеспечения сил трения, удерживающих пластинку относительно ориентирующих штифтов, приходится применять дополнительные штифты, однако эти силы трения не должны быть очень велики. Держатель пластинки, сконструированный с учетом кинематических принципов, не будет коробить пластинку и может быть использован для перемещения голограммы после экспозиции, но с достаточной степенью аккуратности, чтобы больше ничего в схеме не изменилось; при этом условие нулевых полос будет соблюдаться по всему полю голограммы.

В данном случае голограмму на время эксперимента можно поместить в кювету с жидкостью. Такая кювета исключает эффекты

усадки, но требует наличия кинематического держателя пластинки. При достижении режима нулевых полос окончательные результаты получаются, если вся обработка осуществляется внутри кюветы без удаления оттуда голограммы. Для того чтобы химические процессы протекали в реальном времени, можно использовать автоматические устройства, однако они очень дороги.

В большинстве случаев погружение голограмм в жидкость не так уж необходимо, и голография в реальном времени может дать вполне удовлетворительные результаты при использовании сухого подвижного держателя с опорой на края голограммной пластинки и ручного перемещения обработанной голограммы. В такой системе, поскольку в качестве опорных поверхностей используются края пластинки, целесообразно их слегка покрывать абразивным порошком, особенно если пластинка раскололась при транспортировке или была разрезана в лаборатории.

В заключение следует заметить, что не стоит придавать особого значения требованиям чрезмерной жесткости. Это относится в частности к случаю исследований вибраций, когда производится акустическое возбуждение объекта, — сама пластинка начинает вибрировать, даже если она подвижно закреплена. В таких случаях наиболее удовлетворительные результаты достигаются при малых размерах пластинок и кинематических держателей. Хороший кинематический держатель пластинок, имеющих размеры примерно 10×13 см без жидкой ячейки, позволяет получать вполне удовлетворительные результаты для большинства интерферометрических применений, причем в конструкции такого держателя не нужно применять особые приспособления для обеспечения жесткости.

10.4.4.2. Использование голографических пленок в интерферометрии

Пожалуй, в большинстве голографических экспериментальных установок используются не пленки, а стеклянные пластинки, несмотря на большую стоимость материала, главным образом из-за того, что пластинки легче закрепить жестко. Однако если для множества последовательно выполняемых экспериментов важным фактором становится стоимость одной экспозиции или если требуются голограммы очень большой площади, то предпочтительнее использовать пленку. Пленки меньшего размера, такие, как 35-миллиметровые, во многих случаях можно приспособить к установке в стандартном высококачественном лентопротяжном механизме от фотокамеры без смещений и деформаций пленки, создающих препятствия для применения их в голографии. Отдельные куски пленки с относительно толстыми подложками можно использовать для изготовления голограмм в обычных пленкодержателях вплоть до размеров 10×13 см; при этом они обеспечивают

надежную и тщательную установку пленки в данное положение за достаточно короткое время. Но даже при размерах голограммы 10×13 см обычный пленкодержатель, зажимающий пленку на краях, может вносить искажения, а при больших размерах пленки он уже совсем непригоден. Во всех случаях для любых размеров пленки лучшим способом ее установки является вакуумный или установка под давлением; при этом вся поверхность пленки в течение экспозиции удерживается в фиксированном состоянии. Хорошо сконструированный вакуумный держатель можно предпочесть держателю пленки под давлением, поскольку здесь не является необходимым создавать окно между объектом и голограммой. В случае использования импульсных лазеров такие строгие требования к держателям пленки излишни, ибо движение пленки за время импульса пренебрежимо мало.

10.4.4.3. Методы двух экспозиций для апостериорной компенсации полос

Одним из недостатков голографической интерферометрии двух экспозиций является невозможность изменения картины фоновых полос, когда определяется относительное направление движения различных участков голограммы, после того как голограмма изготовлена. Этот недостаток можно преодолеть, если провести запись двумя отдельными экспозициями таким образом, что после восстановления с двумя восстановленными изображениями можно было бы работать раздельно. Простейший из этих методов, называемый «сэндвич-голографией» [2—4, 6], требует изменения только конструкции держателя пластинок, чтобы можно было одновременно экспонировать две пластинки. Хотя пластинки можно располагать сколь угодно близко друг к другу, в наиболее распространенном устройстве пластинки прижимаются друг к другу сторонами с эмульсией. Две пластинки экспонируются светом от объекта, находящегося в первом своем состоянии, а затем светом от объекта во втором состоянии экспонируется вторая пара пластинок. После обработки и сушки передняя пластинка (со стороны объекта) соединяется с задней пластинкой другой пары так, чтобы их эмульсии контактировали, и эта новая пара восстанавливается копией исходного опорного пучка. Поскольку каждое изображение восстанавливается отдельно, то, меняя положения голограмм относительно друг друга, можно управлять картиной полос, обусловленной различием между двумя состояниями объекта. Например, наклон одной голограммы относительно другой соответствует введению наклона объекта между экспозициями; вращение голограмм соответствует повороту объекта. С помощью подходящей манипуляции парой голограмм можно устранять фазовые неоднозначности

в картине полос, фиксируя изменения в направлении определенных фоновых полос.

В более сложных голографических устройствах того же результата можно добиться и с одной голограммой. Если две экспозиции осуществить опорными пучками с углами падения, отличающимися на величину, не настолько большую, чтобы после восстановления происходило перекрытие со вторичным изображением, то изображениями, восстановленными двумя восстанавливающими пучками, можно манипулировать относительно друг друга, изменяя геометрию восстановления [42]. Такой вид интерферометрии, в котором применяются полосы разных несущих пространственных частот, является лишь одним из нескольких видов голографического пространственного мультиплицирования, которыми можно пользоваться. Для записи двух голограмм можно также применять пространственно дополняющие друг друга маски, а при восстановлении для освещения нужных участков голограммы раздельными пучками можно использовать цветные или поляризационные маски. Однако среди методов, обеспечивающих раздельную запись и восстановление двух изображений, сэндвич-голография является наиболее простой как на стадии изготовления голограмм, так и при последующей манипуляции изображениями.

10.4.4.4. Увеличение резкости полос

Хотя оптическая плотность фотографий, полученных с картин голографических полос, может и не представлять собой точную копию интенсивности полос, разрешение полос определяется распределением освещенности, которое для голограмм с усреднением во времени пропорционально $J^2(\varphi)$, а для голограмм двух экспозиций записывается в виде $\sin^2 \varphi$. Возможность наблюдать разницу в плотности влечет за собой возможность наблюдения пространственных смещений полос и, следовательно, устанавливает предельное разрешение по смещению. Измерения положения полосы становятся критичными, когда деформации определяются из голограмм, поскольку такие измерения связаны с различиями в положениях полос (производных амплитудной функции), и, следовательно, небольшие ошибки при измерении положения полосы приводят к увеличению ошибки при расчете деформаций. Хотя для увеличения резкости полос на голограмме двух экспозиций или при регистрации вибраций можно было бы применять в принципе многоволновые голографические методы точно таким же способом, как и классическую многолучевую интерферометрию, сложность постановки такого эксперимента делает привлекательной систему, основанную на более традиционном подходе.

Один из подходов, а именно фотоэлектронный метод определения разностей в положении полос, использует голографическое

устройство с двойной экспозицией и с двумя опорными пучками. В этом устройстве частота одного из восстанавливающих пучков сдвинута относительно другой на частоту ультразвука [16]. Такой частотный сдвиг модулирует координаты интерференционных полос при восстановлении голограммы, которые в свою очередь могут быть продетектированы с помощью фотодетектора, расположенного в плоскости изображения линзы, которая проецирует восстановленное изображение. В той точке изображения, восстановленного с дважды экспонированной голограммы, в которой оптические фазы в начальном и конечном положениях смещения полос равны соответственно $\Phi_1(x, y)$ и $\Phi_2(x, y)$, фаза переменного сигнала будет пропорциональна выражению

$$\Phi_1(x, y) - \Phi_2(x, y) + \omega(t) = \Phi + \omega(t), \quad (14)$$

где $\omega(t)$ — мгновенная фаза модулирующего сигнала в момент времени t . Если второй детектор поместить в точке с координатой $x + \Delta x$, то с него будет сниматься аналогичный сигнал, фаза которого изменяется во времени как

$$\Phi_1(x + \Delta x) - \Phi_2(x + \Delta x) + \omega(t) = \Phi' + \omega(t). \quad (15)$$

Таким образом, мы видим, что оба сигнала одинаково изменяются во времени, но разность фаз $\Phi - \Phi' = \Delta\Phi$ равна разности фаз в интерференционной картине между точками x и $x + \Delta x$. Таким образом, разности временных фаз между двумя детектированными сигналами Δx в отдельности пропорциональны разностям пространственных фаз интерференционной картины в этих точках и связаны непосредственно с наклоном графика смещения между этими точками.

Преобразуя пространственную модуляцию дважды экспонированной голограммы во временную, можно точно установить координаты полос посредством измерения фазы (которое нужно выполнить очень точно) относительно фазы любой другой точки восстановленного изображения. В частности, для непосредственного измерения наклона смещения можно раздельно использовать два детектора, установленных на фиксированном расстоянии друг от друга; это существенный результат, поскольку прямое измерение наклона приводит к возрастанию точности измерений деформации.

10.4.5. Заключение

Голографическая интерферометрия по существу обеспечивает получение той же информации, что и обычные интерферограммы, а именно позволяет получать измерения в единицах длины волны света по изменениям оптического пути в процессе эксперимента. Однако по ряду причин в большинстве случаев ее практическое значение намного выше по сравнению с классическими методами.

Там, где можно использовать классические интерферометры, голографические интерферометры могут решать те же задачи при апертурах гораздо больших, чем те, которые может обеспечить доступная по цене высококачественная оптика. В случае случайных и диффузных волновых фронтов голографические интерферометры могут работать при таких условиях, когда другие методы вообще не способны дать полезную информацию. Голография добавляет четвертое измерение (время) ко всей интерферометрии с методами одной и многократных экспозиций, которые доступны голографисту. Наконец, многогранность и относительная простота голографического метода дает в руки любому, кому доступен лазер, очень мощный и тонкий инструмент измерения любых изменений, которые в эксперименте могут быть преобразованы в разности длин оптических путей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайдель А. Н., Малхасян Л. Г., Маркова Г. В., Островский Ю. И. — ЖТФ 1968, т. 38, с. 1824.
2. Abramson N., Appl. Opt., 13, 2019—2025 (1974).
3. Abramson N., Appl. Opt., 14, 981—984 (1975).
4. Abramson N., Appl. Opt., 15, 203—205 (1976).
5. Aleksoff C. C., Appl. Opt., 10, 1329—1341 (1971).
6. Bjelkhagen H., Appl. Opt., 16, 1727—1731 (1977).
7. Brandt G. B., Appl. Opt., 8, 1421—1429 (1969).
8. Brandt G. B., Taylor L. H., Proc. Symp. Eng. Appl. Holography, SPIE, Redondo Beach, Calif., February 1972.
9. Brandt G. B., Rozelle P. F., Patel B. R., в кн.: «The Engineering Uses of Coherent Optics», Cambridge Univ. Press, London and New York, 1976, p. 577—591.
10. Brandt G. B., Gottlieb M., Conroy J. J., J. Opt. Soc. Amer., 67, 1269—1273 (1977).
11. Briers J. D., Opt. Quantum Electron., 8, 469—501 (1976).
12. Brooks R. E., Heflinger L. O., Wuerker R. F., IEEE J. Quantum Electron., QE-2, 275—279 (1966).
13. Brown G. M., Grant R. M., Stroke G. W., J. Acoust. Soc. Amer., 45, 1166—1179 (1969).
14. Bryngdahl O., J. Opt. Soc. Amer., 58, 865—871 (1968).
15. Collier R. J., Burckhardt C. B., Lin L. W., Optical Holography, Academic Press, New York, 1971. [Имеется перевод: Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. — М.: Мир, 1973.]
16. Dandliker R., Eliasson B., Ineichen B., Mottier F. M., в кн.: «The Engineering Uses of Coherent Optics» (ed. E. R. Roertson), Cambridge Univ. Press, London and New York, 1976.
17. Ennos A., частное сообщение, 1977.
18. Holographic Nondestructive Testing (ed. R. K. Erf), Academic Press, New York, 1974. [Имеется перевод: Голографические неразрушающие исследования. — М.: Машиностроение, 1979.]
19. Haines K. A., Hildebrand B. P., IEEE Trans. Instrum. Meas., IM-15, 149—161 (1966).
20. Haines K. A., Hildebrand B. P., Appl. Opt., 5, 595—602 (1966).
21. Heflinger L. O., Wuerker R. F., Brooks R. E., J. Appl. Phys., 37, 642—649 (1966).
22. Horman M. H., Appl. Opt., 4, 333—336 (1965).

23. Reference Data for Radio Engineers, 5th ed., ITT, New York, 1968, p. 21—27.
24. Lurie M., J. Opt. Soc. Amer., **58**, 614—619 (1968).
25. Lurie M., Zambuto J., Appl. Opt., **7**, 2323—2325 (1968).
26. Mayer G. M., J. Appl. Phys., **40**, 2863—2866 (1969).
27. Molin N., Stetson K. A., Optik, **31**, 157—177 (1970).
28. Molin N., Stetson K. A., Optik, **31**, 281—291 (1970).
29. Mollenauer L. F., Tomlinson W. J., Appl. Opt., **16**, 555—557 (1977).
30. Mottier F. M., в кн.: «Applications de L'Holographie» (eds. J. Ch. Vienot et al.), Besancon, France, 1970.
31. Neumann D. B., Jacobson C. F., Brown G. M., Appl. Opt., **9**, 1357—1362 (1970).
32. Powell R. L., Stetson K. A., J. Opt. Soc. Amer., **55**, 1593—1598 (1965).
33. The Engineering Uses of Coherent Optics (ed. E. R. Robertson), Cambridge Univ. Press., London and New York, 1976.
34. Sampson R. C., Exp. Mech., **10**, 313—320 (1970).
35. Sollid J. E., Opt. Eng., **14**, 460—469 (1975).
36. Steel W. H., Optica Acta, **17**, 873—881 (1970).
37. Tanner L. H., J. Sci. Instrum., **42**, 834—837 (1965).
38. Tanner L. H., J. Sci. Instrum., **43**, 81—83 (1966).
39. Taylor L. H., Brandt G. B., Exp. Mech., **12**, 543—548 (1972).
40. Tolansky S., An Introduction to Interferometry, 2nd ed., Wiley, New York, 1973.
41. Trolinger J. D., Opt. Eng., **14**, 470—481 (1975).
42. Tsuruta T., Shiota N., Itoh Y., Japan. J. Appl. Phys., **7**, 1092—1100 (1968).
43. Vest C. M., Appl. Opt., **14**, 1601—1606 (1975).
44. Vilkomerson D., Appl. Phys. Lett., **29**, 183—185 (1976).
45. Whitehead T. N., The Design and Use of Instrument and Accurate Mechanism; Underlying Principles, Macmillan, New York, 1934.
46. Wuerker R. F., в кн.: «The Engineering Uses of Coherent Optics» (ed. E. R. Robertson), Cambridge Univ. Press, London and New York, 1976, p. 517—540.

10.5. РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ И ЗНАКОВ

Д. Кейсасент

10.5.1. Введение

Распознавание образов (изображений или их фрагментов) и знаков (букв, цифр или символов) являются двумя наиболее привлекательными областями применения оптической обработки информации. Задача системы, предназначенной для распознавания образов или знаков, состоит в обнаружении интересующего нас образа (а также в определении его положения) во входном изображении. При распознавании знаков обычно используется постоянный банк или набор эталонных функций, принадлежащих большому классу функций, и задача системы состоит в том, чтобы определить, какая из этого класса эталонных функций присутствует на входе системы (а также в каком месте входной сцены она находится). Ключевой операцией во всех оптических системах распознавания образов и знаков является корреляция входной и эталонной функций или двух входных функций. Поэтому основное внимание в

данном параграфе мы уделим оптическим корреляторам. Будут рассмотрены схемы основных типов корреляторов, используемых для распознавания образов, в том числе основные уравнения, описывающие их работу, а также требования к разрешающей способности регистрирующих сред, применяемых для записи фильтров. В заключение мы обсудим некоторые практические инженерные проблемы, такие, как стабильность, требования к точности установки элементов коррелятора и возможности использования пространственно-временных модуляторов света.

Поскольку многие оптические процессоры являются системами, предназначенными для решения определенных задач, мы опишем также некоторые частные применения оптических корреляторов. Во многих случаях используется одно существенное свойство оптических корреляторов — способность управлять форматом входных данных. Особенно привлекательным является применение этого свойства при конструировании пространственно-инвариантных оптических корреляторов, которые мы также рассмотрим. Будут описаны как корреляторы изображений, так и корреляторы электрических сигналов, а также системы распознавания, в которых на вход подается не одна, а поступают две функции (входная и эталонная) в реальном времени одновременно и при этом не используется, как обычно, постоянная эталонная функция. Естественно, во всех рассматриваемых системах распознавания (если только допускают условия их применения) одна эталонная функция может быть заменена другой, но при этом система может стать более сложной. Другие предложения для осуществления практических систем распознавания образов оптическими методами предполагают использование предварительной и последующей за оптической электронной обработки, т. е. использование гибридных систем [14], а также многоканальных согласованных фильтров.

В наиболее распространенной схеме оптического коррелятора операция корреляции осуществляется перемножением фурье-образов входной и эталонной функций с последующим преобразованием Фурье полученного произведения. При этом эталонная функция записывается в виде своего комплексно-сопряженного фурье-образа. Поскольку эталонная функция помещается в частотной плоскости коррелятора, она по существу является пространственным фильтром. Амплитудное пропускание записанной эталонной функции в общем случае имеет комплексный характер и, следовательно, подобно амплитудному пропусканию голограммы (см. гл. 1). Однако цель пространственного фильтра-голограммы состоит в определении соответствия (согласования) между входным образом (или его частью) и эталонной функцией (а не в формировании эстетически приятного изображения на выходе, как в голографии). Таким образом, комплексный эталонный фурье-образ, расположенный в частотной плоскости, можно назвать согласо-

ным пространственным фильтром (СПФ) (см. разд. 4.3), поскольку считают, что он должен быть согласован с интересующим нас объектом или образом, которые необходимо распознать на входном изображении. Более классическое описание теории согласованной фильтрации рассматривает проблему обнаружения сигнала в шуме. В нашей задаче распознавания образов мы будем рассматривать в качестве полезного сигнала интересующий нас объект или эталонную функцию, которые мы ищем, а любые другие объекты, присутствующие на входе, или те части входного изображения, которые не являются интересующим нас объектом, мы будем относить к шуму.

Огромное практическое значение имеют вопросы синтеза пространственного согласованного фильтра и оптимизации его параметров. В разд. 10.5.15 мы обсудим наиболее интересные аспекты этой проблемы. При этом особое внимание будет уделено практически важному, но часто опускаемому из рассмотрения, случаю распознавания образов, когда входное изображение оказывается искаженной копией эталонной функции. В таком случае имеет место уменьшение корреляции, и мы обсудим вопрос, каким образом следует выбирать параметры синтезируемого СПФ, чтобы ослабить уменьшение интенсивности корреляционного пика. Получаемый в результате такого подхода фильтр мы по-прежнему будем называть согласованным пространственным фильтром, хотя очевидно, что степень действительного согласования его характеристик с эталонной функцией будет совсем иной.

В разд. 10.5.17 мы сделаем общие замечания по поводу того, чем отличаются задачи распознавания образов от задач распознавания знаков, и определим конкретные проблемы, которые в каждом случае рассматриваются как частные задачи. Будут обсуждены также общие соображения о будущих направлениях работ в области оптического распознавания образов и знаков.

Из всего многообразия оптических корреляторов для подробного рассмотрения мы выбрали 13 схем. При анализе всех схем используются одни и те же обозначения для соответствующих величин. Например, входная плоскость, плоскость преобразования и выходная корреляционная плоскость обозначены соответственно P_1 , P_2 и P_3 с пространственными координатами в этих плоскостях соответственно (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_3, y_3) . Координаты пространственных частот в плоскости преобразования обозначены через $(u, v) = (x_2/\lambda f_1, y_2/\lambda f_1)$, где λ — длина волны используемого света, а f_1 — фокусное расстояние фурье-преобразующей линзы (фокусное расстояние второй фурье-преобразующей линзы мы обозначим f_2). Функции пространственных переменных обозначаются строчными буквами, а их фурье-образы — соответствующими прописными.

10.5.2. Коррелятор с частотной плоскостью

Первым и самым распространенным оптическим коррелятором является коррелятор с частотной плоскостью¹⁾ [22] или система согласованной пространственной фильтрации. На рис. 1 приведена схема такого коррелятора, используемого в лабораторных исследованиях. Чтобы получить взаимную корреляцию функций $g(x_1, y_1)$ и $h(x_1, y_1)$, необходимо сначала синтезировать в плоскости P_2 пространственный фильтр $H^*(u, v)$, согласованный с $h(x_1, y_1)$.

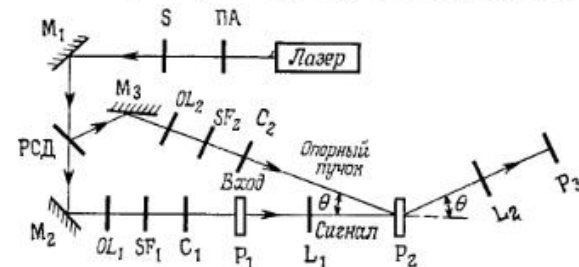


Рис. 1. Схема коррелятора с частотной плоскостью. ПА — переменный attenuator; S — фотозатвор; M — зеркало; РСД — регулируемый светоделитель; OL — линза микробиъектива; SF — точечный пространственный фильтр низких частот; C_1 и C_2 — коллимирующие линзы; L_1 и L_2 — фурье-преобразующие линзы.

Для синтеза этого фильтра во входную плоскость P_1 помещают транспарант с записью функции $h(x_1, y_1)$, а в плоскости P_2 записывают интерференционную картину, создаваемую фурье-образом $H(u, v)$ функции $h(x_1, y_1)$ (формируемым линзой L_1 в плоскости P_2) и плоской опорной волной. Переменный attenuator ПА облегчает настройку элементов схемы и обеспечивает визуальный контроль картин распределений света в различных плоскостях схемы. Переменный светоделитель РСД позволяет управлять отношением интенсивностей опорного и объектного пучков.

Для выравнивания длин оптических путей, проходимых опорным и объектным пучками, применяется зеркало M_3 . Такая геометрия облегчает также установку угла между опорным и объектным пучками, который в наших экспериментах составлял обычно 15° , а также упрощает компоновку элементов коррелятора на столе. При этом значении угла пространственные частоты интерференционной картины оказываются достаточно высокими²⁾. Чтобы зарегистрировать эту интерференционную картину, фотопленка должна обладать соответствующей разрешающей способностью.

¹⁾ Это утверждение справедливо для оптических корреляторов с когерентным освещением. В литературе корреляторы в частотной плоскости называют также корреляторами Вандер Люгта. — Прим. перев.

²⁾ При использовании излучения с $\lambda = 632,8$ нм пространственная несущая частота оказывается равной 412 мм^{-1} . — Прим. перев.

Если же разрешающая способность используемого материала недостаточна для записи столь высоких пространственных частот, между опорным и объектным пучками следует установить меньший угол. При этом для сведения пучков под малым углом потребуются светоделитель и дополнительные оптические элементы (или линзы с большим фокусным расстоянием). Использование в каждом из пучков системы пространственной фильтрации, состоящей из микрообъектива OL и точечной диафрагмы SF, помогает устранить шумы лазерного пучка¹⁾. Эти системы устанавливаются после зеркал, чтобы уменьшить влияние их дефектов. В наших экспериментах мы использовали коллимирующую оптику, обеспечивающую формирование очень однородных плоских волн, причем изменение интенсивности по сечению пучка составляет не более 5%. Однако во многих случаях не обязательны такие жесткие требования.

После того как согласованный пространственный фильтр изготовлен и вновь установлен в плоскости P_2 , мы поворачиваем его на 180° вокруг оптической оси. Благодаря этому корреляция будет наблюдаться под углом $+15^\circ$ по отношению к оси объектного пучка, т. е. в пределах поверхности стола, а не под углом -15° в направлении продолжения опорного пучка. Этот простой прием позволяет использовать стол с меньшей площадью. При выполнении операции корреляционного анализа опорный пучок блокируется, а во входную плоскость помещают транспарант с амплитудным пропусканием $g(x_1, y_1)$. Волна, несущая информацию о корреляции входного и эталонного изображений, будет исходить из плоскости P_2 под углом 15° к оптической оси коррелятора. Вторая фурье-преобразующая линза L_2 устанавливается вдоль этого направления на фокусном расстоянии от плоскости P_2 , а не вдоль оси сигнального пучка, как это обычно делают. Такая схема коррелятора существенно уменьшает требования к размерам апертур и углам поля зрения используемых линз.

Рассмотрим основные математические соотношения, описывающие работу этого коррелятора. Сначала проанализируем стадию, на которой осуществляется синтез согласованного пространственного фильтра. Если во входной плоскости P_1 поместить транспарант с амплитудным пропусканием $h(x_1, y_1)$, то распределение комплексных амплитуд в плоскости P_2 будет равно $U_2(x_2, y_2) = H(u, v)$, где $H(u, v)$ — комплексный фурье-образ функции $h(x_1, y_1)$; таким образом,

$$H(u, v) = \frac{1}{i\lambda f_1} \iint h(x, y) \exp[-2\pi i(uv + vy)] dx dy.$$

Предположим для простоты, что любые преобразования Фурье, реализуемые с помощью линз, выполняются точно и, следовательно,

¹⁾ Имеются в виду различные пространственные микроструктурные неоднородности пучка, а не его временные шумы. — Прим. перев.

мы пренебрегаем постоянными коэффициентами амплитудного пропускания, а также множителем $-i/\lambda f_1$ перед интегралом. Координаты пространственных частот (u, v) в плоскости P_2 связаны с пространственными координатами (x_2, y_2) этой плоскости соотношениями $x_2 = f_1 \lambda u$ и $y_2 = f_1 \lambda v$, где λ — длина волны света, а f_1 — фокусное расстояние фурье-преобразующей линзы L_1 .

Распределение комплексных амплитуд, создаваемое в плоскости P_2 опорным пучком с постоянной амплитудой r_0 , который падает на эту плоскость под углом θ к объектному пучку, имеет вид $U_r = r_0 \exp(-i2\pi \alpha x_2)$, где $\alpha = \sin \theta / \lambda$ — пространственная частота, связанная с наклонным падением опорной волны в предположении, что опорная волна образует угол θ с осью x_2 в плоскости P_2 .

При записи согласованного фильтра полагают, что амплитудное пропускание помещаемого в плоскости P_2 светочувствительного материала (обычно это фотопленка) пропорционально распределению интенсивности падающего на него света. (Это соответствует выполнению условия $\gamma = -2$, рассмотренного в § 2.4 и 2.6.) При интерференции в плоскости P_2 распределений U_2 и U_r , создаваемых соответственно объектным и опорным пучками, амплитудное пропускание полученного согласованного фильтра запишется в виде

$$t(x_2, y_2) = |U_2 + U_r|^2 = r_0^2 + |H|^2 + r_0 H \exp(i2\pi \alpha x_2) + r_0 H^* \exp(-i2\pi \alpha x_2). \quad (1)$$

Для получения корреляции опорный пучок перекрывается, в плоскости P_2 помещается согласованный фильтр $t(x_2, y_2)$, а во входной плоскости P_1 устанавливается транспарант с амплитудным пропусканием $g(x_1, y_1)$. При этом распределение комплексных амплитуд света, падающего на плоскость P_2 , описывается функцией $G(u, v)$, и после прохождения этого распределения через согласованный фильтр мы имеем $G(u, v) t(x_2, y_2)$. Поскольку плоскость P_2 совмещена с передней фокальной плоскостью второй фурье-преобразующей линзы L_2 с фокусным расстоянием f_2 , распределение комплексных амплитуд в задней фокальной плоскости этой линзы представляет собой фурье-образ произведения $G \cdot t$; таким образом,

$$U_3(x_3, y_3) = r_0^2 g \delta(x, y) + [h \star h \star g] \delta(x, y) + r_0 [h \star g \star \delta(x_3 + \alpha \lambda f_2, y_3)] + r_0 [g \star h \star \delta(x_3 - \alpha \lambda f_2, y_3)]; \quad (2)$$

здесь \star обозначает свертку, а \star — корреляцию.

В выражении (2) два первых слагаемых соответствуют распределениям, локализованным на оптической оси в выходной плоскости. Третье слагаемое представляет собой свертку $h \star g$, которая формируется пучком, исходящим из плоскости P_2 под углом $+\theta$, и это распределение локализуется в выходной плоскости в окрестности точки с координатами $(-\alpha \lambda f_2, 0)$. Распределение, описыва-

емое последним слагаемым с интересующей нас корреляцией $g \star h$, создается пучком, исходящим из плоскости P_2 под углом $-\theta$, и локализуется в выходной плоскости вокруг точки с координатами $(\alpha\lambda f_2, 0)$. В действительности при установке фотопластинки с записанным на ней согласованным фильтром в плоскость P_3 ее поворачивают на 180° вокруг оптической оси, а линзу L_2 помещают в пучок, выходящий из плоскости P_2 под углом $+\theta$, чтобы сформировать на выходе распределение, описываемое последним слагаемым. Тогда распределение, формируемое в задней фокальной плоскости линзы L_2 на ее оптической оси, представляет собой интересующую функцию взаимной корреляции $g \star h$. Различные другие участки входной плоскости отображаются в окрестности начала координат сформированной таким образом выходной корреляционной плоскости. Следует заметить, что положение яркого пятна света в этой плоскости однозначно связано с положением эталонной функции h во входном изображении g ; интенсивность этого пятна указывает на степень соответствия между h и g . С целью упрощения обозначений при определении координат (x_3, y_3) в плоскости P_3 направления координатных осей, как правило, меняют на обратные по отношению к координатным осям в плоскостях P_1 и P_2 .

В силу линейности рассматриваемого коррелятора наличие многих эталонных функций h во входном изображении g приводит к появлению большого числа корреляционных пиков в плоскости P_3 . Это хорошо иллюстрируется примером, приведенным на рис. 2. Здесь роль входной функции g выполняет часть текста, в которой шесть раз встречается слово RADAR (см. рис. 2, а), а в качестве эталонной функции h используется согласованный фильтр для слова RADAR. На рис. 2, б показано распределение интенсивности в плоскости P_3 , полученное в результате корреляционного анализа по схеме на рис. 1. На рис. 2, в показано то же распределение в выходной плоскости, но после введения порогового ограничения. Из сравнения рис. 2, а и 2, в нетрудно заметить, что имеется шесть ярких точек, расположенных в соответствии с положениями шести слов RADAR во входной плоскости. Масштабный коэффициент между входной и корреляционной плоскостями равен отношению фокусных расстояний f_2/f_1 двух фурье-преобразующих линз. Наличие на рис. 2, б многих хорошо заметных пиков взаимной корреляции, представляет собой одну из проблем, характерную для оптического распознавания слов и знаков. Эту проблему мы обсудим в разд. 10.5.17.

Если эталонная функция h соответствует значительно большему размеру интересующей нас сцены или участка, описываемых функцией g , то корреляционный пик располагается на оси в плоскости P_3 при условии, что g занимает то же самое положение во входной плоскости, которое занимала эталонная функция h при

THE DEVELOPMENT OF RADAR DURING WORLD WAR II BROUGHT RADAR FROM A LABORATORY CONCEPT TO A MATURE DISCIPLINE IN JUST A FEW SHORT YEARS. SINCE 1945 RADAR TECHNOLOGY HAS BECOME SO SOPHISTICATED THAT THE BASIC RECTANGULAR PULSE RADAR SIGNAL IS NO LONGER SUFFICIENT IN THE DESIGN OF MANY NEW RADAR SYSTEMS. MORE COMPLEX RADAR SIGNALS MUST BE TAILORED TO SPECIFIC REQUIREMENTS.

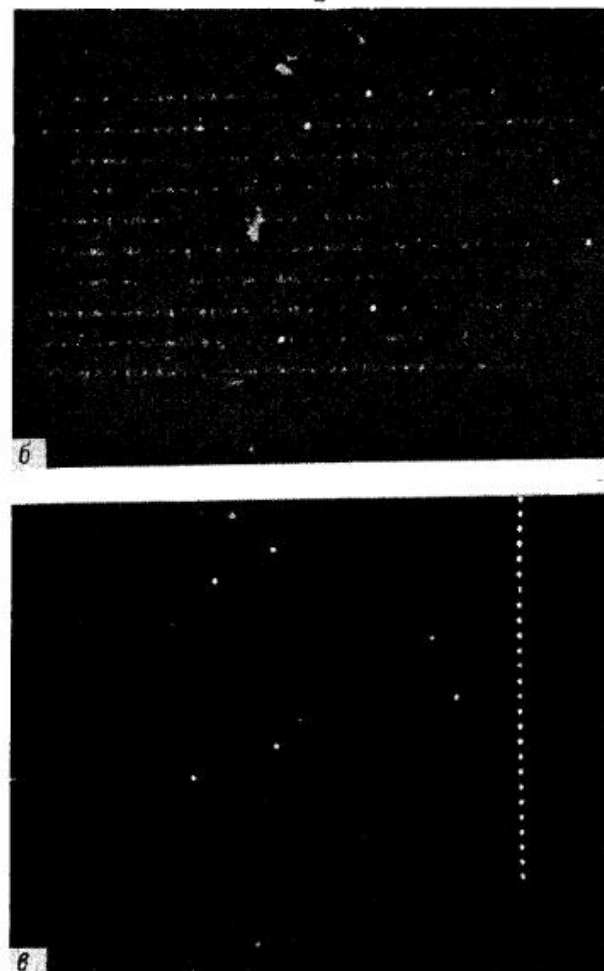


Рис. 2. Пример оптического распознавания знаков с помощью коррелятора с частотной плоскостью, изображенного на рис. 1. а — входное изображение; б — картина на выходе в плоскости корреляции; в — картина на выходе после введения порогового ограничения [14].

записи фильтра. Любое смещение g из этого положения приведет к смещению корреляционного пика в плоскости P_2 . Если функция g расположена на оси во входной плоскости, то положение корреляционного пика в плоскости P_2 будет характеризовать (с точностью до множителя f_2/f_1) взаимное положение h и g .

Перейдем теперь к рассмотрению весьма важной характеристики данного и других оптических корреляторов, а именно проанализируем требования к разрешающей способности материалов, используемых для записи согласованных фильтров в частотной плоскости [4]. В целях упрощения анализа мы будем рассматривать одномерные функции. Обозначим ширины входной и эталонной функций соответственно через W_g и W_h и рассмотрим три случая:

1) $W_g \gg W_h$, 2) $W_h \gg W_g$ и 3) $W_h = W_g$.

Сначала установим требования к разрешающей способности в частотной плоскости P_2 , необходимые для осуществления записи СПФ. Для этого определим импульсный отклик согласованного пространственного фильтра, подставив в выражение (2) вместо входной функции $g(x, y)$ дельта-функцию $\delta(x, y)$. Таким образом,

$$U_2(x_2, y_2) = r_0^2 \delta(x_2, y_2) + r_1 h * r_2 h * \delta(x_2 \pm \alpha \lambda f_2). \quad (3)$$

Положения каждого из этих членов импульсного отклика в корреляционной плоскости, а также их размеры для каждого из трех указанных выше случаев приведены в табл. 1, а в табл. 2 представлены аналогичные параметры для случая взаимной корреляции.

Таблица 1

Положение и ширина отдельных слагаемых импульсного отклика СПФ на выходе коррелятора с частотной плоскостью

Слагаемое	Положение	Ширина
r_0	Начало координат	0
$h \star h$	« »	$2W_h$
$r_0 h$	$x_2 = -\alpha \lambda f_2$	W_h
$r_0 h$	$x_2 = +\alpha \lambda f_2$	W_h

В общем случае ширина распределения, соответствующего импульсному отклику согласованного фильтра, равна $4W_h$ (при обязательном выполнении условия $\alpha \lambda f_2 = 1,5W_h$, чтобы обеспечить полное разделение всех членов импульсного отклика). Таким образом, требуемое разрешение (число линий на миллиметр) в плоскости P_2 оказывается равным $0,25 W_h$, а используемый для записи СПФ

Таблица 2

Положение и ширина отдельных слагаемых распределения на выходе коррелятора с частотной плоскостью

Слагаемое ¹⁾	Положение	Ширина
$r_0 g$	Начало координат	W_g
$h \star h * g$	« »	$2W_h + W_g$
$h * g$	$x_2 = -\alpha \lambda f_2$	$W_h + W_g$
$h \star g$	$x_2 = +\alpha \lambda f_2$	$W_h + W_g$

¹⁾ h — импульсный отклик фильтра; g — входная функция

материал должен обеспечить ширину полосы пропускания пространственных частот, равную $4W_h/\lambda f_1$. Однако, если нам необходимо обеспечить пространственное разделение члена взаимной корреляции от всех других, присутствующих в выходной плоскости, то из табл. 2 следует, что для этого должно выполняться условие $\alpha \lambda f_2 \geq 0,5(2W_g + 3W_h)$. Используя при вычислении импульсного отклика удовлетворяющее этому условию значение величины $\alpha \lambda f_2$ (например, в случае $W_h = W_g = W$ можно принять $\alpha \lambda f_2 = 5W/2$), находим ширину импульсного отклика равной $2\alpha \lambda f_2 + W_h$. В табл. 3

Таблица 3

Требования к разрешающей способности и полосе пропускания материала, используемого для записи СПФ в корреляторе с частотной плоскостью

Условие ¹⁾	Разрешение	Ширина полосы пропускания
$W_h \gg W_g$	$W_h/4$	$4W_h/\lambda f_1$
$W_g \gg W_h$	$W_g/2$	$2W_g/\lambda f_1$
$W_g = W_h$	$W/6$	$6W/\lambda f_1$

¹⁾ h — импульсный отклик фильтра; g — входная функция; W — ширина соответствующих функций в пространственной области.

обобщены требования к разрешающей способности (в линиях на мм) и ширине полосы пропускания пространственных частот (определяемой по числу линий или разрешимых точек) коррелятора для трех указанных выше случаев.

Рассмотрим теперь контрастность интерференционной картины в плоскости P_2 . Это принесет пользу при обсуждении вопроса об оптимизации параметров СПФ (см. разд. 10.5.15), а также облегчит анализ других схем корреляторов. Если в выражении (1) записать амплитуду и фазу комплексной переменной H в виде $H(u, v) = |H(u, v)| \exp(i\varphi)$, то можно получить следующее выражение для экспозиции в плоскости P_2 :

$$E(x_2, y_2) = (r_0^2 + |H|^2) T + 2r_0 |H| T \cos[2\pi\alpha x_2 + \varphi(x_2, y_2)], \quad (4)$$

где T — время экспозиции. Если записать экспозицию смещения рабочей точки в виде $E_B = r_0^2 T$, среднюю экспозицию как $E_0 = (r_0^2 + |H|^2) T$, а отношение интенсивностей опорного и объектного пучков примем равным $K = r_0^2 / |H|^2$, то выражение (4) и принимает вид

$$E(x_2, y_2) = E_B [1 + 1/K + (2/\sqrt{K}) \cos \psi], \quad (5)$$

где $\psi = 2\pi\alpha x_2 + \arg(H)$. Единственное замечание, которое мы хотим сделать, — это то, что K изменяется в пространстве, поскольку изменяется $|H|$, и тем самым создается модуляция интерференционных полос, которая зависит от K , E_B и от характера кривой $I - E$ (зависимость амплитудного пропускания от экспозиции) для материала, используемого при записи СПФ в плоскости P_2 . Выбор оптимальных параметров СПФ и использование их для ослабления деградации корреляции мы подробно обсудим в разд. 10.5.15 и 10.5.16.

В заключение рассмотрим вопрос о том, какие можно допустить с практической точки зрения относительные смещения элементов коррелятора с частотной плоскостью и их вибрацию. Для простоты проанализируем одномерный случай. Напишем выражение для автокорреляции входной функции g :

$$\rho(x) = \int G(u) G^*(u) \exp(-i2\pi ux) du, \quad (6)$$

где G — одномерный фурье-образ функции g , определяемый следующим образом:

$$G(u) = \int g(x') \exp(-i2\pi ux') dx'.$$

Если СПФ вида $G^*(u)$ сместить в частотной плоскости на величину Δu , то для автокорреляционной функции имеем

$$\rho(x) = \int g(x') g^*(x + x') \exp[i2\pi \Delta u (x + x')] dx'. \quad (7)$$

Отсюда следует, что фазовые искажения, обусловленные смещением фильтра на величину Δu , должны удовлетворять соотношению $|\varphi| \leq \pi W x \Delta u$, где W — ширина входного сигнала, причем предполагается, что ширина автокорреляционной функции равна $\pm W$. Чтобы обеспечить хорошую интерференционную картину, мы

должны потребовать выполнения условия $\varphi \leq \pi/4$. Сделав подстановку $u = x_2 / \lambda f_1$, находим выражение для допуска на смещение фильтра:

$$\Delta x_2 = \lambda f_1 / 4W. \quad (8)$$

В случае $\lambda = 633$ нм, $f_1 = 600$ мм и $W = 35$ мм допустимое отклонение в положении фильтра не должно превышать $\Delta x_2 = 2,7$ мкм.

Разумеется, в объеме данного параграфа нельзя подробно рассмотреть допуски на точность установки фильтра для каждой из рассматриваемых здесь 13 схем оптических корреляторов. Мы рассмотрели многие практически важные вопросы оптической корреляции на примере только одной схемы коррелятора, поскольку эта схема получила наиболее широкое применение. С другой стороны, приведенное здесь рассмотрение хорошо иллюстрирует методы анализа и операции, которые можно также с успехом использовать для определения аналогичных характеристик в случае других схем корреляторов.

10.5.3. Коррелятор с переменным масштабом

Незначительная модификация основной схемы оптического коррелятора с частотной плоскостью (например, размещение входной плоскости P_1 не перед фурье-преобразующей линзой L_1 , а за ней, как показано на рис. 3) позволяет менять масштаб преобразования Фурье в плоскости P_2 путем изменения расстояний d и d_2 [23]. В этом случае распределение комплексных амплитуд в плоскости P_2 , создаваемое транспарантом $g(x_1, y_1)$, расположенным в плоскости P_1 , дается выражением

$$U(x_1, y_1) = (f_1 / i\lambda d^2) G(u, v) \times \exp[ik(x_1^2 + y_1^2) / 2d], \quad (9)$$

где $k = 2\pi/\lambda$. Из этого выражения следует, что, изменяя расстояние d и, следовательно, положение входной плоскости P_1 , можно менять масштаб преобразования Фурье. Согласованный пространственный фильтр $G^*(u, v)$ для функции $g(x_1, y_1)$ образуется в плоскости P_2 как результат записи интерференции распределения, описываемого выражением (2), с плоской волной. При этом во входную плоскость P_1 помещают транспарант с записью новой функции $g_1(x_1, y_1)$, которая представляет собой функцию $g(x_1, y_1)$, но с другим масштабом. Заметим, что теперь плоскость P_1 отстоит от плоскости P_2 на расстояние $D = md$, где m — масштабный коэффициент для двух

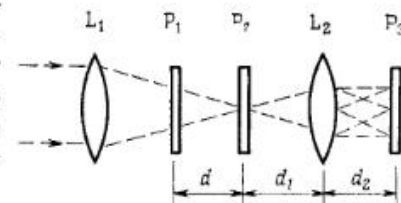


Рис. 3. Схема коррелятора с регулировкой по масштабу: P_1 — входная плоскость; P_2 — частотная плоскость; P_3 — выходная плоскость корреляции; L_1 и L_2 — фурье-преобразующие линзы.

функций. При изменении расстояния D изменяется и масштаб преобразования Фурье функции g_1 , до тех пор пока фурье-образы функций g и g_1 не окажутся согласованными по масштабу. В этот момент в плоскости P_3 появится яркая точка, соответствующая пику максимума взаимной корреляции.

В действительности условия фокусировки и преобразования Фурье выполняются при фиксированном расстоянии между плоскостями P_1 и P_3 , равном $3d$, причем должно иметь место соотношение $D \ll 2d$. Таким образом, данный коррелятор обеспечивает поиск по масштабу только в пределах 20%, поскольку при $m=1,2$ плоскость корреляции смещается на 30 мм или на 20% для фурье-преобразующих линз с фокусным расстоянием 762 мм [6]. В своих экспериментах мы обнаружили, что управление перемещением держателей линз и транспарантов во входной плоскости вдоль оси z существенно облегчает использование такого коррелятора. Всегда имеется необходимость в корреляторах, позволяющих осуществлять поиск по масштабу, поскольку на практике очень трудно получить два изображения одной и той же сцены без некоторого изменения масштаба¹⁾. Размещение входной плоскости за фурье-преобразующей линзой в какой-то степени снижает требование к этой линзе²⁾, что также является достоинством рассматриваемого коррелятора.

Другой подход к реализации оптической корреляции, инвариантной к масштабу входного изображения, предполагает использование в частотной плоскости P_2 сложных согласованных пространственных фильтров. Корреляторы с многоканальными согласованными фильтрами мы обсудим кратко в разд. 10.5.13. Новый и весьма многообещающий подход к проблеме оптической корреляции, инвариантной к масштабу, основан на использовании оптического процессора, реализующего преобразование Меллина. Такой коррелятор мы рассмотрим в разд. 10.5.10.

10.5.4. Коррелятор с одновременным преобразованием [20]

Схема коррелятора с одновременным преобразованием приведена на рис. 4. В этой схеме транспаранты с записью функций, взаимную корреляцию которых требуется определить, помещаются во входной плоскости рядом друг с другом. Предполагается, что каждая функция имеет ширину b , а расстояние между центрами функций равно $2b$ (см. рис. 4). Амплитудное пропускание в плоскости P_1 можно записать в виде

$$U_1(x_1, y_1) = g(x_1, y_1 - b) + h(x_1, y_1 + b). \quad (10)$$

¹⁾ Речь идет об аэрофотоснимках и космических снимках. — Прим. перев.

²⁾ Имеются в виду требования к размерам рабочей апертуры фурье-преобразующей линзы. — Прим. перев.

Распределение комплексных амплитуд света в плоскости P_2 равно фурье-образу амплитудного пропускания, определяемого этим выражением,

$$G(u, v) \exp(-i2\pi uv) + H(u, v) \exp(i2\pi uv). \quad (11)$$

В плоскости P_2 регистрируется квадрат модуля этого распределения, и мы полагаем, что последующее амплитудное пропускание

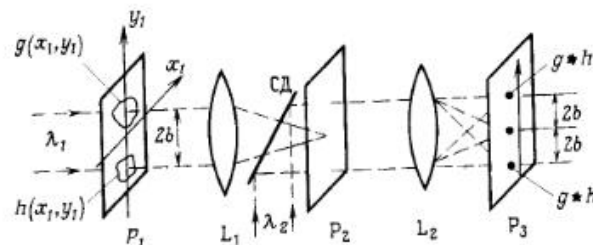


Рис. 4. Схема коррелятора с одновременным преобразованием.

в плоскости P_2 дается выражением

$$t_2(u, v) = |G|^2 + |H|^2 + GH^* \exp(-i4\pi uv) + G^*H \exp(+i4\pi uv). \quad (12)$$

Это распределение регистрируется с использованием записывающего света на длине волны λ_1 (рис. 4). Затем плоскость P_2 освещается волной считывающего света на длине волны λ_2 (рис. 4); эта волна отражается от светоделителя (СД). Линза L_2 формирует в плоскости P_3 фурье-образ функции $t_2(u, v)$, причем распределение света имеет вид

$$U_3(x_3, y_3) = g \star g + h \star h + g \star h \star \delta(x_3, y_3 + 2b) + h \star g \star \delta(x_3, y_3 - 2b). \quad (13)$$

Таким образом, мы видим, что в плоскости P_3 формируется интересующая нас взаимная корреляция функций g и h , которая локализуется в точке с координатами $(0, \pm 2bf_2/f_1)$.

Рассмотрим этот коррелятор более подробно, поскольку он имеет много интересных практических особенностей и преимуществ. Чтобы в полной мере реализовать преимущества оптической обработки информации, необходимо во входной плоскости P_1 (а иногда также и в частотной плоскости P_2 в схеме на рис. 1) использовать пространственно-временные модуляторы света [13]. Что касается регистрирующей среды, используемой в плоскости P_2 для записи СПФ, то она должна обеспечивать запись согласованных фильтров в реальном времени и допускать многократные циклы записи и стирания только в том случае, когда требуется быстрая смена эталонных функций. В схеме же коррелятора на рис. 4 ма-

териал, используемый в плоскости P_2 , должен в принципе обеспечивать циклическую запись в реальном времени. Большинство модуляторов, работающих в реальном времени, имеют оптическую адресацию и работают на отражение. Поэтому используемый для считывания светоделитель обычно будет располагаться справа от плоскости P_2 . Однако более важным является то обстоятельство, что многие модуляторы, работающие в реальном времени, требуют использовать для записи и считывания свет с различными длинами волн (λ_1 и λ_2 на рис. 4). Если в корреляторе с частотной плоскостью, изображенном на рис. 1, согласованный пространственный фильтр записан на длине волны λ_1 , а последующее считывание и корреляционный анализ осуществляются на длине волны λ_2 , то это приведет к изменению масштаба и потере разрешения в эталонной функции. Кроме того, если учесть, что многие из материалов, которые могли бы быть использованы в плоскости P_2 для циклической записи согласованных фильтров в реальном времени, не обладают памятью, то становится очевидной бесполезность их применения в корреляторах с частотной плоскостью. Однако не существует никаких проблем для использования таких материалов в корреляторах с одновременным преобразованием. В этом корреляторе предъявляются менее жесткие допуски на точность установки его элементов, чем в корреляторе с частотной плоскостью, поскольку в данном случае плоскость P_2 освещается плоской волной. Коррелятор с одновременным преобразованием предпочтительно применять также в тех случаях, когда обе функции, корреляцию которых требуется определить, поступают на вход в реальном времени или

Таблица 4

Положение и ширина слагаемых импульсного отклика или корреляционного распределения на выходе коррелятора с одновременным преобразованием

Слагаемое	Положение	Ширина
$g \star g$	Начало координат	$2W_g$
$h \star h$	« »	$2W_h$
$g \star h$	$y_2 = -2b$	$W_g + W_h$
$h \star g$	$y_2 = +2b$	$W_g + W_h$

тра P_2 модуляторов, работающих в реальном времени.

Рассмотрим теперь требования по разрешению и полосе пропускания, предъявляемые к материалам, используемым в плоскости фурье-преобразования P_2 [4]. (Заметим, что, если во входной плоскости используется один и тот же материал или прибор, то по

сравнению с коррелятором с частотной плоскостью в данной схеме этот материал должен иметь в три раза более широкую полосу пропускания пространственных частот. Однако при этом можно использовать две входные плоскости и две линзы L_1 .) Требования к модулятору на входе остаются одинаковыми как в корреляторе с частотной плоскостью, так и в корреляторе с одновременным преобразованием. Требования к разрешению и полосе пропускания в плоскости P_2 проанализируем таким же образом, как и в разд. 10.5.2. Импульсный отклик распределения ¹⁾, формируемого в плоскости P_2 , оказывается идентичным картине корреляции в выходной плоскости, поскольку для получения корреляции плоскость P_2

Таблица 5

Разрешение и полоса пропускания, требуемые для материала, используемого в частотной плоскости P_2 коррелятора с одновременным преобразованием

Вариант	Разрешение	Полоса пропускания
$W_h \gg W_g$	$0,25 W_h$	$4W_h/\lambda f_1$
$W_g \gg W_h$	$0,25 W_g$	$4W_g/\lambda f_1$
$W_h = W_g$	$W/6$	$6W/\lambda f_1$

освещается плоской волной. В табл. 4 приведены значения для ширины и координат положения слагаемых, образующих импульсный отклик (или корреляционное распределение) в рассматриваемой схеме коррелятора, которые непосредственно вытекают из выражения (13). Как видно из табл. 4, полная ширина импульсного отклика в случае $W_h \gg W_g$ равна $4W_h$, в случае $W_g \gg W_h$ равна $4W_g$, а в случае $W_g = W_h = W$ составляет $6W$. В табл. 5 приведены вытекающие отсюда требования к разрешению и полосе пропускания для частотной плоскости P_2 . Сравнив данные этой таблицы с соответствующими данными табл. 3, приходим к выводу, что требования к разрешению одинаковы для обоих корреляторов, за исключением случая $W_g \gg W_h$. В этом случае (который аналогичен случаю, когда согласованный фильтр изготовлен на единственный знак или объект, а требуется произвести корреляционный анализ части текста или большой сцены) требования к разрешению для коррелятора с одновременным преобразованием оказываются в два раза выше, и, следовательно, в данном случае коррелятор с частотной плоскостью будет лучше.

Другим преимуществом коррелятора с одновременным преобразованием является то, что он формирует очень контрастную интерференционную картину и, как следствие этого, обеспечивает хорошую модуляцию всех составляющих в спектре пространственных частот функций g и h . Таким образом, здесь не требуется (и

¹⁾ Речь идет об импульсном отклике зарегистрированной в плоскости P_2 голограммы. — Прим. перев.

даже не допускается) управление параметрами согласованного пространственного фильтра (см. разд. 10.5.15), которое требуется в корреляторе с частотной плоскостью. Чтобы показать это, перепишем выражение (12) через пространственные координаты (x_2, y_2) плоскости P_2 , а именно в виде

$$t_2(x_2, y_2) = |G|^2 + |H|^2 + 2|G||H|\cos[4\pi y_2 b/\lambda f_1 + \varphi(x_2, y_2)], \quad (14)$$

где $\varphi = \arg(GH^*) = \arg G - \arg H$. В случае $g=h$ получаем

$$t_2(x_2, y_2) = 2|G|^2[1 + \cos(4\pi y_2 b/\lambda f_1)]. \quad (15)$$

Сравнивая это выражение с выражением (5), полученным для коррелятора с частотной плоскостью, мы видим, что в корреляторе с одновременным преобразованием на всех пространственных частотах формируются интерференционные полосы со 100%-ным контрастом. В некоторых случаях получение интерференционной картины с абсолютным контрастом весьма желательно, и тогда предпочтительнее использовать не коррелятор с частотной плоскостью, а коррелятор с одновременным преобразованием, который в этом смысле является оптимальным.

Поскольку интенсивность интерференционных полос в плоскости P_2 изменяется по закону $(1 - \cos x)/2$, экспозиция в этой плоскости изменяется от 0 до своего максимального значения в синусоидальной волне и вся модуляция должна определяться входным светом. При умеренных экспозициях мы будем находиться на изгибе кривой $I - E$, где коэффициент усиления мал. В этом случае необходима некогерентная подсветка плоскости P_2 , которая обеспечит смещение рабочей точки на линейный участок.

10.5.5 Многоканальный одномерный коррелятор [9]

Рассмотренные выше корреляторы предназначены для использования в задачах распознавания двумерных сигналов, т. е. изображений. В данном разделе мы рассмотрим многоканальный одномерный коррелятор, используемый для обработки сложных сигналов, а также для синтеза функций неопределенности. Все рассмотренные ранее корреляторы можно легко преобразовать в многоканальные одномерные корреляторы, если каждую сферическую фурье-преобразующую линзу заменить комбинацией из цилиндрической и сферической линз. Обсуждаемый ниже коррелятор, схема которого приведена на рис. 5, отличается от указанных одномерных корреляторов тем, что в нем линза L_2 является сферической, а не комбинацией цилиндрической и сферической линз. Этот коррелятор представляет собой один из вариантов многих возможных схем построения корреляторов, служит хорошим примером осуществления корреляции сигналов и демонстрирует свои

возможности с целью его использования для управления форматом входных данных.

Комбинация из цилиндрической L_{c1} и сферической L_{s1} линз формирует в вертикальном направлении изображение входного транспаранта, а в горизонтальном отображает его одномерное преобразование Фурье. Таким образом, N горизонтальных строк

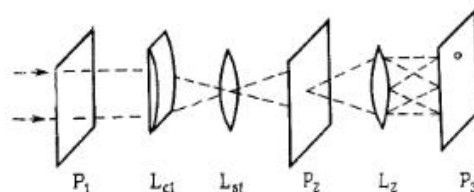


Рис. 5. Схема многоканального одномерного коррелятора.

с записями сигналов в плоскости P_1 отображается этой системой линз в плоскость P_2 в виде N горизонтальных строк, причем на каждой из этих строк формируется преобразование фурье-сигнала, записанного на соответствующей строке в плоскости P_1 . Мы рассмотрим частный случай, когда все N сигналов представляют собой один и тот же сигнал сложной формы (x_1) . После того как выполнено многоканальное одномерное фурье-преобразование такого транспаранта и получена его интерференция на этапе изготовления согласованного фильтра с внеосевым опорным пучком в плоскости P_2 , амплитудное пропускание в плоскости P_2 можно записать в виде

$$U_2(x_2, y_2) = \sum_{n=1}^N S^*(u, y_2 - nd_2) \exp(-i2\pi\alpha x_2) \exp(-i2\pi u x_2). \quad (16)$$

Входящее в это выражение расстояние d_2 между соседними каналами в плоскости P_2 связано с соответствующим расстоянием d_1 во входной плоскости P_1 соотношением $d_2 = (f_{s1}/f_{c1})d_1$, где f_{s1} и f_{c1} — фокусные расстояния сферической и цилиндрической линз соответственно. Множитель вида $\exp(-i2\pi\alpha x_2)$ обусловлен наклонным падением опорного пучка, а $\exp(-i2\pi u x_2)$ учитывает то, что начало опорного сигнала находится в точках $x_1 = x_r$, выбранных для входного сигнального кода.

Таким образом, в плоскости P_2 помещается многоканальный согласованный фильтр на опорные сигналы, а во входной плоскости P_1 устанавливается запись многоканальной входной функции, такая, что начальные координаты сигнала на строке $n=1$ равны $x_1 = x_s$, причем смещение начала вдоль строки составляет $\Delta x_r = x_s - x_r$, а разностный сдвиг от строки к строке равен Δx_φ . В этом случае амплитудное пропускание в плоскости P_1 можно записать

в виде

$$t_1(x_1, y_1) = \sum_{n=1}^N s(x_1 - x_s + n\Delta x_\varphi, y_1 - nd_1). \quad (17)$$

Это выражение соответствует записи на N строках временных изменений сигналов, принятых N элементами фазированной антенной решетки радиолокатора. Относительный сдвиг в положении на строке начала сигнала $\Delta x_r = x_s - x_r$ пропорционален точной дальности цели в заданном интервале (отсюда использование индекса r ¹⁾). Дифференциальный сдвиг Δx_φ положения начала сигнала на двух соседних строках пропорционален азимуту цели φ (этим объясняется использование индекса φ).

Распределение комплексных амплитуд света в плоскости P_2 представляет собой одномерное фурье-преобразование выражения (17); таким образом,

$$U_s(x_2, y_2) = \sum_{n=1}^N S(u, y_2 - nd_2) \exp(i2\pi u x_s) \exp(i2\pi u n \Delta x_\varphi). \quad (18)$$

Распределение комплексных амплитуд за плоскостью P_2 равно произведению выражения (18) на амплитудное пропускание многоканального согласованного фильтра, описываемое выражением (16):

$$\begin{aligned} U'_2(x_2, y_2) &= U_s U_2 = \\ &= \sum_{n=1}^N S(u, y_2 - nd_2) S^*(u, y_2 - nd_2) \exp(-i2\pi u x_2) \times \\ &\quad \times \exp(i2\pi u \Delta x_r) \exp(i2\pi u n \Delta x_\varphi). \end{aligned} \quad (19)$$

Сферическая линза L_2 формирует в плоскости P_3 двумерный фурье-образ распределения U'_2 , и мы получаем следующее выражение для сигнала на выходе:

$$U_3(x_3, y_3) = [s(x) \star s(x)] * \delta(x_3 - \alpha \lambda f_2 - \Delta x_r, y_3 - \Delta x_\varphi). \quad (20)$$

Из выражения (20) видно, что распределение света в выходной плоскости P_3 отображает автокорреляцию $s \star s$ сложного кодированного сигнала (при этом используются преимущества, которые дает сложный сигнал с точки зрения выигрыша в отношении сигнал/шум и отношения сигнал/помеха). Горизонтальное положение пика автокорреляции (относительно опорного центра плоскости корреляции $x_3 = \alpha \lambda f_2$) пропорционально точной дальности до цели Δx_r (т. е. разности между начальным положением входного сигнала x_s и начальным положением сложного опорного сигнала x_r , которая определяет эталон с нулевым стробом дальности). Вертикальное положение корреляционного пика пропорционально дифференци-

альному сдвигу Δx_φ входного сигнала от строки к строке и, следовательно, вертикальному наклону фазы во входных сигналах, т. е. пропорционально азимуту цели φ . В случае многих целей положение корреляционного пика для каждой из них будет определять положение цели в координатах дальность/азимут. Этот коррелятор непосредственно приспособлен для обработки данных импульсно-доплеровского радиолокатора. В этом случае в плоскости P_1 на каждой строке последовательно записываются отраженные от цели импульсы, а на выходе отображаются кривая зависимости дальности от доплеровского сдвига частоты или функция неопределенности используемого сложного радиолокационного сигнала.

10.5.6. Коррелятор сложных кодированных сигналов [8]

Во многих современных системах связи для передачи информации используются длительные псевдослучайные кодовые импульсные последовательности. Длительность используемых кодовых последовательностей может превышать несколько тысяч бит и, следовательно, превосходит линейное разрешение входных пространственно-временных модуляторов света. В этом случае кодовая последовательность записывается на многих строках ПВМС, и задача обработки состоит в обнаружении присутствия интересующего нас кода во входной плоскости и в определении положения его начала. Рассмотрим теперь оптический коррелятор, который используется в таких случаях. Основная схема коррелятора аналогична изображенной на рис. 1. Однако формат входных данных и формат, выбираемый для синтеза согласованного фильтра, существенно отличаются от других случаев.

Чтобы лучше изложить принцип формирования формата входных данных, рассмотрим задачу обнаружения 63-разрядной псевдослучайной бинарной кодовой последовательности вида 10111001100001010101000111110101001011010000111011010010101000.

Для такого сравнительно простого 63-разрядного кода мы хотим использовать пространственный модулятор света, состоящий из 9×7 элементов, на котором принимаемый сигнал записывался бы в виде раstra. Если бы запись кода принимаемого сигнала началась в момент его действительного начала, то входной растр с записью кода имел бы вид, показанный на рис. 6, а. Простой голографический согласованный фильтр, изготовленный на такую входную картину, успешно решал бы задачу обнаружения момента появления этого кода на входе. Однако если принимаемый сигнал начинался бы, например, с 42 разряда входной последовательности, то на модуляторе было бы сформировано изображение кода, показанное на рис. 6, б в виде отдельной части внутри прямоугольной рамки. Очевидно, что согласованный пространственный фильтр, изготовленный на входное изображение, имеющее структуру,

¹⁾ От английского слова «range» — дальность, — Прим. перев.

приведенную на рис. 6, а, оказался бы неэффективным при распознавании данного кода.



Рис. 6. Коррелятор сложных кодированных сигналов для 63-разрядного кода [8]. а — входной формат для случая, когда прием кода начинается с 1-го разряда; б — эталонная маска для синтеза согласованного пространственного фильтра (1 — положение корреляции для кода, начинающегося с 52-го разряда; 2 — то же для кода, начинающегося с 1-го разряда; 3 — то же для кода с 42-го разряда); в и г — картины на выходе в плоскости корреляции для случая начала приема кода с 42-го и 52-го разрядов соответственно.

При использовании обычного согласованного фильтра для распознавания M -разрядного кода, запись которого может начинаться с любого разряда, потребовалась бы эталонная маска размером $M \times M$ бит. В рассматриваемой схеме корреляции мы используем

маску, показанную на рис. 6, б. Эта маска формируется при выборе любого разряда кода в качестве начального и при последующей записи $2m$ разрядов кода на первой строке маски (в маске на рис. 6, б мы начали запись с 33-го разряда). Если, как рассматривается в нашем случае, вход представляет собой матрицу $m \times n = 9 \times 7$ элементов, то на второй строке маски следует записать также $2m$ разрядов кода, но начиная с 42-го разряда ($42 = 33 + m$), и циклически повторять код до тех пор, когда число разрядов начнет превышать число 63. Затем аналогичным образом продолжается запись $2n$ строк, до тех пор пока не будет сформировано изображение матрицы $2m \times 2n$ элементов, которое показано на рис. 6, б. После этого первая строка и первый столбец матрицы вычеркивают.

Сравнивая рис. 6, а и б с используемым кодом, мы видим, что на рис. 6, б записано каждое из возможных входных изображений матрицы $m \times n = 9 \times 7$ бит (соответствующее выбору любого разряда в качестве начала записи принимаемого кода). Для иллюстрации на рис. 6, б заключены в рамки соответствующие блоки 9×7 бит, начинающиеся с 1-го, 42-го и 52-го разрядов. Преимущество такого согласованного фильтра состоит в том, что в данном случае требуется эталонная маска объемом только $(2m-1) \times (2n-1)$ бит. Для осуществления корреляционного анализа принятого сигнала для этой эталонной маски изготавливают согласованный фильтр и помещают его в плоскость P_2 коррелятора (см. схему на рис. 1), а в плоскости P_1 размещают входное изображение принятого кода в виде матрицы $m \times n$ элементов. При этом в выходной плоскости P_3 будет наблюдаться яркое корреляционное пятно. Наличие яркого пятна свидетельствует о присутствии интересующего нас кода на входе коррелятора, а его положение в выходной плоскости однозначно определяет номер разряда, с которого началась запись кода на входе. На рис. 6, в и г приведены типичные изображения выходной плоскости коррелятора при подаче на вход 63-разрядной кодовой последовательности, начинающейся соответственно с 42-го и 52-го разрядов.

10.5.7. Коррелятор с плоскостью изображения

До изобретения голографического согласованного фильтра самой распространенной системой для оптического распознавания образов был коррелятор с плоскостью изображения, схема которого приведена на рис. 7, а. В этом корреляторе обе функции, взаимную корреляцию которых требуется определить, задаются в пространственной области и в виде транспарантов помещаются в плоскостях P_{1a} и P_{1b} . Линзы L_1 и L_2 отображают плоскость P_{1a} на плоскость P_{1b} . Распределение комплексных амплитуд света непосредственно за плоскостью P_{1b} дается выражением

$$U_1(x_1) = g(x_1)h(x_1), \quad (21)$$

где для простоты использованы одномерные функции. Линза L_3 формирует в плоскости P_3 фурье-образ распределения $U_1(x_1)$ в виде интеграла

$$U_3(x_3) = \int g(x_1) h(x_1) \exp(-i2\pi x_1 x_3) dx_1. \quad (22)$$

Если теперь входную функцию $g(x_1)$ сместить вдоль оси x_1 из точки x_a в точку x_b и вычислять сигнал в точке $x_3 = u = 0$ плоскости P_3 ,

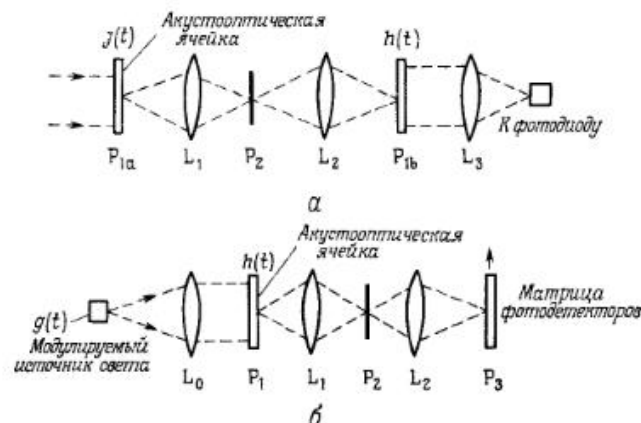


Рис. 7. Схемы акустооптических корреляторов. а — коррелятор с пространственным интегрированием; б — коррелятор с временным интегрированием.

то мы получим функцию

$$U_3(x_3) = \int_{x_a}^{x_b} g(x_1 + x') h(x_1) dx_1, \quad (23)$$

которая представляет собой интересующую нас взаимную корреляцию функций g и h .

Имеется очень много проблем практического характера, которые существенно усложняют использование рассмотренного метода оптической корреляции. Главная из них заключается в том, что для получения на выходе интересующей нас корреляции $g \star h$ нужно обеспечить очень точное физическое перемещение одной из коррелирующих функций относительно другой (например, входной функции в плоскости P_{1a}) и, кроме того, изменения во времени выходного сигнала в точке $u=0$ должны регистрироваться синхронно с перемещением транспаранта в плоскости P_{1a} . Следовательно, область применений коррелятора ограничена вычислением корреляции одномерных сигналов. В принципе возможно обеспечить перемещение входного транспаранта в плоскости P_{1a} как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях и обеспечить

таким образом получение изменения во времени выходного сигнала в точке $u=0$ плоскости P_3 , которое эквивалентно двумерной корреляции. Разумеется, что для создания такой системы потребуются очень сложное механическое устройство, но разработать такую систему можно.

В связи с тем, что оптические сигналы, отображающие коррелирующие функции в плоскостях P_{1a} и P_{1b} , не могут быть отрицательными, знакопеременные коррелирующие функции необходимо записывать с использованием некоторого постоянного уровня смещения. Этот уровень смещения удаляется затем с помощью режекторного фильтра постоянной составляющей, устанавливаемого в частотной плоскости P_2 коррелятора. Хотя описываемый коррелятор долгое время использовался с применением записи входных данных на фотопленке в плоскости P_{1a} и синхронизируемой лентопротяжки в плоскости P_{1b} , однако необходимость в механическом перемещении фотопленки ограничивает быстродействие и точность данного коррелятора. Поскольку этот коррелятор в основном является системой формирования изображения, требования к точности установки его элементов, а также требования к степени когерентности используемого излучения существенно ниже, чем в корреляторе с частотной плоскостью. Схема описанного коррелятора представляет большой интерес, поскольку в нем для управления с высокой точностью перемещением одного сигнала относительно другого можно применять акустооптические ячейки (что с успехом и применялось в плоскости P_{1a}). В следующем разделе мы обсудим этот и другие типы акустооптических корреляторов. Акустооптические корреляторы имеют такие преимущества, как быстродействие и широкая полоса пропускания, но их можно использовать лишь для обработки одномерных сигналов.

10.5.8. Акустооптические корреляторы [15]

Акустооптические корреляторы оказываются наиболее предпочтительными в системах распознавания образов, если речь идет о распознавании одномерных сигналов и если одним из важных параметров является ширина спектра сигнала. Мы рассмотрим два основных типа акустооптических корреляторов. Были исследованы, разработаны и описаны в литературе различные варианты каждого из этих типов (см., например, [19]).

На рис. 7, а приведена схема акустооптического коррелятора с пространственным интегрированием. Чтобы описать его действие, мы здесь используем несколько иной метод анализа, поскольку акустооптическая ячейка осуществляет модуляцию проходящей через нее волны света по фазе. Принятый входной сигнал $g(t)$ подается на вход акустооптического модулятора, установленного в плоскости P_{1a} . Промодулированная по фазе волна на выходе

модулятора описывается экспонентой вида

$$U_{1a}(x_{1a}) = \exp[i\omega t + Kg(x_{1a} + v_a t)], \quad (24)$$

где K — постоянная, а v_a — скорость распространения акустической волны в материале модулятора в плоскости P_{1a} . При пренебрежением фазовой модуляции выражение (24) можно переписать в виде

$$U_{1a}(x_{1a}) = [1 + iKg(x_{1a} + v_a t)] \exp(i\omega t). \quad (25)$$

Формируемый в плоскости P_2 фурье-образ распределения U_{1a} запишется в виде

$$U_2(x_2) = [\delta(0) + iKG(u) \exp(i2\pi u v_a t)] \exp(i\omega t). \quad (26)$$

В этом выражении член, содержащий нулевые пространственные частоты, регистрируется в точке $x_2 = 0$ плоскости P_2 , и отфильтрованное изображение отображается на плоскость P_{1b} , где находится эталонный сигнал $h(t)$, записанный в виде транспаранта с амплитудным пропусканием $1 + h(x_{1b})$. Распределение комплексных амплитуд света непосредственно за плоскостью P_{1b} равно

$$U_{1b}(x_{1b}) = [1 + h(x_{1b})] iKG(x_{1a} + v_a t) \exp(i\omega t). \quad (27)$$

Линза L_3 собирает весь свет нулевого порядка, прошедший через транспарант с эталонным сигналом, и фокусирует его на установленный в плоскости P_3 фотодетектор; фотодетектор формирует выходной электрический сигнал, амплитуда которого зависит от времени интегрирования T по эффективной апертуре модулятора и равна члену нулевого порядка в фурье-преобразовании выражения (27). Таким образом,

$$U_3(t)|_{v_3=0} = K^2 \int_0^{v_a T} g(x_{1a} + v_a t) h(x_{1b}) dx. \quad (28)$$

Нетрудно видеть, что это выражение равно квадрату функции взаимной корреляции сигналов g и h .

Сообщалось о различных модификациях описанной схемы коррелятора, в которых используется много эталонных масок, комбинации цилиндрических и сферических линз, единственная акустическая ячейка с двумя преобразователями, а также об акустооптических корреляторах с зеркальной оптикой и акустооптических корреляторах для импульсных сигналов с линейной частотной модуляцией, способных сжиматься во времени. Эталонный сигнал можно сделать не фиксированным, а изменяющимся, если использовать в плоскости P_{1b} вторую акустооптическую ячейку с обращенным во времени эталонным сигналом, вводимым в ее нижнюю часть.

Второй тип акустооптического коррелятора, схема которого приведена на рис. 7, б, по существу представляет собой модифи-

цированный некогерентный коррелятор (см. разд. 10.5.14). В этой схеме входной сигнал $g(t)$ складывается в электрической цепи с уровнем смещения B_1 , а затем используется для модуляции интенсивности I источника света по закону

$$I(t) = B_1 + g(t). \quad (29)$$

Опорный сигнал $h(t)$ также складывается электрически с уровнем смещения B_2 и используется для модуляции по амплитуде несущей частоты сигнала, поступающего на вход акустооптической ячейки, установленной в плоскости P_1 . Плоскость P_1 с помощью линз L_1 и L_2 отображается на плоскость P_3 , а установленная в плоскости P_2 щель Шлирена пропускает на выход только пучок первого порядка, благодаря чему интенсивность, регистрируемая линейкой фотодетекторов, установленной в плоскости P_3 , дается выражением

$$I_3(x_3, t) = [B_1 + g(t)][B_2 + h(x_1 + v_a t)]. \quad (30)$$

Интегрирование по времени сигнала на выходе решетки фотодетекторов приводит к тому, что интенсивность на выходе n -го фотодетектора после удаления постоянной составляющей записывается в виде интеграла

$$I_3(x_3)_n = \int_0^T g(t) h(x + v_a t) dt, \quad (31)$$

который представляет собой интересующую нас взаимную корреляцию функций g и h .

Как отмечалось выше, акустооптические корреляторы целесообразно использовать в тех случаях, когда необходимо осуществлять корреляцию весьма широкополосных сигналов (с полосой порядка 200—400 МГц). Основным недостатком этих корреляторов является ограниченная величина произведения времени на ширину полосы пропускания (порядка 1000—2000), а также то, что они могут работать лишь с одномерными сигналами.

10.5.9. Коррелятор скрещенных сигналов [21]

Описанный в предыдущем разделе коррелятор кодированных сигналов можно легко преобразовать в оптический процессор для вычисления функции неопределенности $\chi(v, \tau)$ сложных сигналов. Для вычисления функции неопределенности сигнала, описываемого функцией $g(t)$, необходимо на вход коррелятора подать два скрещенных и наложенных друг на друга изображения функции $g(t)$, одно из которых повернуто относительно оптической оси системы на угол $+45^\circ$, а второе на угол -45° . В этом случае амплитудное пропускание результирующего транспаранта запишется в виде

$$t_1(x_1, y_1) = g\left(\frac{t+\tau}{\sqrt{2}}\right) g\left(\frac{t-\tau}{\sqrt{2}}\right). \quad (32)$$

Его одномерный (в горизонтальном направлении) фурье-образ по t можно сформировать с помощью системы, состоящей из цилиндрической и сферической линз. При этом распределение интенсивности в выходной плоскости дается выражением

$$I(v, \tau) = 2 |\chi(\sqrt{2}v, \sqrt{2}\tau)|^2. \quad (33)$$

Мы видим, что интенсивность пропорциональна квадрату модуля функции неспределенности сложного сигнала $g(t)$.

Эту систему можно заставить работать в реальном времени, если использовать в качестве устройства ввода сигналов две скрещенные акустооптические линии. Входные сигналы на высокой частоте можно подвести к акустооптическим линиям, а затем осуществить их двумерное фурье-преобразование и после этого отфильтровать соответствующие скрещенные члены на выходе. При этом одномерный фурье-образ такой отфильтрованной картины приводит к формированию функции неопределенности входного сигнала в координатах дальности τ и доплеровской частоты v .

10.5.10. Коррелятор с преобразованием Меллина [11, 13]

Обычный оптический процессор является пространственно-инвариантной системой, и, следовательно, характеристики всех оптических систем распознавания образов, основанных на использовании преобразования Фурье, станут ухудшаться, если масштаб входной и эталонной функций будет различным. В цифровых процессорах эта проблема, имеющая практическое значение, решается применением изоцированных алгоритмов средств программирования; поэтому такие процессоры оказались значительно более пригодными, чем конкурирующие с ними оптические корреляторы, которые требуют точного согласования масштабов входной и эталонной функций во избежание уменьшения интенсивности корреляционного пика I_p или отношения сигнал/шум на выходе. Новый подход к решению этой проблемы оптическими средствами состоит в использовании пространственно-неинвариантного коррелятора, в котором осуществляется преобразование координат входных данных. Полученные в результате координатного преобразования данные затем подаются на вход в обычный пространственно-инвариантный коррелятор.

В конкретной системе, используемой для получения инвариантного к изменению масштаба коррелятора, координаты входной функции $g(x, y)$ сначала изменяются по логарифмическому закону, а полученная функция $g(e^x, e^y)$ затем подается на вход обычного коррелятора. Фурье-образ функции $g(e^x, e^y)$ представляет собой преобразование Меллина функции $g(x, y)$. Требуемое для этого логарифмическое преобразование координат можно осуществить с помощью аналоговых логарифмических модулей, применяемых

в системе отклонения входного устройства (пространственно-временного модулятора света или замкнутой телевизионной системы), или с помощью голограмм, синтезированных на ЭВМ. На рис. 8 приведена функциональная схема системы, используемой в рассматриваемом или подобном ему (см. разд. 10.5.11) пространственно-неинвариантном корреляторе. Система состоит из обычного

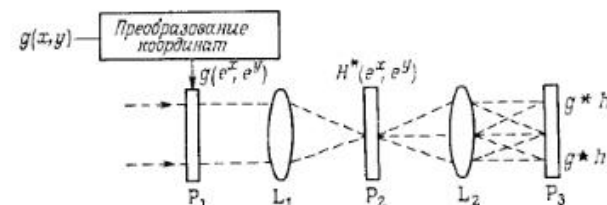


Рис. 8. Схема пространственно-неинвариантного коррелятора.

коррелятора, такого, как на рис. 1, но на входе этого коррелятора помещается устройство предварительного преобразования входных координат. Для получения инвариантного к изменению масштаба преобразования Меллина необходимо реализовать преобразование координат вида $(x, y) \rightarrow (\xi, \eta) = (\ln x, \ln y)$. Чтобы математически описать работу данного коррелятора, применим подход, изложенный в разд. 10.5.2, причем для простоты будем рассматривать одномерные функции. Будем учитывать лишь корреляционный член, который представляет интерес. Запишем во входной плоскости P_1 эталонную функцию $h(e^x)$. Распределение комплексных амплитуд в плоскости P_2 представляет собой фурье-образ функции $h(e^x)$ или преобразование Меллина $M_h(u)$ этой функции. После регистрации в плоскости P_2 картины интерференции полученного распределения и наклонной опорной волны интересующий нас член результирующего амплитудного пропускания запишется в виде

$$t_2(x_2, y_2) = M_h^*(u) \exp(-i2\pi x_2). \quad (34)$$

Установим теперь полученный фильтр в плоскости P_2 и подадим на вход функцию $g(x) = h(ax)$ [а именно измененную по масштабу копию функции $h(x)$ с масштабным коэффициентом a]. Тогда в плоскости P_1 мы запишем логарифмически преобразованную копию этой функции в виде $g(e^x)$. При этом распределение комплексных амплитуд света в плоскости P_2 будет равно $M_g(u)$. Преобразования Меллина M_g и M_h связаны между собой соотношением

$$\begin{aligned} M_g(u) &= a^{-i2\pi u} M_h(u) \exp(-i2\pi a x_2) = \\ &= M_h(u) \exp(-i2\pi u \ln a) \exp(-i2\pi a x_2), \end{aligned} \quad (35)$$

из которого следует, что $|M_g| = |M_h|$ или, что то же самое, преобразование Меллина инвариантно к изменению масштаба преобра-

зуемой функции. Таким образом, непосредственно за плоскостью P_2 распределение комплексных амплитуд запишется теперь в виде $M_g(u) M_h^*(u) = M_h(u) M_h^*(u) \exp(-i2\pi u \ln a) \exp(-i2\pi a x_2)$. (36)

Линза L_2 формирует в плоскости P_3 фурье-образ этого распределения, и на выходе мы имеем следующее распределение комплексных амплитуд:

$$U(x_3) = h \star h \star \delta(x_3 + \alpha \lambda f_2 + \ln a). \quad (37)$$

Из этого выражения следует, что распределение комплексных амплитуд в функции взаимной корреляции двух функций, отличающихся друг от друга масштабом, представляет собой их автокорреляционную функцию: таким образом, не должно быть потерь интенсивности I_p пика корреляции и отношение сигнал/шум не должно уменьшаться, т. е. коррелятор с преобразованием Меллина действительно оказывается инвариантным к изменению масштаба. Из выражения (37) также следует, что положение пика корреляции смещено относительно обычного положения $x_3 = -\alpha \lambda f_2$ на величину $\ln a$, и, следовательно, по положению корреляционного пика можно найти разницу в масштабах входной и эталонной функций. Этот анализ непосредственно обобщается на двумерный случай, в котором горизонтальное и вертикальное смещения корреляционного пика относительно его нормального положения оказывается пропорциональным разнице в масштабах входной и эталонной функций соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Особенно интересно применение рассматриваемого инвариантного к изменению масштаба коррелятора при обработке сигналов в доплеровских радиолокаторах. Поскольку доплеровский сдвиг по частоте эквивалентен изменению масштаба входного сигнала, а положение корреляционного пика на выходе пропорционально величине этого изменения масштаба и, следовательно, величине доплеровского сдвига между входным и эталонным сигналами, то становится очевидным новый подход к обработке доплеровских сигналов, основанный на использовании системы, реализующей преобразование Меллина. Чтобы проиллюстрировать реализацию этого подхода, а также возможности управления форматом входных данных, которое жизненно необходимо при решении задачи оптического распознавания образов, мы рассмотрим схему еще одного нового коррелятора, а именно многоканального одномерного коррелятора с одновременным преобразованием (рис. 9, а). В левой части входной плоскости P_1 на N строках записан один и тот же эталонный сигнал $h(e^x)$ с масштабом по оси x , измененным по логарифмическому закону, а в правой части — преобразованные таким же способом n реализаций принятого доплеровского сигнала $g_n(x) = h(nax)$, которые после координатного преобразования имеют вид $g_n(e^x) = h(e^{nax})$. Предположим, что физическая длина каждого

сигнала на входе равна b , а расстояние между центрами двух записанных растров равно $2b$. Тогда мы можем написать следующее

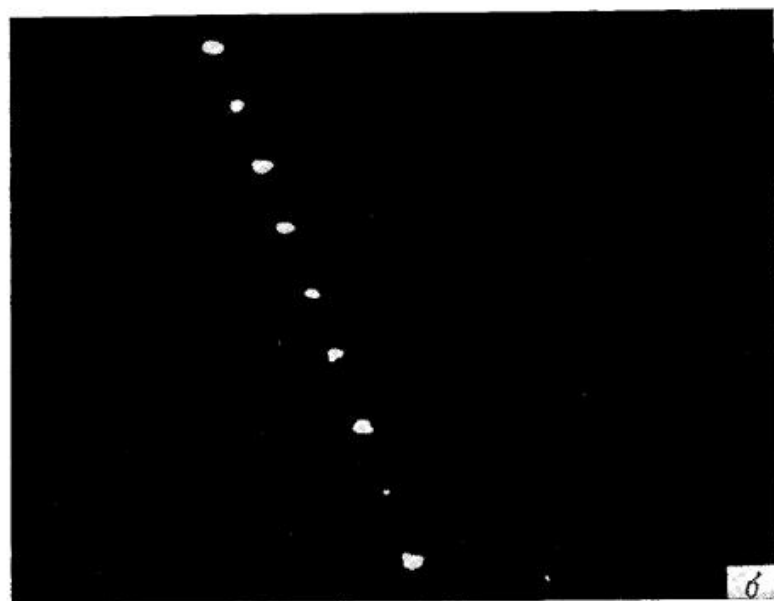
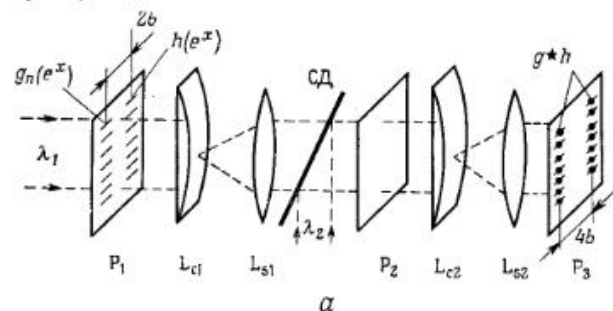


Рис. 9. Оптический процессор доплеровских сигналов, использующий преобразование Меллина. а — схема одномерного коррелятора с одновременным преобразованием; б — картина корреляции доплеровских сигналов на выходе [10].

выражение для амплитудного пропускания в плоскости P_1 :

$$t_1(x_1, y_1) = \sum_{n=1}^N [h(e^{x_1-b}, y_1 - nd_1) + h(e^{nax_1+b}, y_1 - nd_1)]. \quad (38)$$

Регистрируемое в плоскости P_2 распределение амплитуд формируется системой из цилиндрической L_{c1} и сферической L_{s1} линз

и представляет собой одномерное преобразование Фурье пропускания $t_1(x_1, y_1)$, отображаемое в горизонтальном направлении. Таким образом, амплитудное пропускание записанного в плоскости P_2 фильтра запишется в виде

$$t_2(x_2, y_2) = \sum_{n=1}^N M_h(u, y_2 - nd_2) M_h^*(u, y_2 - nd_2) \times \exp(-i2\pi u n \ln a) \exp(-i2\pi u 2b). \quad (39)$$

Распределение комплексных амплитуд в плоскости P_3 представляет собой одномерный фурье-образ выражения (39) и имеет вид

$$U_3(x_3, y_3) = \sum_{n=1}^N h \star h^* \delta(x_3 + 2b + n \ln a, y_3 - nd_3), \quad (40)$$

откуда следует, что распределение интенсивности света в выходной плоскости состоит из N ярких пятен, расположенных на N строках. Интенсивность в максимуме каждого пятна пропорциональна пику автокорреляционной функции эталонного сигнала (таким образом, отсутствуют какие-либо потери отношения сигнал/шум или интенсивности I_p), а смещение каждого пятна по строке пропорционально масштабному коэффициенту a (и, следовательно, величине доплеровского сдвига по частоте) между входным и эталонным сигналом на рассматриваемой строке. На рис. 9, б приведена фотография выходной плоскости корреляции для случая $N=9$ сигналов. В данном случае частота сигнала на верхней строке отличалась от частоты сигнала, записанного на нижней строке, на 100% и, следовательно, горизонтальные смещения корреляционных пиков на рис. 9, б вычерчивают часть логарифмической кривой вида $\lg a$ при изменении величины a от 0 до 1.

10.5.11. Коррелятор, инвариантный к вращению [12]

Для достижения оптической корреляции, инвариантной к вращению входного сигнала, можно использовать второй тип пространственно-неинвариантного коррелятора, построенного по той же основной схеме, что и коррелятор на рис. 8, причем в нем реализуется тот же принцип, а именно преобразование координат с последующим использованием обычного пространственно-инвариантного коррелятора. В данном случае операция координатного преобразования состоит в преобразовании прямоугольных координат в полярные, т. е. $(x, y) \rightarrow (\xi, \eta) = (\rho, \theta)$. Следовательно, преобразованная функция записывается в виде $g(\rho, \theta)$, а эталонная функция $g'(\rho, \theta)$ представляет собой копию входной, повернутой относительно нее на некоторый угол. Одномерный (по θ) фурье-образ функции g' дается

выражением

$$G'(\rho, \omega_\theta) = G_1(\rho, \omega_\theta) \exp(-i2\pi \omega_\theta \theta_0) + G_2(\rho, \omega_\theta) \exp[i2\pi \omega_\theta (2\pi - \theta_0)], \quad (41)$$

где θ_0 — угол, на который повернута входная функция, g_2 — часть неповернутой входной функции, стягиваемой углом в пределах от 0 до $2\pi - \theta_0$, g_1 — часть этой функции, расположенная между углами $\theta = 2\pi - \theta_0$ и 2π , а G_1 и G_2 — одномерные фурье-образы функций g_1 и g_2 .

Распределение комплексных амплитуд света за плоскостью P_2 , после того как во входной плоскости P_1 была установлена функция g' , а в частотной плоскости был помещен голограммный согласованный фильтр G^* для функции g , запишется в виде

$$G'G^* = G_1G_1^* \exp(-i2\pi \omega_\theta \theta_0) + G_2G_2^* \exp[i2\pi \omega_\theta (2\pi - \theta_0)]. \quad (42)$$

Преобразование Фурье выражения (42), выполняемое линзой L_2 , дает распределение комплексных амплитуд в выходной плоскости:

$$U(x_3, \theta') = g_1 \star g_1^* \delta(x_3, \theta' + \theta_0) + g_2 \star g_2^* \delta(x_3, \theta' - 2\pi + \theta_0). \quad (43)$$

Отсюда мы видим, что в выходной плоскости P_3 коррелятора сигнал образован двумя корреляционными пиками, отстоящими друг от друга на 2π , причем сумма интенсивностей обоих пиков равна пику автокорреляции функции g , а положение этого корреляционного пика пропорционально углу поворота θ_0 между входной и эталонной функциями. Таким образом, независимо от угла θ_0 данный коррелятор имеет на выходе такие же значения отношения сигнал/шум и пиковой интенсивности I_p , что и при автокорреляции, и, следовательно, оказывается инвариантным к вращению входного сигнала. При этом по положению корреляционного пика в выходной плоскости можно определить угол поворота θ_0 входного сигнала относительно эталонного.

10.5.12. Транспонированный коррелятор [25]

Так называемый транспонированный коррелятор представляет собой первый коррелятор с многоканальным согласованным фильтром, который мы рассмотрим. Этот коррелятор имеет ту же оптическую схему, что и на рис. 1. Однако теперь во входную плоскость P_1 мы помещаем матрицу из многих пространственных эталонных функций $\{h_i\}$, а в частотную плоскость P_2 — согласованный пространственный фильтр G^* для входной функции (т. е. в данном корреляторе входная и эталонная функции меняются местами). При этом амплитудное пропускание в плоскости P_1 запишется в виде

$$t_1(x_1, y_1) = \sum_{m,n} h_{mn}(x_1 - mW_{xp}, y_1 - nW_{yp}), \quad (44)$$

где $m \times n$ — матрица, образованная эталонными функциями h_{mn} , которые пространственно разделены друг от друга промежутками W_{xp} и W_{yp} вдоль осей x и y соответственно. Распределение комплексных амплитуд света в плоскости P_2 дается выражением

$$U_2(u, v) = \sum_{m, n} H_{mn}(u, v) \exp(-i2\pi m W_{xp} - i2\pi n W_{yp}), \quad (45)$$

а аналогичное распределение за плоскостью P_2 записывается в виде произведения $U_2(u, v)G^*(u, v)$. Формируемый в плоскости P_3 фурье-образ этого произведения локализуется вокруг точки $(0, -\alpha\lambda f_2)$ и описывается выражением

$$H_{mn} \star g \star \delta(x_3 + mW_{xp}, y_3 + nW_{yp}), \quad (46)$$

в котором предполагается, что оптическая система имеет единичное увеличение ($f_1 = f_2$).

Положение корреляционного пика в выходной плоскости указывает на то, какая именно из $m \times n$ эталонных функций h_{mn} присутствует в данный момент во входной функции g . Главное преимущество рассматриваемого коррелятора состоит в том, что общие элементы $m \times n$ эталонных функций оказываются подавленными, благодаря чему уменьшается интенсивность нежелательных взаимно-корреляционных вкладов. Очевидными недостатками этой схемы являются увеличенные размеры входной плоскости и связанные с ними более высокие требования к качеству линз, необходимость записи эталонных функций в виде мультиплицированных функций пространственных (а не частотных) переменных, а также необходимость изготавливать всякий раз новый согласованный пространственный фильтр G^* для каждой новой входной функции g .

10.5.13. Корреляторы со сложными согласованными пространственными фильтрами [2]

В § 5.2 было рассмотрено широкое многообразие схем записи мультиплексных голограмм, и поэтому здесь мы не будем стремиться сделать полный обзор таких схем. Наоборот, мы только отметим, что лишь некоторые из этих схем пригодны для записи сложных согласованных пространственных фильтров, используемых в оптических системах распознавания образов и знаков. Если, как и прежде, согласованный пространственный фильтр изготавливается для матрицы из M функций, т. е. его импульсный отклик имеет вид

$$h = \sum_{i=1}^M h_i \star \delta(x_1 - x_i, y_1 - y_i), \quad (47)$$

а во входной плоскости помещена функция g , то световая картина в выходной корреляционной плоскости, локализуемая в точке $(x_3, y_3) = (-\alpha\lambda f_2, 0)$, состоит из M корреляционных распределений

вида

$$U_3(x_3, y_3) = \sum_{i=1}^M g \star h_i \star \delta(x_3 - x_i, y_3 - y_i), \quad (48)$$

где, как и во всех других случаях, мы полагаем $f_2 = f_1$.

Если размер результирующего импульсного отклика h равен $W_{hx}W_{hy}$, а размер каждого из образующих его элементарных импульсных откликов h_i составляет $W_{hxi}W_{hyi}$, то образующие h строки и столбцы из h_i должны быть разделены друг от друга промежутками по крайней мере не менее чем $W_{gx} + W_{hxi}$ и $W_{gy} + W_{hyi}$ соответственно. Считая $W_{hx} \gg W_{gx}$ и $W_{hy} \gg W_{gy}$, получаем, что для оптимальной упаковки матрицы выходных откликов сложного фильтра должно выполняться условие $\alpha\lambda f_2 \geq 3W_{gx}/2$ и $W_{hy} = 4W_{hx}$. Отсюда вытекают требования к материалу, используемому в плоскости P_2 , а именно к его разрешающей способности $1/(2\sqrt{2}W_{hx})$ и полосе пропускания $B = 2\sqrt{2}W_{hx}/\lambda f_1$. Таким образом, при $W_g \gg W_{hi}$ наибольшее число согласованных пространственных фильтров, которое можно записать в частотной плоскости, будет равно $(B\lambda f_1)^2/2W_{gx}W_{gy}$, а при $W_{hi} = W_g$ мы имеем $(B\lambda f_1)^2/2W_{hxi}W_{hyi}$.

Сложный согласованный пространственный фильтр можно изготовить либо за одну экспозицию (когерентный метод), либо за M отдельных экспозиций (некогерентный метод). Однако с увеличением числа наложенных экспозиций наблюдается уменьшение дифракционной эффективности отдельных СПФ, а следовательно, уменьшается интенсивность корреляционного пика I_p и ухудшается отношение сигнал/шум. Тем не менее следует заметить, что при заданной разрешающей способности материала в плоскости P_2 использование метода многократных экспозиций позволяет записать в три раза больше фильтров, чем при однократной экспозиции.

При формировании СПФ на матрицу из M эталонных функций на входе можно получить усредненный фильтр [26], импульсный отклик которого (в одномерном случае) дается следующим выражением:

$$h(x_1) = \sum_{i=1}^M [h_i(x_1 - i\Delta_1) + \delta(x_1 - i\Delta_1 - \Delta_2)]. \quad (49)$$

При записи фильтра регистрируется квадрат величины $h(x_1)$, и, следовательно, импульсный отклик фильтра будет содержать член, который равен интересующему нас среднему значению множества сигналов $\{h_i\}$. Создаваемая этим членом голографическая интерференционная картина и будет представлять собой «усредненный» фильтр. В этом случае требуется такая же разрешающая способность материала, как и при записи единственного изображения h_i . Основной проблемой при записи усредненного фильтра является выделение интересующих нас членов в фурье-образе из всех остальных.

Кроме того, когерентная запись данного фильтра требует использования отдельных импульсных откликов для каждого элемента матрицы.

Следует также иметь в виду, что при когерентной (за одну экспозицию) записи сложного согласованного фильтра появляются интермодуляционные члены, которые трудно устранить и которые являются основной причиной уменьшения (приблизительно в 3 раза) числа составляющих его элементарных согласованных фильтров по сравнению с некогерентной записью. Поэтому большинство исследователей предпочитают многоэкспозиционный (некогерентный) метод синтеза фильтров и синтезируют сложный согласованный фильтр либо изменением угла наклона опорного пучка, либо смещением между экспозициями положения каждой эталонной функции, чтобы реализовать кодирование каждой функции методом частотно-го мультиплексирования (уплотнения).

Один из последних предложенных подходов к синтезу сложного согласованного пространственного фильтра [16] состоит в формировании матрицы фурье-образов эталонных функций с использованием линзы и голограммы матрицы точечных источников и последующей фильтрации спектров входных функций с помощью полученной матрицы СПФ. Если для записи нескольких СПФ применяется один и тот же точечный опорный источник, то это приводит к получению усредненной фильтрации, однако в этом случае при перекрытии выходных плоскостей отдельных фильтров могут наблюдаться интерференционные полосы. Основные проблемы в этом подходе связаны с тем, что в частотной плоскости коррелятора использовано пространственное, а не частотное мультиплексирование, а это приводит к более жестким требованиям к линзам.

10.5.14. Некогерентные корреляторы [1]

Мы рассмотрели различные корреляторы, в которых для осуществления корреляции используется голографическая запись. Общим свойством всех этих систем является использование когерентного света и его способности интерферировать при записи комплексных (амплитудных и фазовых) распределений. Хотя настоящая книга посвящена голографии, нам представляется целесообразным по крайней мере кратко рассмотреть некогерентные оптические корреляторы хотя бы для полноты рассмотрения проблемы оптического распознавания.

В первом некогерентном корреляторе, который мы рассмотрим [1], набор из N пространственно разделенных эталонных функций, зависящих от пространственных координат, освещается монохроматическим светом и через рассеиватель регистрируется интенсивность их фурье-образов $|S_i|^2$, которые также пространственно разделены. Эта мультиплицированная эталонная картина затем отображается

в выходную плоскость, содержащую транспарант с записью неизвестной входной функции, которая выполняет роль апертурной функции системы. Картина в корреляционной плоскости состоит из N коррелирующих между собой изображений. Интенсивность в центре каждого из N изображений в плоскости корреляции дается следующим интегралом:

$$U(x_s, y_s) = \iint |S_i|^2 |S|^2 du dv, \quad (50)$$

который берется по всем пространственным частотам. Эти центральные корреляционные области являются темными для взаимно-корреляционных членов и яркими для автокорреляционных.

Схема второго некогерентного коррелятора, более привлекательного и заслуживающего упоминания, использует в качестве единственного источника светодиод, интенсивность излучения которого модулируется входным одномерным электрическим сигналом [18]. С помощью конденсорной линзы этот источник света отображается во входную апертуру линзы, позади которой установлен транспарант с записью набора из N эталонных одномерных сигналов. Линза формирует изображение транспаранта в выходной плоскости коррелятора. Входной сигнал коррелятора можно записать в виде

$$g(t) = B + Ks(t/a) + n(t), \quad (51)$$

где B — уровень смещения, s — сигнал, n — шум окружающего фона, а постоянные коэффициенты K и a определяют возможные изменения масштаба и частоты входного сигнала. Обозначим пропускание по интенсивности i -го опорного канала

$$\hat{f}_i(x) = B_i + K_i r_i(x/a_i). \quad (52)$$

Тогда прошедший сквозь эталонную маску свет будет равен $g(t) \hat{f}_i(x)$.

Между маской и линзой, формирующей изображение, помещается качающееся зеркало, которое заставляет изображение произведения $g(t) \hat{f}_i(x)$ сканировать в выходной плоскости со скоростью v . При этом результирующая интенсивность света, падающего на мишень видикона, установленного в выходной плоскости, записывается в виде

$$k_i(x, t) = g(t) \hat{f}_i(x - vt - \varphi), \quad (53)$$

где φ — начальная фаза зеркального сканирования. Видикон интегрирует эту интенсивность за время одного периода развертки T . Полученный интеграл содержит в себе взаимную корреляцию входного сигнала s и N эталонных функций r_i . В схеме можно осуществлять поиск входного сигнала по масштабу, изменяя скорость сканирования зеркала до тех пор, пока она не станет равной $v = a_i/a$. Используя специальные бинарные маски, можно разложить

входной сигнал по функциям Уолша и дискретным косинусам. Видикон на выходе также можно заменить линейкой или матрицей приборов с зарядовой связью и осуществить некогерентное перемножение матриц.

10.5.15. Оптимизация параметров согласованного пространственного фильтра [5]

Рассмотрим теперь проблему синтеза согласованных пространственных фильтров, которые необходимы для корреляторов с частотной плоскостью. В частности, мы обсудим вопросы выбора следующих трех параметров СПФ: экспозиции смещения E_B , отношения интенсивностей опорного и сигнального пучков K и полосы пространственных частот f^* , в пределах которой величина K равна выбранному значению. В качестве критериев оценки оптимальной корреляции мы используем интенсивность I_p пика корреляции и отношение сигнал/шум на выходе коррелятора. Из выражения (5) следует, что экспозиция при записи СПФ имеет вид

$$E(x_2, y_2) = E_B [1 + 1/K + (2/\sqrt{K}) \cos \psi], \quad (5)$$

где $E_B = r_0^2 T$, T — время экспозиции, $E_0 = (r_0^2 + |H|^2) T$ — средняя экспозиция, $K = r_0^2 / |H|^2$ — отношение интенсивностей опорного и объектного пучков, $\psi = 2\pi \alpha x_2 + \arg(H)$. Следовательно, амплитудное пропускание полученного СПФ зависит от E_B , α и вида кривой $t-E$ для фотопленки. Таким образом,

$$t = t_0 + (m/2) \cos \psi + A = t_0 + 2d \cos \psi + A; \quad (54)$$

здесь t_0 — среднее пропускание, A — члены более высоких порядков, m — наибольший размах переменной составляющей амплитудного пропускания (от максимального значения до минимального) или наибольшая модуляция косинусональной волны, а $d = \sqrt{K}$ — амплитудная дифракционная эффективность. Тогда интенсивность в пике автокорреляции функции h принимает вид

$$I_p = \left| \iint H(x_1, y_1) d(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \right|^2.$$

Проанализируем полученные результаты. Передаточная функция фильтра $H(u, v)$ является функцией пространственных частот и, следовательно, так же как и K , m , d , зависит от вида кривой $t-E$ фотопленки и выбранных значений E_B и K . Поскольку E_B и K изменяются с пространственной частотой, должна быть обеспечена полоса пространственных частот f^* , в пределах которой измеряется величина K . Такие данные, к сожалению, редко включаются в публикации по оптическому распознаванию образов. После того как стала известна зависимость $t(E)$ и выбрана величина E_B , можно найти и зависимость $d(K)$. Поскольку K , так же как

и d , зависит от пространственной частоты, ее можно определить, если известен пространственно-частотный спектр $G(u, v)$ входной функции $g(x_1, y_1)$.

Для большинства материалов, используемых для изготовления СПФ, имеются кривые зависимости контраста интерференционных полос $V = 2\sqrt{K}/(K+1)$ от дифракционной эффективности η , по которым можно определить зависимости амплитудной дифракционной эффективности $d = \sqrt{\eta}$ от K при разных средних экспозициях, а также построить кривую зависимости $\sqrt{\eta}$ от экспозиции E . Обычно используется линейный участок этой кривой. Линейная запись требует выполнения условия $E < 2E_B$ (где величина E_B соответствует значению $t=0,5$), что эквивалентно условию $K \geq 5,8$. Это хорошо согласуется с тем, что для обеспечения линейной записи данных мы должны использовать большие значения K ($K \gg 10$). При записи СПФ имеет место насыщение, если $K \leq 0,17$, и наблюдается ограничение при $0,17 \leq K \leq 5,8$. Поэтому выбирают $K=1$, и вопрос состоит в том, в какой полосе пространственных частот f^* установить $K=1$. Как видно из этих кратких замечаний, синтез СПФ отличается от обычной голографической записи, в которой нас интересует высокое качество восстановленного изображения, а не высокое качество корреляции на выходе.

Приведем теперь результаты некоторых экспериментов, чтобы лучше показать влияние рассматриваемых параметров СПФ на корреляционные параметры. При линейной записи средняя экспозиция соответствует амплитудному пропусканию $t_0 \approx 70\%$ и значения K оказываются оптимальными. В результате выполнения большой серии экспериментов были получены графики зависимости интенсивности пика корреляции I_p и отношения сигнал/шум на выходе от величины E_B для различных входных изображений, использованных пленок и линз. Во всех случаях значения E_B , соответствующие максимумам I_p , составляли всего 10% от всей величины E_B . Наблюдалось уменьшение I_p в 100 раз при уменьшении E_B всего на 50%. Было найдено, что наклон кривой зависимости I_p от отношения сигнал/шум равен 2:1. Это указывает на то, что шумы увеличиваются при отклонении величины E_B от своего оптимального значения и что правильный выбор величины E_B очень важен для обеспечения хорошей корреляции. Так как небольшие изменения амплитудного пропускания t_0 приводят к большим изменениям величины E_B , то более чувствительным и более практичным параметром для управления характеристиками СПФ является величина E_B , а не t_0 .

При решении задач распознавания обычно используются изображения разного характера (аэрофотоснимки сельской местности и городов, изображения структур). Пространственно-частотные спектры этих изображений будут различными. Так, в спектре

изображений городских кварталов будут преобладать более высокочастотные составляющие спектра, а в спектре изображений сельских ландшафтов — низкочастотные составляющие. Следовательно, мы можем предполагать, что оптимальное значение полосы f^* для

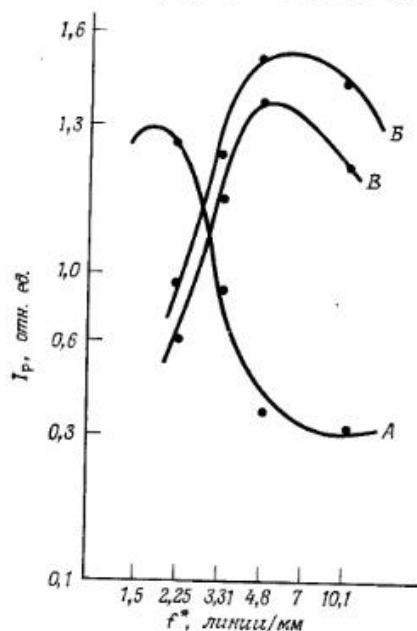


Рис. 10. Кривые зависимости интенсивности автокорреляционного пика I_p от полосы пространственных частот f^* , в пределах которой отношение интенсивностей опорного и сигнального пучков $K=1$ [5].

изображений городов должно лежать в более высокочастотной области, чем для изображений сельской местности. На рис. 10 приведены типичные зависимости интенсивности пика корреляции I_p от величины f^* для изображений сельской местности (A), городов (B) и структур (B), которые хорошо иллюстрируют ожидаемое поведение. Поскольку с увеличением значения пространственных частот их содержание в изображении обычно уменьшается так же, как и величина K , то СПФ, полученные при низких значениях K , соответствуют такому процессу формирования изображения, в котором подчеркнута высокая пространственная частота. Обычно низкие значения K улучшают дискриминационные (различительные) свойства СПФ, однако при этом уменьшается интенсивность I_p . Кривые на рис. 10 подтверждают сказанное и обеспечивают критерий того, насколько малыми

следует выбирать значения K и каковы будут ожидаемые потери в отношении сигнал/шум и I_p при выбранном значении K .

Получаемые значения интенсивности пика корреляции I_p пропорциональны квадрату площади изображения (при приблизительно одинаково плотных изображениях), а значения отношения сигнал/шум на выходе пропорциональны площади изображения. Данные, приведенные на рис. 10, а также другие эксперименты подтвердили эти предположения.

При использовании сложных СПФ площадь участка частотной плоскости, занимаемой каждым СПФ, должна быть ограниченной. Чтобы уяснить, какое это оказывает влияние, мы построили зависимости I_p и отношения сигнал/шум от размеров диафрагмы, помещенной в плоскости СПФ, для разных входных изображений и

разных значений f^* . В результате мы нашли, что интенсивность пика корреляции I_p и отношение сигнал/шум СПФ, записанных с более высокими значениями f^* , резко снижаются, как только уменьшается диаметр диафрагмы, в то время как для СПФ, записанных при более низких значениях f^* , это уменьшение I_p и отношения сигнал/шум проявлялось в значительно меньшей степени, пока диаметр диафрагмы не уменьшался до величины f^* , при которой был записан фильтр.

Исходя из этих и других случаев (см. разд. 10.5.16), мы пришли к выводу, что для уменьшения степени изменения I_p и отношения сигнал/шум предпочтительнее иметь более низкие значения f^* , а на практике предпочтительнее выбирать более низкие значения I_p и отношения сигнал/шум путем выбора более низких значений f^* по сравнению с теми, которые обеспечили бы максимальные значения интенсивности I_p и отношения сигнал/шум.

10.5.16. Источники уменьшения корреляции [6]

В данном разделе мы рассмотрим методы, которые позволяют преодолеть уменьшение корреляции, вызываемое различными причинами. Все приводимые ниже результаты были получены при работе с аэрофотоснимками. Как уже отмечалось выше, разница в масштабах входного и эталонного изображений, определяемая коэффициентом a , является очевидным источником потерь интенсивности пика корреляции I_p и отношения сигнал/шум. Было показано, что в случае двумерного изображения при изменении масштаба входной функции величина I_p уменьшается по закону $(1-a)^4$, причем это уменьшение имеет более резкий характер для изображений с более широким спектром пространственных частот. Этот факт был экспериментально проверен для случая коррелятора с небольшим входным отверстием и СПФ, изготовленного для большой площади эталонной функции (случай AF), а также для случая автокорреляции всего входного изображения (случай FF). В случае AF величина I_p была меньше (поскольку она пропорциональна квадрату площади входной апертуры), однако не было обнаружено никаких заметных потерь интенсивности, пока изменения масштаба входного изображения не превысили 1% по отношению к эталону. В случае FF потери в интенсивности корреляционного пика составили 10 дБ при том же самом 1%-ном изменении масштаба. В этих экспериментах был использован коррелятор с изменением масштаба (см. разд. 10.5.3).

В качестве источника потерь корреляции были также упомянуты эффекты рассогласования по углу между входной и эталонной функциями. Чтобы определить экспериментально величину этой ошибки корреляции, а также оценить влияние разных входных

апертур, разных значений полосы пропускания пространственных частот на входе и разных значений f^* , был изготовлен СПФ на большую площадь изображения земной поверхности, а затем осуществлен корреляционный анализ всего входного изображения (случай FF) и трех его участков (выделенных с помощью диафрагмы с отверстием), в которых преобладающими были изображения

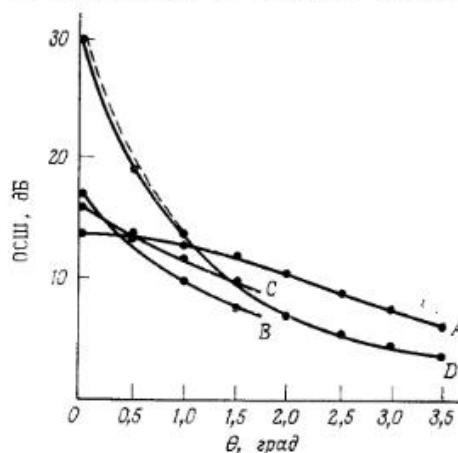


Рис. 11. Зависимость отношения сигнал/шум от угла поворота θ входного изображения относительно эталонного для случая, когда СПФ изготавливался на все изображение, а на вход коррелятора подавался только его фрагмент [5]. Кривая A — для изображения сельской местности; кривая B — для изображения города; кривая C — для изображения структуры; кривая D — автокорреляция в случае, когда на входе имеется полное эталонное изображение.

сельской местности, городских кварталов и структур (соответственно случаи AF , BF и CF). Соответствующие результаты приведены на рис. 11. Наиболее сильная зависимость отношения сигнал/шум от угла поворота θ входного изображения относительно эталонного наблюдалась в случае FF , когда поворот этих изображений всего на $1,7^\circ$ вызывал уменьшение отношения сигнал/шум на 20 дБ (заметим для сравнения, что в случае AF потери отношения сигнал/шум составили только 3 дБ при угле поворота $2,5^\circ$). Очевидно, что скорость уменьшения отношения сигнал/шум пропорциональна ширине спектра пространственных частот входного изображения. Отсюда можно сделать вывод, что совсем не нужно иметь более широкую полосу пропускания на входе. В противном случае коррелятор будет иметь очень жесткие допуски на изменение масштаба входного изображения, его угловое рассогласование относительно эталонного изображения и т.п. Если на полученную зависимость отношения сигнал/шум от угла поворота θ входного изображения наложить аналогичную кривую зависимости интенсивности пика корреляции I_p от угла θ , то мы обнаружим совпадение обеих кривых. Это указывает на то, что шумы остаются постоянными и что запись в СПФ дополнительных данных по отношению к тем, которые имеются во входном изображении, не приводит к появлению дополнительного шума в виде дополнительных взаимных корреляций.

Для этих входных изображений были также экспериментально определены допуски на неточность установки СПФ в частотной

плоскости коррелятора. Было обнаружено, что смещение СПФ на 50 мкм практически не влияет на величину I_p и на отношение сигнал/шум для всех случаев с ограничением входной апертуры, однако в случае FF то же самое смещение приводит к уменьшению отношения сигнал/шум на 20 дБ.

Следует заметить, что, выбирая определенную полосу пространственных частот f^* , в пределах которой $K=1$, можно управлять видом кривых зависимости I_p и отношения сигнал/шум от угла рассогласования θ , причем в значительных пределах. На рис. 12 показаны зависимости отношения сигнал/шум от угла θ для случая автокорреляции изображений городских кварталов, когда условие $K=1$ выполнялось в узкой (полоса B), средней (полоса C) и широкой (полоса H) полосах пространственных частот f^* . Наблюдаемые при этом эффекты очевидны. Так, для кривой H полоса f^* оказывается широкой, причем во входном изображении преобладают высокие пространственные частоты, что приводит к резкому уменьшению отношения сигнал/шум с ростом угла θ . В случае кривой B полоса f^* оказывается узкой, и поэтому во входном изображении высокие пространственные частоты, которые увеличивают отношение сигнал/шум, содержатся в значительно меньшей степени, что и обуславливает более слабую зависимость от угла θ . В этом случае по существу отношение сигнал/шум не испытывает потерь вплоть до $\theta=0,12^\circ$, в то время как из кривой H при этих же условиях мы получаем уменьшение отношения сигнал/шум на 25 дБ.

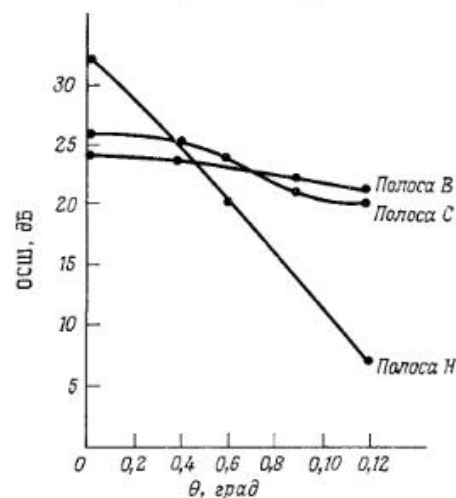


Рис. 12. Зависимость отношения сигнал/шум от угла поворота θ входного изображения относительно эталонного в случае автокорреляции на примере изображения сельской местности для трех значений полосы пространственных частот, в пределах которой отношение интенсивностей опорного и сигнального пучков $K=1$ (полоса B меньше полосы C, которая в свою очередь меньше полосы H) [5].

В работе [24] были выполнены аналогичные исследования зависимостей I_p и отношения сигнал/шум от угла θ для случая распознавания знаков. В следующем разделе мы обсудим некоторые специфические отличия, существующие между распознаванием образов и распознаванием знаков.

10.5.17. Различия в распознавании образов и знаков

Как указывают данные, приведенные в разд. 10.5.15 и 10.5.16 (эти данные были получены при работе с аэрофотоснимками), задача оптического распознавания образов состоит в получении пика корреляции¹⁾. По-видимому, вследствие детальности и структурной сложности изображений при этом не наблюдается ошибочных взаимных корреляций, соизмеримых по своей интенсивности с интересующими нас. Однако при распознавании знаков (в качестве примера можно указать на рис. 2) все входные данные или их части состоят из знаков и символов, являющихся членами общего ряда, к которому относится эталонный объект. Таким образом, распознавание знаков обычно характеризуется как наличием набора сложных фильтров на эталоны, несколько напоминающие изображения, так и, кроме того, наличием сильных ложных взаимных корреляций, присутствие которых на выходе необходимо подавить, чтобы исключить ошибочное обнаружение. Эти ложные взаимные корреляции возникают потому, что все буквы имеют в основном одинаковую форму. Действительно, по своей структуре все буквы состоят из вертикальных, горизонтальных, диагональных и спиральных линий, имеющих относительно постоянную ширину. Все эти общие элементы и содействуют появлению сильной шумоподобной взаимной корреляции при распознавании знаков.

Одним из наиболее привлекательных решений проблемы ложных корреляций, возникающих при распознавании знаков, по-видимому, является применение цифровых алгоритмов обработки распределения интенсивности на выходе оптического коррелятора. При таком подходе не стремятся решить целиком проблему с помощью либо только оптической корреляции, либо только цифровой обработки, а используют для этой цели соответствующий гибридный оптико-цифровой процессор, который объединяет в себе достоинства обоих подходов. Другой подход к этой проблеме заключается в использовании СПФ на целые слова, а не на отдельные буквы [17]. Экспериментальные данные показывают, что увеличение длины ключевого слова или фразы приводит к быстрому уменьшению взаимных корреляций с другими словами. Поэтому в случае оптического распознавания слов заметно уменьшается число ошибок. Это находится в хорошем согласии с доводами, объясняющими отсутствие ложных взаимных корреляций при распознавании образов, у которых полоса пропускания, интенсивность и структурные изменения входных изображений значительно больше.

В некоторых случаях распознавания знаков приходится применять сложные СПФ, что существенно усложняет оптическую

¹⁾ Разумеется, что это справедливо только для корреляционных методов оптического распознавания. — *Прим. перев.*

систему распознавания и процедуру записи СПФ, а также предъявляет жесткие требования к материалу, используемому для записи сложных СПФ.

10.5.18. Резюме, выводы и предстоящие исследования

Таким образом, мы рассмотрели 13 различных оптических корреляторов, предназначенных для обработки изображений и сигналов, и обсудили их достоинства и недостатки. Наиболее распространенным остается коррелятор с частотной плоскостью, однако мы полагаем, что самым перспективным является коррелятор с одновременным преобразованием, если только не требуется использовать сложные СПФ. Акустооптические корреляторы находят большое применение при обработке широкополосных сигналов.

При решении задачи оптического распознавания образов и знаков важную роль играют два системных компонента коррелятора: пространственно-временные модуляторы света для ввода данных и для синтеза согласованных пространственных фильтров. Необходимо провести большую работу по объединению различных систем, уделяя при этом особое внимание высокому оптическому качеству модуляторов. Обычно все придерживаются единого мнения относительно того, что окончательная система оптического распознавания, которая будет иметь преимущества над всеми остальными, должна представлять собой гибридную оптико-цифровую систему с предварительной и (или) последующей цифровой обработкой. В этом направлении еще необходимо проделать значительную работу, особенно в области разработки цифровых алгоритмов, целесообразных для использования при оптической обработке информации.

Привлекательна идея создания комбинированного акустооптического коррелятора, в котором выходной сигнал записывается на двумерный ПВМС. Если удастся осуществить такую систему, то мы получим высокую широкополосность, характерную для электрооптики в сочетании с большим значением ППШПП и двумерностью оптического процессора.

Должна быть продолжена работа по созданию пространственно-инвариантных систем, таких, например, как система с использованием преобразования Меллина. Выполненные начальные исследования показали возможность создания коррелятора, который будет инвариантным ко всем предполагаемым искажениям входного изображения по отношению к эталонному. В этой области достигнуты некоторые успехи; такие системы уже применялись для корреляционного анализа различных изображений, причем обрабатываемые изображения отличались от эталонных как по масштабу, так и по угловой ориентации [7]. В заключение отметим, что, когда мы решим задачу оптического распознавания образов,

мы должны будем сосредоточить наше внимание на рассмотрении реальных ситуаций при наличии различных искажений между входным и эталонным изображением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Armitage J., Lohmann A., Appl. Opt., 4, 464 (1965).
2. Burckhardt C., Appl. Opt., 6, 1359—1366 (1967).
3. Casasent D., Proc. IEEE 65, 143—157 (1977). [Имеется перевод: Кейсасент Д. — ТИИЭР, 1977, т. 65, № 1.]
4. Casasent D., Furman A., Appl. Opt., 16, 285—286 (1977).
5. Casasent D., Furman A., Appl. Opt., 16, 1662—1669 (1977).
6. Casasent D., Furman A., Appl. Opt., 16, 1652—1661 (1977).
7. Casasent D., Furman A., Appl. Opt., 16, 1955—1959 (1977).
8. Casasent D., Kessler R., Opt. Commun., 17, 242—244 (1976).
9. Casasent D., Klimas E., Appl. Opt., 17, 2058 (1978).
10. Casasent D., Kraus M., Opt. Commun., 19, 212—216 (1976).
11. Casasent D., Psaltis D., Opt. Commun., 17, 59—63 (1976).
12. Casasent D., Psaltis D., Appl. Opt., 15, 1795—1799 (1976).
13. Casasent D., Psaltis D., Proc. IEEE, 65, 77—84 (1977). [Имеется перевод: Кейсасент Д. — ТИИЭР, 1977, т. 65, № 1.]
14. Casasent D., Sterling W., IEEE Trans., C-24, 348—358 (1975).
15. Flores L., Hecht D., SPIE J., 118, 182—192 (1977).
16. Groh G., Opt. Commun., 1, 454—456 (1970).
17. Harris Corp. Final Rep. on Contract 30602-75-C-0073 for RADC, April 1976.
18. Monahan M., Bromley K., Bocker R., Proc. IEEE, 65, 121—129 (1977). [Имеется перевод: Монахан М. и др. — ТИИЭР, 1977, т. 65, № 1.]
19. Opt. Engr. Special Issue on Acousto Optics, July 1977.
20. Rao J., J. Opt. Soc. Amer., 57, 798 (1967).
21. Said R. A. K., Cooper D. C., Proc. Inst. Elec. Eng., 120, 423 (1973).
22. Vander Lugt A., IEEE Trans. Inform. Theory II-10, 139—145 (1964).
23. Vander Lugt A., Appl. Opt., 5, 1760—1765 (1966).
24. Vander Lugt A., Rotz F., Klooster A., «Optical and Electro-Optical Information Processing», MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1965 p. 125—141.
25. Vander Lugt A., Rotz F., Appl. Opt., 9, 215 (1970).
26. Vienot J. et al., Appl. Opt., 12, 950—960 (1973).

10.6. ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

С. Лу

10.6.1. Введение

Обработка изображений в самом общем виде предполагает выполнение операций с многомерными сигналами, которые являются функциями нескольких переменных. В качестве многомерных сигналов можно рассматривать аэрокосмические фотографии, медицинские рентгеновские снимки, телевизионные изображения, электронные микрофотограммы, радиолокационные и гидролокационные

карты и данные сейсморазведки. Цели обработки могут быть различными: улучшение изображений, извлечение информации, эффективное кодирование, распознавание образов или машинная графика. Мы попытаемся показать, каким образом голография и когерентная оптика позволяют достичь различных целей обработки изображений. Некоторые из применяемых методов основаны на линейных, пространственно-инвариантных операциях, другие — на нелинейных или пространственно-неинвариантных.

10.6.2. Линейная обработка изображений

Обработка называется линейной, когда обработанное (выходное) изображение линейно связано с исходным. Примерами линейных операций обработки являются полосовая фильтрация, вычитание, свертка и корреляция. Улучшение изображений методами полосовой или высокочастотной фильтрации легко осуществить с помощью линз, которые при использовании когерентного света [1, 3, 16] формируют фурье-образ изображения. В этом разделе мы лишь опишем и прокомментируем методы пространственной фильтрации и некоторые другие, более сложные методы (например, обработку с использованием оптической обратной связи).

10.6.2.1. Улучшение изображений методами обратной фильтрации

Фотографические изображения, искаженные случайно (из-за перемещений, плохой фокусировки, турбулентности и т. п.) или намеренно (например, кодирование изображений при специальной обработке или синтезирование изображений), можно подвергнуть обработке и улучшить их качество. Обозначая функцию размытия, или импульсный отклик, через $h(x, y)$, искаженное изображение $g(x', y')$ можно записать в виде

$$g(x', y') = \iint f(x, y) h(x' - x, y' - y) dx dy. \quad (1)$$

Качество изображения можно улучшить, если подвергнуть исходное изображение операции обратной свертки. Для осуществления такой операции необходим пространственный фильтр с функцией пропускания $1/H(p, q)$, поскольку фурье-образ функции $g(x', y')$ дается выражением

$$G(p, q) = F(p, q) H(p, q), \quad (2)$$

откуда

$$F(p, q) = G(p, q) / H(p, q); \quad (3)$$

здесь $F(p, q)$, $G(p, q)$ и $H(p, q)$ — фурье-образы функций $f(x, y)$, $g(x, y)$ и $h(x, y)$ соответственно. Чтобы синтезировать функцию фильтра $1/H(p, q)$, Строук и Зех [31] предложили использовать два фильтра (рис. 1) — один с амплитудным пропусканием H^* , а другой — с пропусканием $1/(HH^*)$. Фильтр H^* изготавливается методом Вандер Люгта и представляет собой результат интерференции

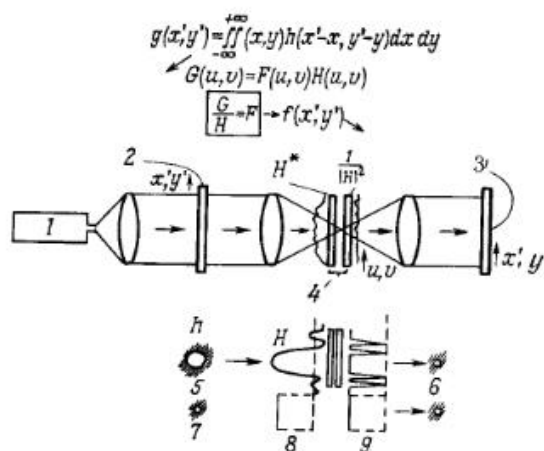
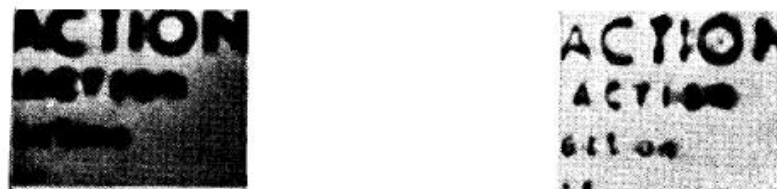


Рис. 1. Восстановление размытых оптических изображений методом обратной фильтрации [31]. 1 — лазер; 2 — размытое изображение; 3 — улучшенное изображение; 4 — обратный фильтр; 5 — размытая точка; 6 — улучшенное изображение точки; 7 — резкая точка; 8 — спектр Фурье; 9 — спектр на выходе фильтра.

наклонной плоской волны и спектра Фурье функции $h(x, y)$. Фильтр $1/(HH^*)$ получают тщательной фотографической записью фурье-образа импульсного отклика $h(x, y)$ на регистрирующем материале с коэффициентом контрастности $\gamma = -2$. Затем оба фильтра складывают вместе в виде сэндвича и точно юстируют в оптической системе, так чтобы при освещении фильтров произведение их амплитудных пропусканий $(H^*)/(1/HH^*)$ соответствовало искомой функции филь-

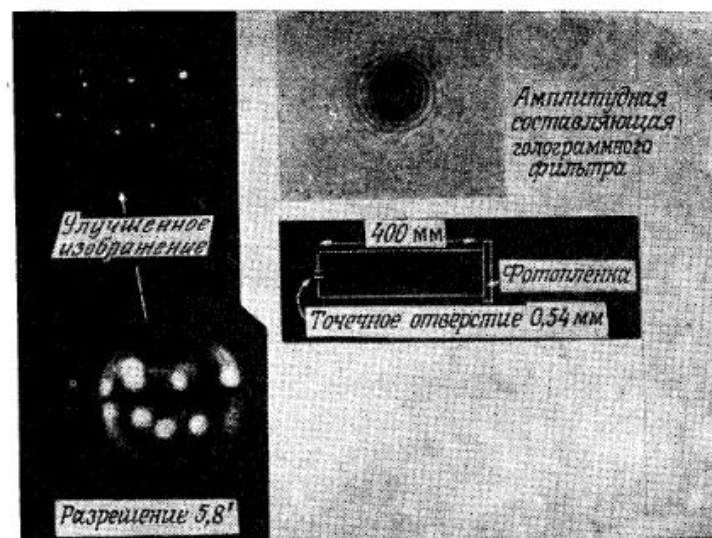


Рис. 2. Рентгеновская фотография Солнца, полученная с помощью камеры-обскуры в мае 1968 г., была улучшена Строуком и Зехом летом 1969 г. [29].

рации ($1/H$). На рис. 2 показана рентгеновская фотография Солнца, полученная камерой обскуры и улучшенная благодаря применению этого метода [29]. На рис. 3 иллюстрируется улучшение изображения в сканирующем электронном микроскопе [30].

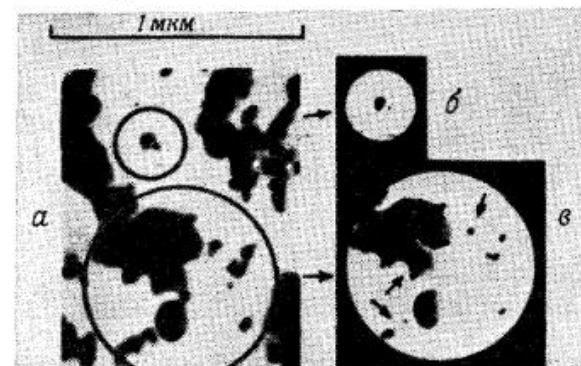


Рис. 3. а — исходное изображение, полученное в сканирующем электронном микроскопе при оптимальных условиях (разрешение — 200 Å, увеличение — 50 000×, напряжение — 25 кВ); б и в — изображения, обработанные голографическим способом; разрешение стало лучше 70 Å, и соответственно вырос контраст [30].

10.6.2.2. Кодирование и декодирование изображений с пространственными фильтрами, вычисляемыми на ЭВМ

Кодирование и декодирование изображений представляет собой имеющую большое значение и интересную область оптической обработки изображений. Если изображение $f(x, y)$ необходимо закодировать в виде $g(x, y)$ методом пространственной фильтрации, то

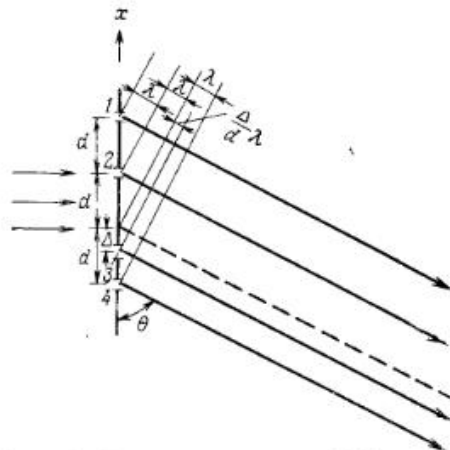


Рис. 4. Синтезированные на ЭВМ пространственные фильтры, использующие косвенные фазовые эффекты для синтеза комплексных функций фильтра.

которой пропорциональна амплитуде, а ее смещение в поперечном направлении (от точки выборки) пропорционально фазе. Синтезированную на ЭВМ голограмму можно рассматривать как дифракционную решетку с целенаправленно введенными дефектами. Желаемое комплексное поле получается в результате косвенных фазовых эффектов в одном из дифракционных порядков (рис. 4). На рис. 5 показана такая голограмма-фильтр, преобразующая букву G в знак +. Экспериментальные результаты применения этого фильтра были получены Ломаном и сотр. [23] (рис. 6).

10.6.2.3. Вычитание и дифференцирование изображений с помощью дифракционных решеток

Операции вычитания и дифференцирования изображений полезны, когда надо обнаружить различия между двумя сценами или подчеркнуть скорость изменения информации в пределах одной сцены. Пространственные фильтры для этих операций могут быть

фильтр, используемый для этой цели, должен иметь пропускание $G(p, q)/F(p, q)$, поскольку эта величина описывается отношением двух комплексных функций: такой фильтр легче синтезировать с помощью ЭВМ, чем построить обычными голографическими методами.

Впервые синтезированную на ЭВМ голограмму произвольной комплексной функции фильтра создали Ломан с сотр. [7, 21]. Чтобы получить такую голограмму, прежде всего необходимо сделать выборку комплексного поля. В каждой точке выборки комплексное поле представляется прямоугольной щелью, ширина ко-

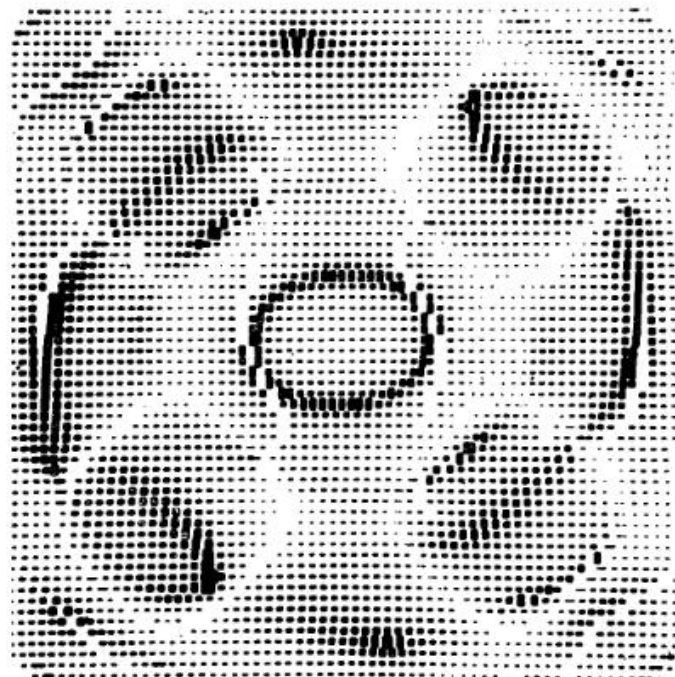


Рис. 5. Бинарный пространственный фильтр для преобразования буквы G в знак + [23].

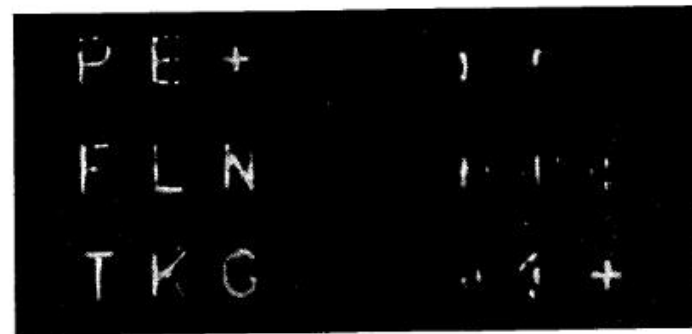


Рис. 6. Иллюстрация процесса трансляции. Слева — изображение объекта [23]; справа — выходное изображение, в котором вместо буквы G виден знак +.

изготовлены голографическими методами или с помощью ЭВМ [6, 21]. Было показано также, что для этих целей пригодны и простые дифракционные решетки или комбинация нескольких решеток [19, 32]. Обсудим теперь теорию фильтрации с использованием

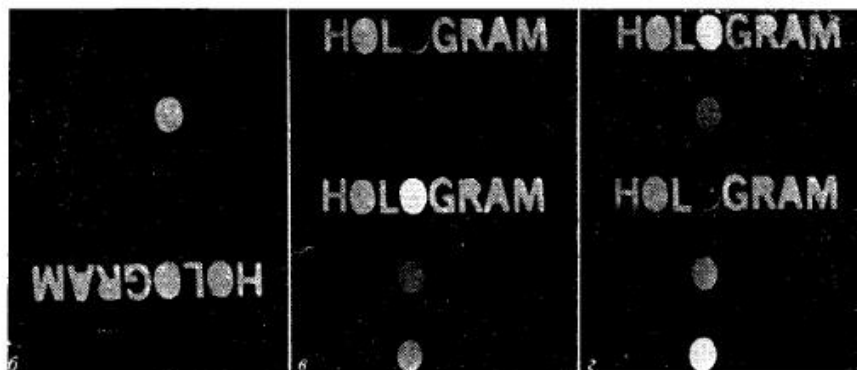
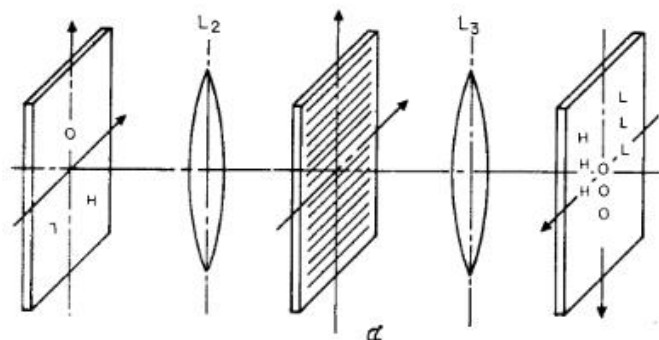


Рис. 7. Комплексное амплитудное сложение и вычитание с помощью дифракционных решеток. *a* — оптическая схема; *б* — два входных изображения; *в* и *г* — сумма и разность изображений буквы О и слова HOLOGRAM в центральной области выходной плоскости.

дифракционных решеток, поскольку они широко распространены и их нетрудно изготовить.

Как показано на рис. 7, синусоидальная решетка, максимальное пропускание которой смещено на четверть ширины штриха от оптической оси, производит вычитание изображений в центральной части выходной плоскости, когда оба неперекрывающихся изображения симметрично расположены во входной плоскости на расстояниях $\pm(p\lambda f/2\pi)$ от оптической оси (здесь $p/2\pi$, λ и f — соответственно частота решетки, длина волны света и фокусное расстояние линзы). Чтобы проанализировать этот процесс, запишем функцию пропускания синусоидальной решетки в виде

$$H(p, q) = \frac{1}{2} \{1 + \exp[i(p\lambda f/2\pi)] + \exp[-i(p\lambda f/2\pi)]\}. \quad (4)$$

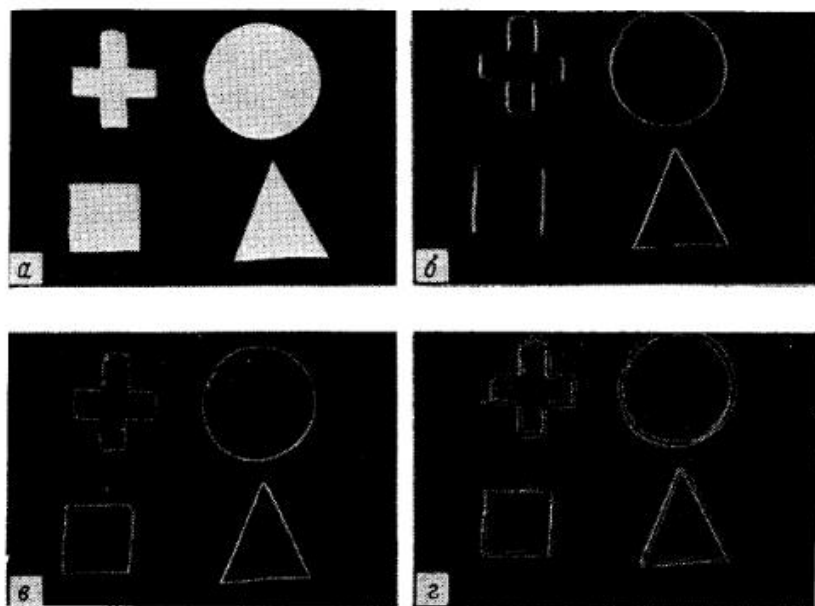


Рис. 8. Оптическое дифференцирование (экспериментальные результаты) с помощью составных решеток [32]. *a* — объекты; *б* — $\partial g/\partial x$; *в* — $\partial g/\partial x + \partial g/\partial y$; *г* — $\partial^2 g/\partial x^2 + \partial^2 g/\partial y^2$.

Амплитуду света, падающего на эту решетку, можно представить следующей функцией:

$$G_i(p, q) = G_1(p, q) e^{-ipx} + G_2(p, q) e^{ipx}, \quad (5)$$

где $G_1(p, q)$ и $G_2(p, q)$ — фурье-образы входных функций g_1 и g_2 в верхней и нижней частях входной плоскости. При этом амплитуда света за решеткой дается выражением

$$G_o(p, q) = G_i(p, q) H(p, q) = \frac{1}{2} [G_1(p, q) e^{i\pi/2} + G_2(p, q) e^{-i\pi/2}] + 4 \text{ слагаемых}. \quad (6a)$$

Таким образом, на выходе мы получаем

$$g_o(x, y) = (i/2) [g_1(x, y) - g_2(x, y)] + 4 \text{ слагаемых}. \quad (6b)$$

Для дифференцирования изображений необходимы две синусоидальные решетки со слегка отличающимися пространственными частотами, причем максимальное пропускание одной решетки должно быть смещено на половину светлой полосы относительно другой решетки. Передаточная характеристика такой составной

решетки имеет вид

$$H(p, q) = 1 + \cos(px) - \cos[(p + \epsilon)x],$$

импульсный отклик равен

$$h(x, y) = (1/2)[\delta(x + 2\pi/p, y) - \delta(x + 2\pi/(p + \epsilon), y)] + 3 \text{ слагаемых.} \quad (7)$$

Результат дифференцирования входного изображения, полученный с помощью двух синусоидальных решеток, наблюдается в выходной плоскости в одном из дифракционных порядков (рис. 8), поскольку

$$g_0(x, y) \sim \lim_{\epsilon \rightarrow 0} (1/\epsilon) [g(x, y) * \{\delta(x + 2\pi/p, y) - \delta(x + 2\pi/(p + \epsilon), y)\}] = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} (1/\epsilon) [g(x + 2\pi/p, y) - g(x + 2\pi/(p + \epsilon), y)] = \partial g / \partial x; \quad (8)$$

здесь * обозначает операцию корреляции.

10.6.2.4. Когерентная обратная связь и управление контрастом

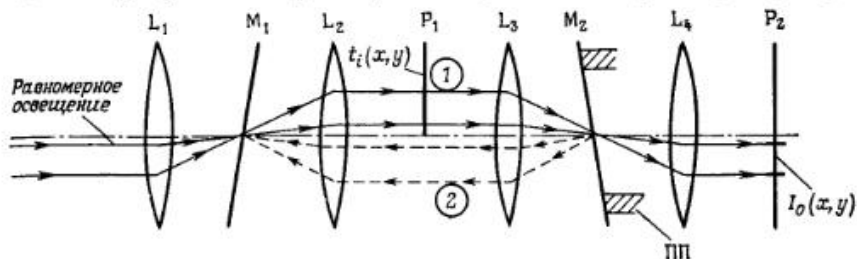
Визуальное качество изображения в большой степени зависит от контраста или относительных интенсивностей фона изображения и участков, несущих информацию. В определенных случаях контраст фотографических (обработанных) транспарантов должен быть изменен. Например, контраст аэроснимков во многих случаях необходимо уменьшать, а контраст рентгеновских изображений — усиливать. Для управления контрастом можно использовать когерентные оптические системы с обратной связью (рис. 9). В таких системах входной транспарант модулирует свет, многократно отраженный от зеркал обратной связи, прежде чем информация выводится из системы [17, 20]. С изменением расстояния между зеркалами контраст изображения усиливается или ослабляется в зависимости от того, конструктивная или деструктивная интерференция имеет место между многократно отраженными сигналами.

Амплитуды выходных сигналов в системах с когерентной обратной связью, схематически показанных на рис. 9, а и б, соответственно определяются следующими уравнениями:

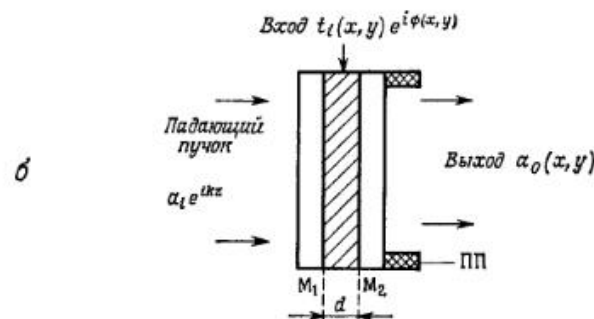
$$\frac{a_0(x, y)}{a_i} = t_i(x, y) t_m^2 [1 + r_m^2 t_i(x, y) e^{i\varphi} + r_m^4 t_i^2(x, y) e^{i2\varphi} + \dots] = \frac{t_i(x, y) t_m^2}{\{1 - r_m^2 t_i(x, y) e^{i\varphi}\}}, \quad (9a)$$

$$\frac{a_0(x, y)}{a_i} = \frac{t_i(x, y) t_m^2}{\{1 - r_m^2 t_i^2(x, y) e^{i\varphi}\}}, \quad (9б)$$

где a_i — амплитуда света на входе, $t_i(x, y)$ — амплитудное пропускание исходного изображения, r_m и t_m — амплитудное отражение и пропускание зеркала, а $e^{i\varphi}$ — фазовая задержка распространения.



а



б

Рис. 9. Управление контрастом в системе с когерентной оптической обратной связью. а — схема когерентной системы обратной связи с линзами и плоскими зеркалами [17]; сплошные линии — путь луча в прямом направлении, штриховые линии — путь луча в обратном направлении; б — система с плоскими параллельными зеркалами [20]; ПП — пьезоэлектрический преобразователь.

нящегося между зеркалами света, зависящая от расстояния между ними. Мы видим, что знаменатели уравнений (9а) и (9б) отличаются друг от друга; это связано с тем, что свет, отражающийся от зеркала, модулируется за каждый замкнутый цикл проходя транспарантом $t_i(x, y)$ в первом случае один раз, а во втором — два раза. Интенсивность света на выходе первой системы записывается в виде

$$T_c(x, y) = \left| \frac{a_0(x, y)}{a_i} \right|^2 = \frac{T_i(x, y) T_m^2}{1 + R_m^2 T_i(x, y) - 2R_m t_i(x, y) \cos \varphi}, \quad (10a)$$

а на выходе второй системы

$$T_c(x, y) = \frac{T_i(x, y) T_m^2}{1 + R_m^2 T_i^2(x, y) - 2R_m T_i(x, y) \cos \varphi}, \quad (10б)$$

8*

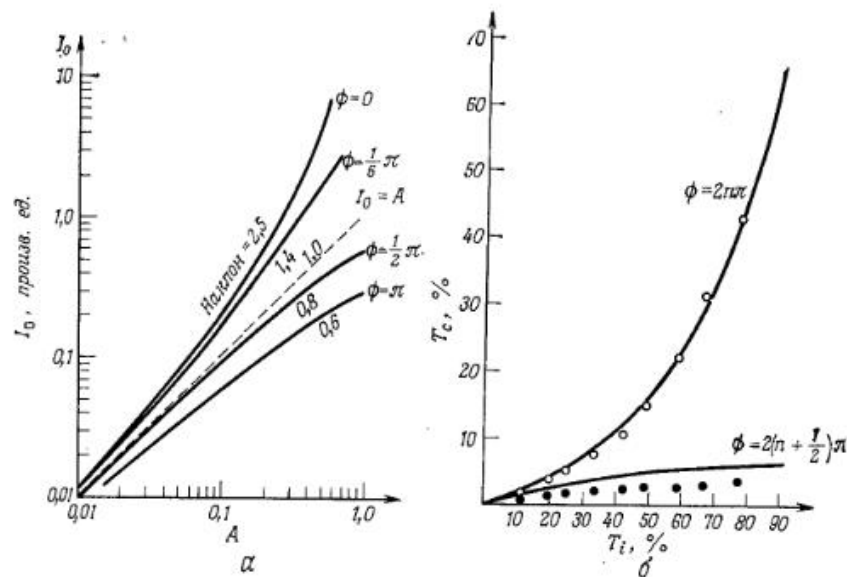


Рис. 10. Выходные характеристики системы. *а* — в случае системы, представленной на рис. 9, *а*; $R_1=R_2=0,9$; *б* — в случае системы на рис. 9, *б*; $R_1=0,65$, $R_2=0,54$.

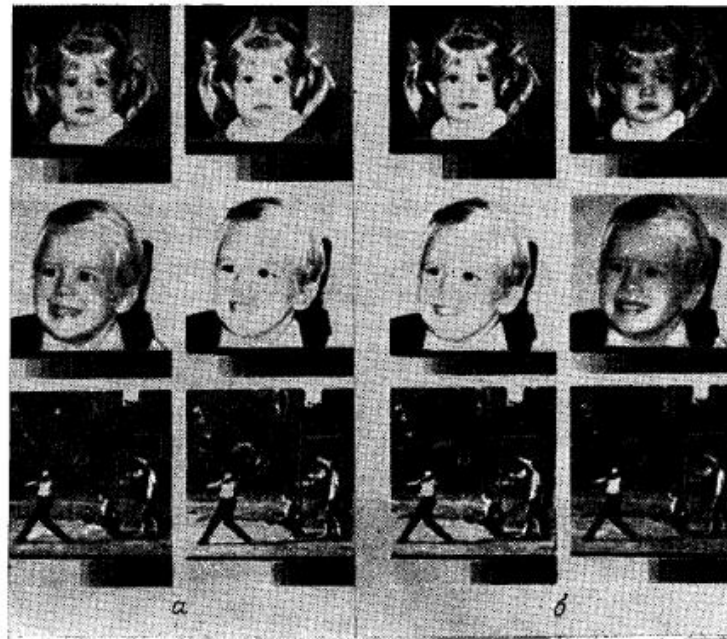


Рис. 11, *а* и *б*.

где $T_i(x, y)$, T_m — коэффициенты пропускания, а R_m — коэффициент отражения по интенсивности. Таким образом, меняя расстояния между зеркалами, которыми определяется задержка $e^{i\phi}$, можно управлять контрастом выходного изображения (рис. 10, *а* и *б*). На рис. 11 приведена иллюстрация экспериментальных результатов.

Системы с когерентной оптической обратной связью полезны не только для управления контрастом изображений, но также и для улучшения качества изображений и решения дифференциальных уравнений в частных производных [11, 17]; кроме кодирования и декодирования изображений, пространственные фильтры, синтезированные на ЭВМ, можно также применять для восстановления размытых изображений и их дифференцирования [21]. В этом разделе мы не пытались дать исчерпывающее изложение вопросов линейной обработки изображений, а лишь показали на примерах,

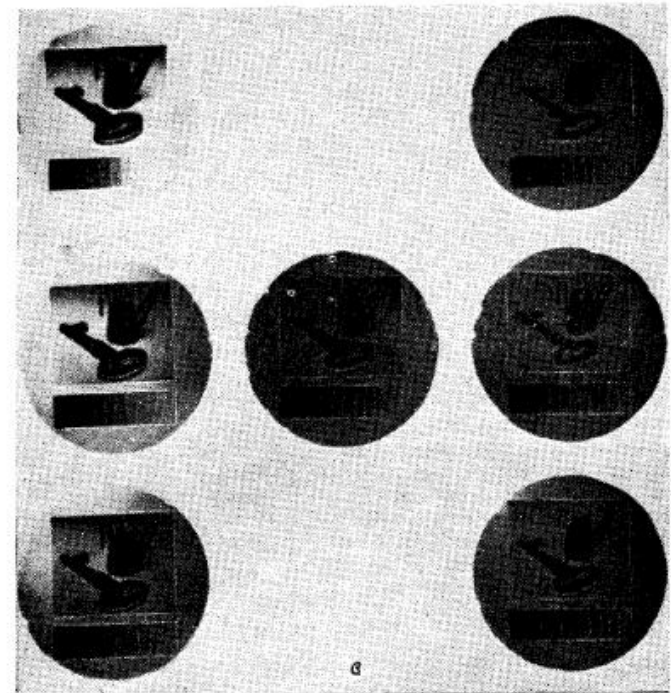


Рис. 11. Экспериментальные результаты управления контрастом, полученные для двух когерентных систем, представленных на рис. 9, *а* и *б*; в левых колонках показаны исходные изображения, а в правых — изображения на выходе системы обратной связи. *а* — усиление контраста, полученное в системе, приведенной на рис. 9, *а* [17]; *б* — ослабление контраста в той же системе [17]; *в* — управление контрастом в системе, показанной на рис. 9, *б*; в этом случае исходное изображение приведено в центре картины [20].

что существует ряд когерентных оптических методов, которые позволяют решать различные задачи, связанные с обработкой изображений.

10.6.3. Нелинейная обработка изображений

Логарифмирование, квантование, ограничение уровня, пороговое ограничение и аналого-цифровое преобразование являются примерами интересных и важных нелинейных операций обработки изображений, которые успешно выполняются средствами когерентной оптики. В настоящее время разработан ряд методов для реализации этих нелинейных операций. Среди них полутоновые экраны, методы тета-модуляции и нелинейные устройства с обратной связью. Ниже обсуждаются принципы работы некоторых схем, выполняющих нелинейные операции.

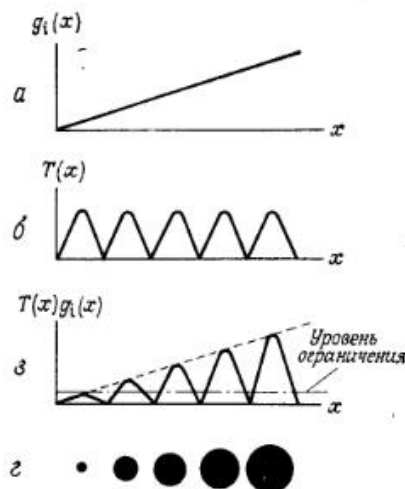


Рис. 12. Метод полутонового экрана [18]. *a* — непрерывное распределение света на входе, описываемое функцией $g_i(x)$; *b* — пропускание полутонового экрана; *в* — распределение света, падающего на высококонтрастный фотоматериал; *г* — полутоновое изображение на высококонтрастном фотоматериале.

Изображение нелинейно связано с функцией $g_i(x, y)$. Последующая низкочастотная фильтрация полутонового изображения, осуществляемая глазом или с помощью оптического процессора, дает монотонное изображение $g_0(x, y)$, которое нелинейно (но непрерывным образом) связано с исходным изображением $g_i(x, y)$.

Этот метод был экспериментально проверен для случая логарифмического преобразования, когда входное изображение кодировалось с помощью контактного логарифмического экрана, который

10.6.3.1. Полутоновые экраны

Когда изображение объекта, описываемого медленно меняющейся функцией $g_i(x, y)$, контактно отпечатывается на высококонтрастном фотоматериале через полутоновый экран, выходное изображение представляет собой матрицу отдельных точек. Размер точек зависит от самой функции $g_i(x, y)$ и от профиля полутонового экрана, как показано на рис. 12 [18]. При надлежащем контроле профиля точек полутоновых экранов размер точек полутонового из-

в свою очередь был получен как контактный отпечаток на контрастной фотопленке полутонового экрана фирмы «Kodak» (экран имел разрешение 100 линий/мм и эллиптическую форму точек) [18]. На рис. 13 показан пример, когда входное изображение, представляющее собой произведение двух составляющих, логарифмическим преобразованием трансформируется в сумму входных составляющих. Исходное изображение состоит из двух ориентированных перпендикулярно друг другу низкоконтрастных решеток. Следует заметить, что, когда скрещенные решетки записываются через логарифмический полутоновый экран, спектр кодированного изображения имеет вид суперпозиции спектров двух решеток, причем каждая решетка имеет спектральные составляющие только по одной оси. С другой стороны, когда те же скрещенные решетки записываются линейно без логарифмического экрана, спектр изображения представляет собой свертку спектров каждой решетки, т. е. имеет перекрестные составляющие, не совпадающие с направлением осей координат.

Для получения немонокотных нелинейных эффектов вместо применения низкочастотной фильтрации полутонового изображения мы должны отселектировать высшие дифракционные порядки [22, 25]. Чтобы пояснить эту идею, рассмотрим полутоновое изображение, состоящее из большого числа изолированных участков. В любом из этих участков мы имеем простую прямоугольную решетку, скважность w ($w = a/d$, рис. 14) которой зависит от пропускания оригинала на входе для данного участка. Дифракция на

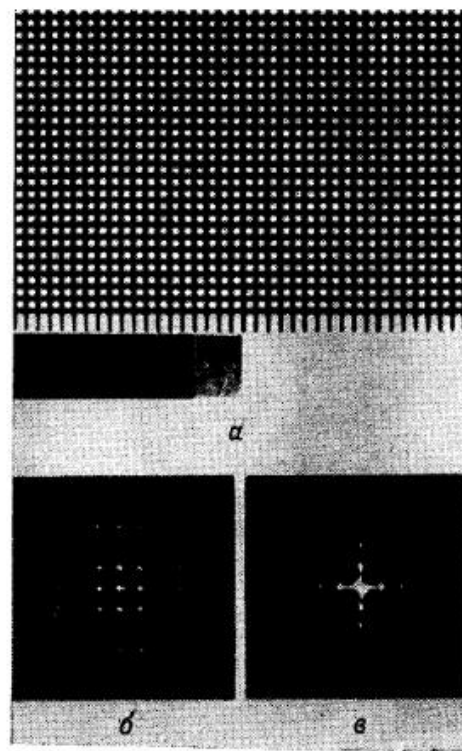


Рис. 13. Влияние логарифмического преобразования на спектр Фурье изображения [18]. *a* — входное изображение в виде скрещенных решеток; динамический диапазон оптической плотности от 0 до 2,0; *б* — обычный спектр скрещенных решеток при линейном копировании, видны интермодуляционные составляющие спектра; *в* — спектр логарифмически преобразованных скрещенных решеток, полученный с использованием логарифмического контактного экрана.

прямоугольной решетке в высших порядках немонотонно зависит от скважности решетки, в то время как в первом порядке эта зависимость является монотонной (рис. 14). Поскольку скважность решетки в каждом участке полутонного изображения определяется

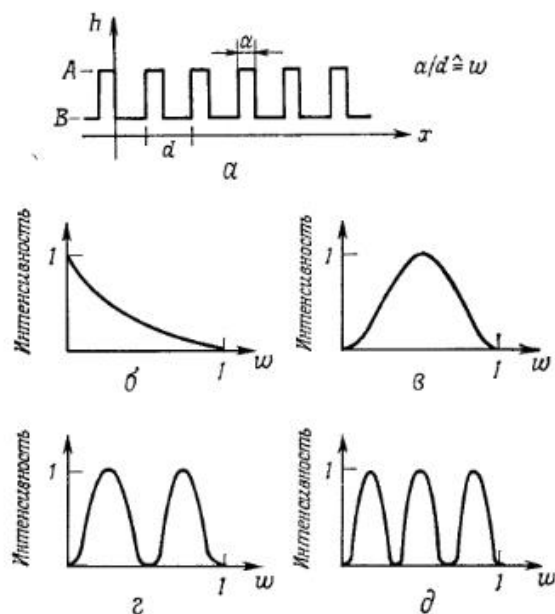


Рис. 14. Дифракция на прямоугольной решетке [22]. *a* — прямоугольная решетка; *b* — нулевой дифракционный порядок; *в*, *г* и *д* — соответственно первый, второй и третий дифракционные порядки.

пропусканием исходного изображения в этом месте, то дифракция в высших порядках будет также немонотонно зависеть от входного изображения. Эти методы проверялись экспериментально. На рис. 15 показаны результаты обработки изображений по ограничению уровней [25], на рис. 16 — построение изофот и на рис. 17 — аналого-цифровое преобразование [22, 27, 28].

10.6.3.2. Метод тета-модуляции

Исходный объект $g_1(x, y)$ преобразуется в модулированный сигнал $g_m(x, y)$, представляющий собой набор решеток, каждая из которых ориентирована под некоторым углом θ , пропорциональным распределению амплитуд в объекте [4]:

$$\theta(x, y) = K g_1(x, y), \quad K = \pi / \text{Max } g_1. \quad (11)$$

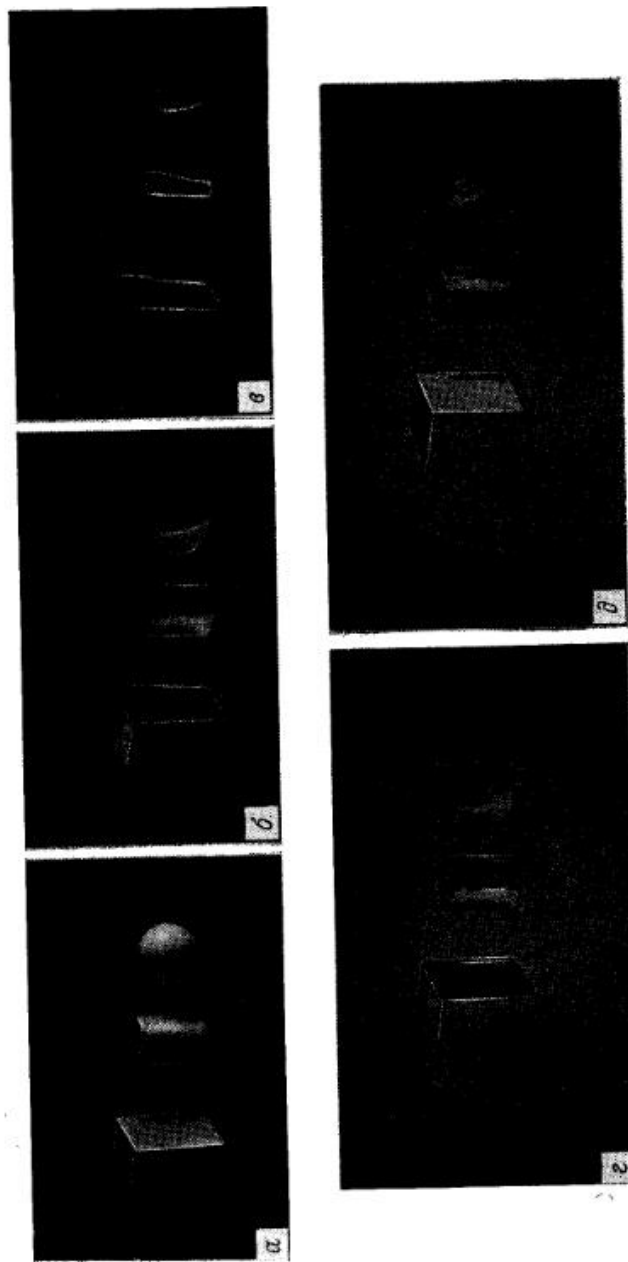


Рис. 15. Немонотонная нелинейная обработка изображений с помощью полутонного экрана [25]. *a* — исходное изображение геометрических фигур; *б* и *в* — ограничение сигнала на двух различных уровнях; *г* — квантование на три уровня; *д* — ограничение уровня сигнала.

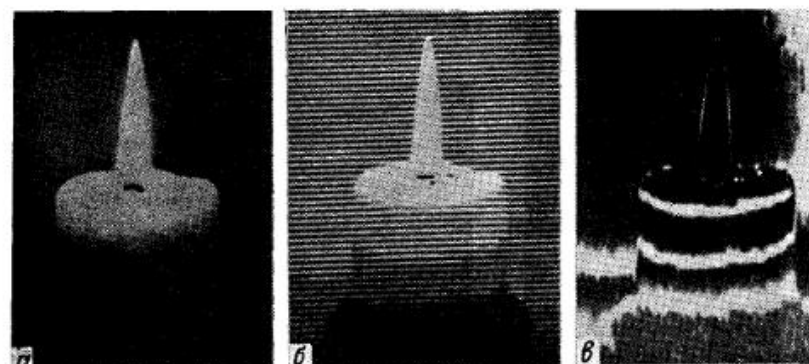


Рис. 16. Получение изофот [27, 28]. *a* — исходное изображение; *б* — полутоновое изображение; *в* — изофоты.

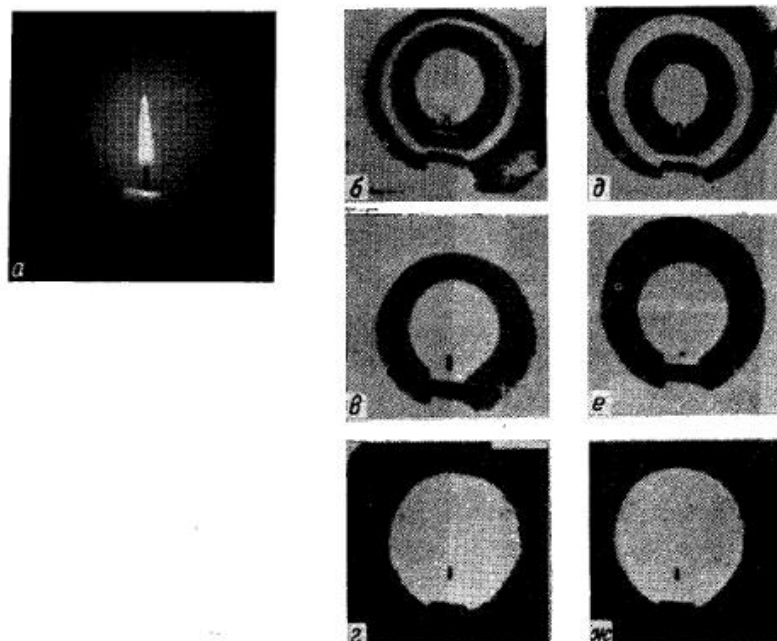


Рис. 17. Сравнение результатов аналого-цифрового преобразования полутонового изображения (*a*) в бинарные оптическими методами (*б, в, г*) и электронными (*д, е, ж*) [27, 28].

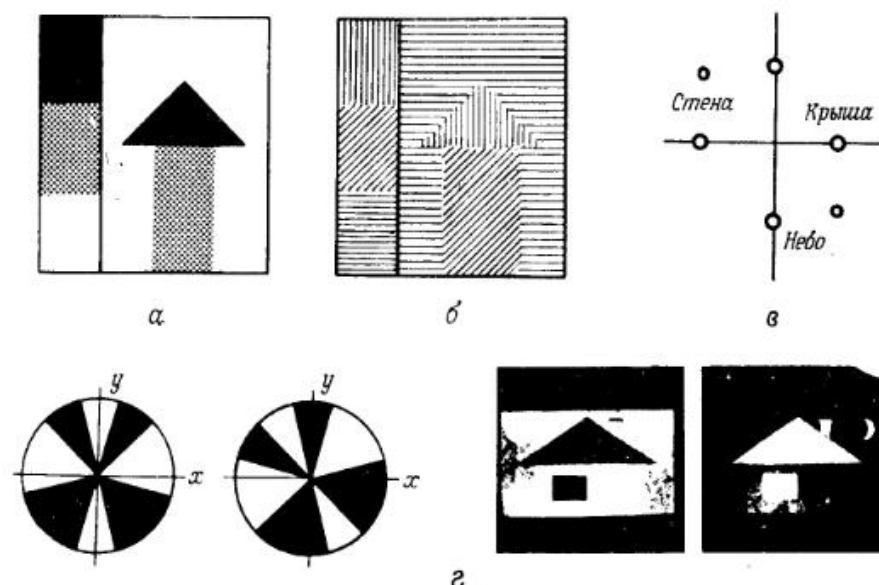


Рис. 18. Принцип метода тета-модуляции [4]. *a* — полутоновый объект; *б* — этот же объект после тета-модуляции; *в* — дифракционная картина тета-модулированного объекта; *г* — применение тета-модуляции к объекту, который затем демодулируется двумя различными масками.

Пример осуществления такой модуляции приведен на рис. 18, *a* и *б*. Когда модулированный объект освещается коллимированным когерентным светом в системе оптической обработки, свет дифрагирует в различные участки фурье-плоскости. В действительности свет от всех элементарных решеток в изображении $g_m(x, y)$, ориентированных под одним и тем же углом, что соответствует всем элементам исходного изображения $g_1(x, y)$ одинаковой интенсивности, дифрагирует в фурье-плоскости в одном направлении (рис. 18, *в*). Теперь, если в этой фурье-плоскости поместить фильтр, пропускание которого $T(\theta)$ является нелинейной функцией азимутального угла θ , то амплитуда выходного изображения $g_0(x, y)$ будет нелинейно связана с $g_1(x, y)$. На рис. 18, *г* приведен соответствующий пример. Рассмотрим примеры трех функций $T(\theta)$, которые иллюстрируют широкие возможности этого нелинейного метода обработки.

Пример 1. Функция фильтра $T(\theta)$ представляет собой щель, ориентированную под углом θ . Тогда выходное изображение $g_0(x, y)$ будет иметь вид линий, соответствующих участкам с одним значением амплитуды или плотности исходного изображения $g_1(x, y)$. При нескольких щелях, сдвинутых на один и тот же угол, выходное

изображение является контурной картой рельефа амплитуд входного изображения.

Пример 2. Функция фильтра $T(\theta)=0$ в диапазоне углов $0<\theta<\theta_0$ и $T(\theta)=1$ при $\theta_0<\theta<2\pi$. При этом мы получаем результаты, обусловленные операцией ограничения: в выходном изображении отсутствуют составляющие, амплитуда или интенсивность которых меньше некоторой величины, соответствующей углу θ_0 .

Пример 3. Функция $T(\theta)$ имеет логарифмическую зависимость от угла θ . В этом случае осуществляется операция логарифмического преобразования исходного изображения.

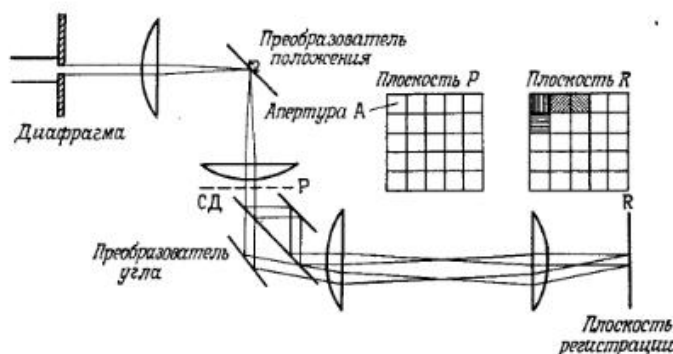


Рис. 19. Совместное использование сканера лазерного пучка и интерферометра Маха — Цендера для создания микрорешеток с управляемой пространственной частотой и ориентацией штрихов. Управление в системе осуществляется микропроцессором. СД — светоделитель.

Хотя метод тета-модуляции имеет широкие возможности, в настоящее время его трудно применять на практике, поскольку для выполнения операции кодирования, которая требуется с целью преобразования функции $g_i(x, y)$ в $g_m(x, y)$, необходимо высокое разрешение. Однако разрабатывается перспективный метод кодирования, одной из разновидностей которого является сканирование лазерным пучком и применение интерферометра Маха — Цендера¹⁾. Следует заметить, что существующие сканеры лазерного пучка обеспечивают разрешение 1000 и более точек, а интерферометр Маха — Цендера дает более 10 полос в сканирующем пятне размером 15—20 мкм. На рис. 19 показана схема одного из возможных вариантов такой системы.

¹⁾ Исследования метода сканирования лазерного пучка с использованием интерферометра Маха — Цендера для целей тета-модуляции изображения проводятся совместно Дайалом и Ли в Калифорнийском университете.

10.6.3.3. Нелинейные устройства

Ограничение уровня интенсивности исходного изображения можно выполнить, если изменения интенсивности изображения представить в виде фазовой модуляции прозрачной пластинки, помещенной между зеркалами прецизионного интерферометра Фабри — Перо [5, 20]¹⁾. Пропускание интерферометра $T_p(x, y)$ при

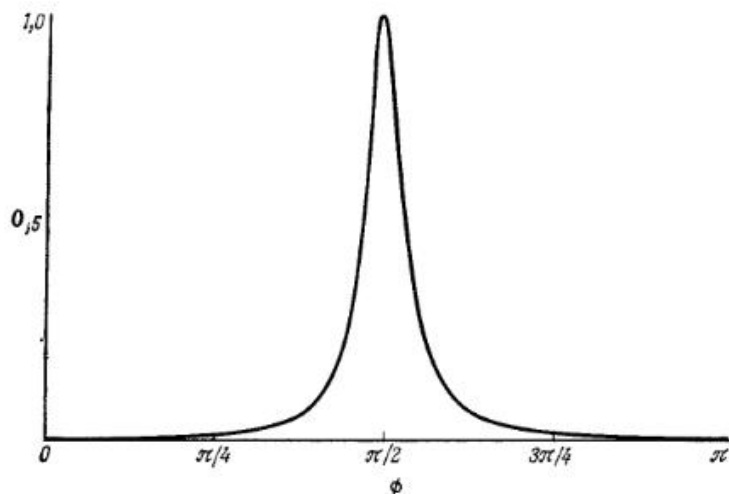


Рис. 20. Пропускание прецизионного интерферометра Фабри — Перо [5]. $R_m = 95\%$, ϕ — фазовый сдвиг, определяемый расстоянием между зеркалами.

изменении фазы пластинки $\Phi(x, y)$ дается выражением

$$T_p(x, y) = T_m^2 / [1 + R_m^2 - 2R_m \cos \{\phi + 2\Phi(x, y)\}]. \quad (12)$$

Чтобы получить высокую точность ограничения, выбираются большие значения коэффициента отражения R_m . В таком случае прибор действует как узкополосный фильтр, пропускающий свет только в тех участках изображения, для которых $\Phi(x, y) + (\phi/2) = n\pi$ (рис. 20). Если изменения фазы $\Phi(x, y)$ в диапазоне до π записаны в виде монотонной функции входной интенсивности, то различные значения Φ можно выделить с помощью пьезоэлектрического преобразования, позволяющего менять расстояние между зеркалами и угол ϕ . В случае $R_m = 95\%$ ширина максимума T_p по уровню 0,5 составляет около 0,1 рад; при этом приблизительно 30 значений фазы Φ или 30 уровней полутонов в изображении можно разрешить в одном спектральном интервале сканирования интерферометра.

¹⁾ Систему нелинейной обработки, описываемую в данном разделе, изобрел Б. Бартоломев.

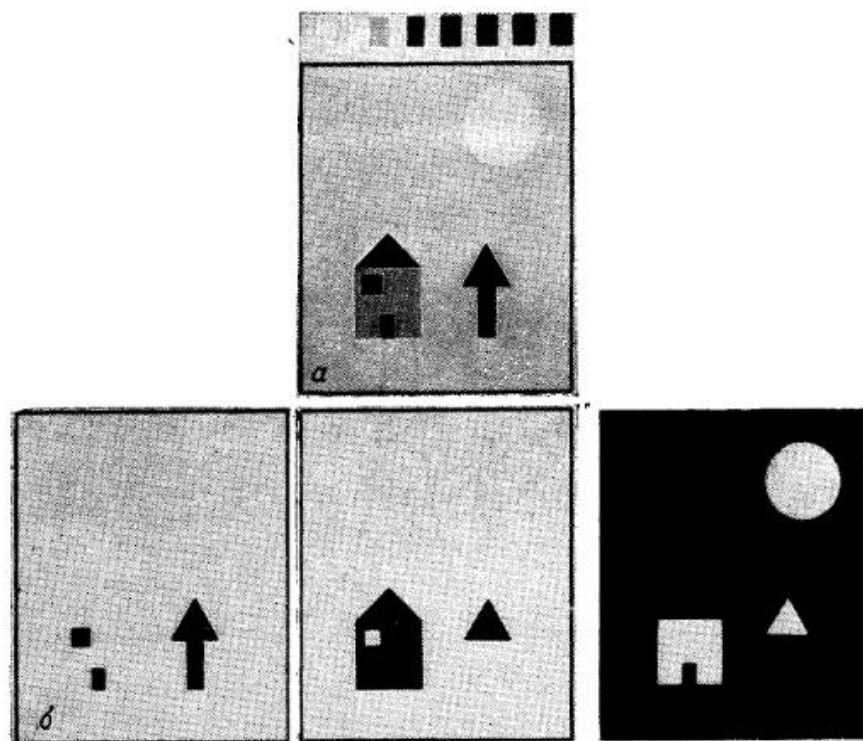


Рис. 21. Оптическое аналого-цифровое преобразование изображения с 8 градациями яркости [5].

Это устройство можно также использовать для вычисления различных характеристик распределения интенсивности исходного изображения. Например, если желательно извлечь квадратный корень из распределения интенсивности входного изображения, то фазовая пластинка записывается так, чтобы фаза Φ была пропорциональна интенсивности. Выбор различных значений фазы Φ осуществляется при формировании выходного изображения путем изменения расстояния между зеркалами. Для любого значения Φ интенсивность падающего пучка оказывается равной квадратному корню из интенсивности оригинала. Таким образом, распределение интенсивности на выходе представляет собой квадратный корень из распределения интенсивности на входе.

В качестве другого примера укажем на возможность осуществления аналого-цифрового преобразования изображения (рис. 21). Первое бинарное изображение восьмиградационного объекта (рис. 21, а) формируется включением света лазера, когда синтези-

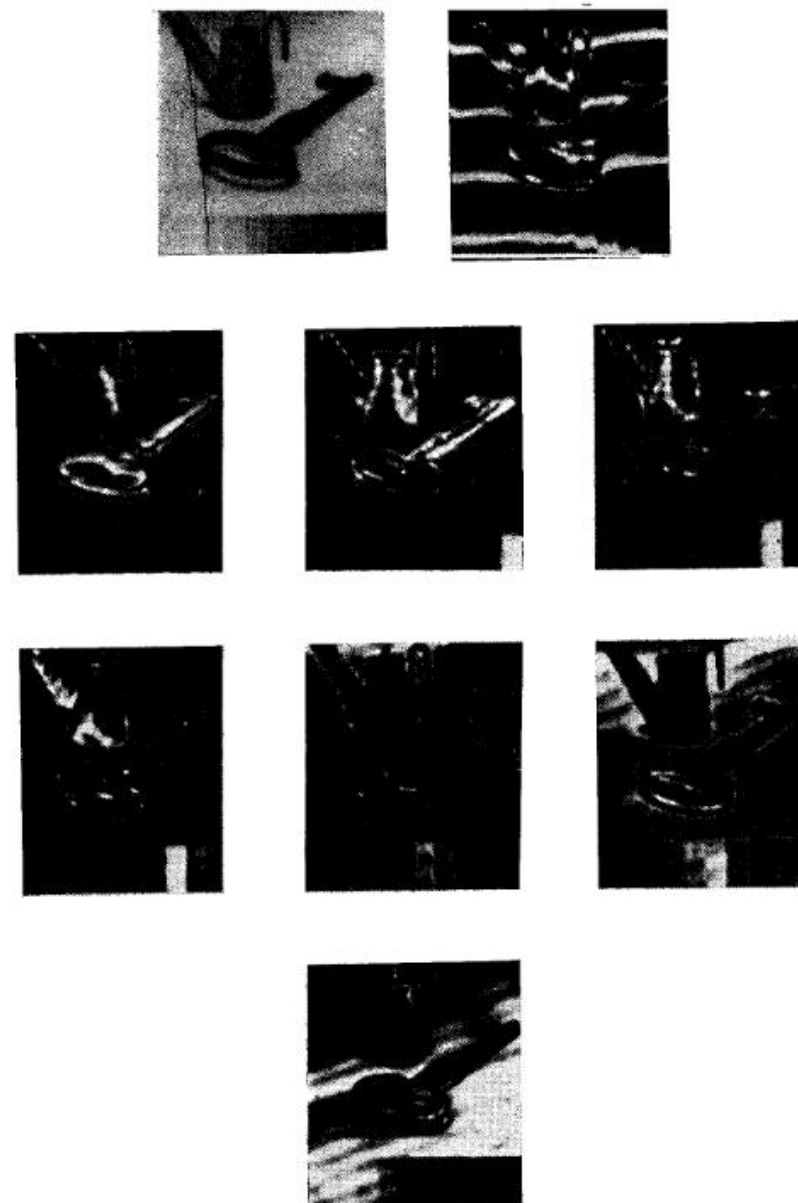


Рис. 22. Селекция уровней интенсивности с помощью отбеленной фотопластины [20]. Наверху слева — исходное изображение; наверху справа — выходное изображение системы с отбеленной фотопластинкой, помещенной между зеркалами. (Зеркала были слегка наклонены, чтобы подчеркнуть фазовый сдвиг, производимый отбеливанием.) Остальные изображения показывают селекцию уровня интенсивности с параллельными зеркалами (уровень выбирался перемещением одного зеркала с помощью пьезоэлектрического устройства).

руются уровни 1, 3, 5 и 7 (левая картинка на рис. 21, б). Следующее бинарное изображение (в середине на рис. 21, б) получают при селекции уровней 2, 3, 6 и 7 и третье (крайнее на рис. 21, б) при уровнях 4, 5, 6 и 7. Таким образом, серый уровень крыши на рис. 21, а, соответствующий уровню 4, преобразуется на каждом из трех изображений рис. 21, б в бинарный код: белый, черный, черный (1 0 0).

Влияние выбора уровня интенсивности, полученное в экспериментах с изображениями на отбеленных высокоразрешающих фотопластинках, демонстрируется на рис. 22. В настоящее время ведутся исследования возможности осуществления других нелинейных операций обработки, а также замены отбеленных фотоматериалов электрооптическими материалами, работающими в реальном времени.

10.6.4. Пространственно-неинвариантная обработка изображений

В разд. 10.6.2 и 10.6.3 рассматривались линейные и нелинейные операции обработки изображений. Большинство этих операций являются пространственно-инвариантными в том смысле, что все точки входного изображения подвергаются одной и той же обработке. В этом разделе мы рассмотрим пространственно-неинвариантные методы обработки, когда разные точки входного изображения подвергаются различным операциям.

Примером пространственно-неинвариантной обработки служит геометрическое преобразование изображения $g_1(x, y)$ в $g_2(p, q)$. С помощью синтезированной на ЭВМ голограммы и оптической системы, схематически показанной на рис. 23, а, Брингдал [8, 9] получил экспериментальные результаты, приведенные на рис. 23, б. Принцип использования синтезированной на ЭВМ голограммы для геометрических преобразований изображений можно понять, рассматривая ее как обобщенный случай пространственной решетки с частотой, изменяющейся в зависимости от координат x, y . Пространственная частота решетки (v_x, v_y) на участке с координатами x, y дифрагирует свет в точку фокальной плоскости линзы с координатами p, q :

$$p = (\lambda f) v_x, \quad q = (\lambda f) v_y; \quad (13)$$

здесь λ — длина волны света, а f — фокусное расстояние линзы. Разумеется, геометрические преобразования можно также выполнить с помощью нелинейного сканирующего устройства, которое записывает изображение на когерентный пространственно-временной модулятор света с памятью [10]. Но этот метод сводит на нет преимущества параллельной обработки, обычно характерные для

оптической обработки, хотя в некоторых случаях его можно вполне применять.

Имеются и другие оптические методы, позволяющие выполнять различные пространственно-неинвариантные операции, например методы голографического мультиплицирования изображений [12] и перемножения матриц [14]. Представление о том, в каком состоянии находится сейчас исследование этих методов, можно получить из замечательной обзорной работы Гудмена [13]. В этой работе приводится также и подробное описание методов. Несмотря на то что интерес к пространственно-неинвариантным методам обработки возник сравнительно недавно, в будущем можно ожидать дальнейшего прогресса ввиду возрастающего внимания к этой проблеме.

10.6.5. Заключительные замечания

Мы попытались проиллюстрировать то, каким образом методы когерентной оптики и голографии позволяют решить различные задачи обработки изображений, причем в нашу задачу не входило дать обзор огромного количества опубликованных работ по рассмотренной проблеме. Некоторые из методов когерентной оптики и голографии основываются на линейной, пространственно-инвариантной обработке, другие — на нелинейной или пространственно-неинвариантной. Естественно, можно использовать комбинации различных методов обработки, чтобы решать более сложные задачи обработки изображений. Например, сочетание линейных методов обработки, описанных в разд. 10.6.2, и методов преобразования координат, о которых упоминалось в разд. 10.6.4, позволяет решать некоторые масштабно-инвариантные проблемы распоз-

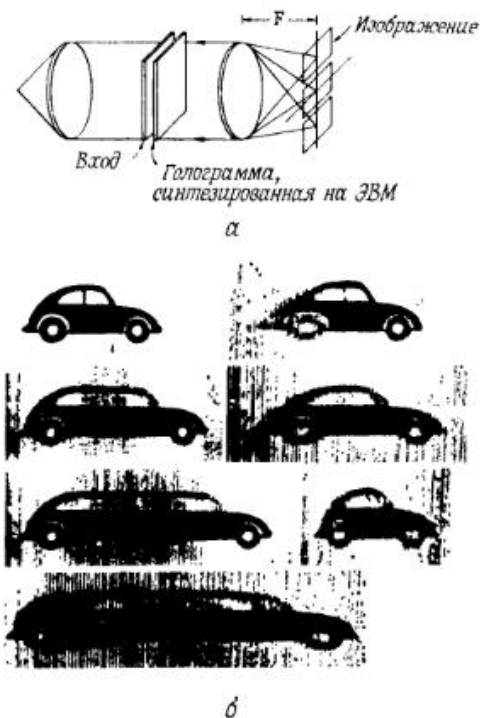


Рис. 23. а — оптический метод координатного преобразования с помощью синтезированной на ЭВМ голограммы; б — экспериментальные результаты, полученные этим методом. (Согласно работе [8].)

навания образов [10], восстанавливать изображения, искаженные определенным видом aberrаций [26], или изображения, размытые вследствие их движения [24].

Помимо оптических методов обработки изображений, существует большое число цифровых методов [2, 15], которые играют теперь важную роль. Вообще говоря, оптические методы имеют преимущества благодаря своей большой емкости и способности обрабатывать изображения с большим числом информационных данных. Со своей стороны, цифровые методы более гибки, способны выполнять большое число различных математических операций. Продолжающийся прогресс в области оптико-цифровых приборов, по всей вероятности, приведет к плодотворной идее гибридной обработки, при которой реализуются преимущества как оптических, так и цифровых методов.

Благодарность

Большой признательности заслуживает Национальный научный фонд, благодаря поддержке которого выполнялась эта работа по оптической обработке изображений. Частичная поддержка была также оказана со стороны Центра научных исследований ВВС и национальной авиации, а также со стороны администрации Центра космических полетов им. Годдарда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aldrich R. E., Krol F. T., Simmons W. A., IEEE Trans. Electron Devices, ED-20, 1015 (1973).
2. Andrews H. C., Computer Techniques in Image Processing, Academic Press, New York, 1970.
3. Ansley D. A., Electro-Optical System Design, July/Aug. 1969, p. 26—34.
4. Armitage J. D., Lohmann A. W., Appl. Opt., 4, 399—403 (1965).
5. Bartholomew B., Ph. D. thesis, Univ. of California, San Diego, 1978.
6. Bromley K., Monahan M. A., Bryant J. F., Thompson B. K., Appl. Opt., 10, 174—181 (1971).
7. Brown B. R., Lohmann A. W., Appl. Opt., 5, 967—969 (1966).
8. Bryngdahl O., Opt. Commun., 10, 164—168 (1974).
9. Bryngdahl O., J. Opt. Soc. Amer., 64, 1092—1099 (1974).
10. Casasent B., Psaltis D., Opt. Eng., 15, 258—261 (1976).
11. Cederquist J., Lee S. H., A Confocal Fabry—Perot for the Solution of Partial Differential Equations, Proc. Electro-Opt. Syst. Design/Intern. Laser Confer., Anaheim, Calif., 1977.
12. Deen L. M., Walkup J. F., Hagler M. O., Appl. Opt., 14, 2438—2446 (1975).
13. Goodman J. W., в кн.: «Optical Information Processing» (ed. S. H. Lee), Topics Vol. in Appl. Phys. Springer—Verlag, New York, 1979.
14. Heinz R. A., Artman J. O., Lee S. H., Appl. Opt., 9, 2161—2168 (1970).
15. Huang T. S., Picture Processing and Digital Filtering, Springer—Verlag, New York, 1975.
16. Iwasa S., Appl. Opt., 15, 1418—1424 (1976).
17. Jablonowski D. P., Lee S. H., Appl. Phys., 8, 51—58 (1975).
18. Kato H., Goodman J. W., Appl. Opt., 14, 1813—1824 (1975).
19. Lee S. H., Yao S. K., Milnes A. G., J. Opt. Soc. Amer., 60, 1037—1041 (1970).
20. Lee S. H., Bartholomew B., Cederquist J., Proc. SPIE, 83, 78—84 (1976).
21. Lohmann A. W., Paris D. P., Appl. Opt., 7, 651—655 (1968).

22. Lohmann A. W., Strand T. C., Proc. Electro-Opt. Syst. Design/Intern. Laser Confer., Anaheim, Calif., 1975, p. 16—21.
23. Lohmann A. W., Paris D. P., Werlich H. W., Appl. Opt., 6, 1139—1140 (1967).
24. Sawchuk A. A., J. Opt. Soc. Amer., 63, 1053—1063 (1973).
25. Sawchuk A. A., Dashiell S. R., Opt. Commun., 15, 66—70 (1975).
26. Sawchuk A. A., Peyrovian, J. Opt. Soc. Amer., 65, 712—715 (1975).
27. Strand T. C., Opt. Commun., 15, 60—65 (1975).
28. Strand T. C., Ph. D. thesis, Univ. of California, San Diego, 1976.
29. Stroke G. W., Opt. Spectra, 31—32, November 1970.
30. Stroke G. W., Hallioua M., 29th Ann. Proc. Electron Microscopy Soc. Amer., 1971.
31. Stroke G. W., Zech R. G., Phys. Lett., 25A, No. 2, 89—90, July 1967.
32. Yao S. K., Lee S. H., J. Opt. Soc. Amer., 61, 474—477 (1971).

10.7. МИКРОСКОПИЯ

М. Кокс

10.7.1. Введение

Микроскопия послужила поводом для изобретения голографии. Габор [4, 5, 6] разработал голографию, пытаясь улучшить разрешение и увеличить глубину поля изображения, создаваемого электронным микроскопом. Его демонстрации голографических эффектов, в которых применялся белый свет, пользовались большим успехом.

За последние годы все больше увеличивается интерес к другим применениям голографии, которые оказались коммерчески более выгодными. Поэтому исследования, связанные с разработкой голографических микроскопов высокого качества и простых в обращении, продвигаются медленно. Однако в любом случае, когда требуется формировать изображения очень больших объемов и при этом с высоким разрешением, полезно проверить, насколько голографический микроскоп приемлем для такого случая.

Обычные микроскопы конструируют так, чтобы они имели большое поперечное увеличение, правда, за счет ограниченной глубины поля. Статический объект можно сканировать по глубине поля, рассматривая последовательно каждый уровень глубины. Но для динамических объектов, особенно таких, положение которых меняется во времени, этот прием не годится. Только голографический микроскоп, использующий лазер с повторяющимся импульсным излучением для регистрации серии последовательных во времени голограмм, может записать всю информацию в объеме динамического объекта. При восстановлении объектные волновые фронты можно подробно исследовать в том месте, в котором происходило интересующее нас событие, или проследить за развитием серии событий.

В этом параграфе мы подробно рассмотрим, как накапливался опыт и совершенствовались методы в голографической микроскопии. Мы проанализируем природу голографического увеличения и изменения масштаба, рассмотрим влияние увеличения изображений и вопросы балансирования аберраций. Мы подробно ознакомимся с методами голографии, использующими микроскопию: с предварительным и последующим увеличением. Обсудим соответствующие уравнения для голографической микроскопии. Основное внимание будет обращено на их пригодность для поиска метода, предпочтительного для данного применения. Мы выделим те конструктивные решения, которые должны быть приняты в конкретных применениях голографической микроскопии. В этом параграфе рассматриваются не красивые теоретические идеи, а схемы, которые найдут практическое применение.

10.7.2. Голографическое увеличение и изменение масштаба

Первоначально голография изобреталась как метод электронной микроскопии, с тем, чтобы формировать изображения объектов, соизмеримых с атомами. Для получения неискаженного изображения с голограммы, записанной электронным пучком, необходимы два условия. Первое из них — это, чтобы радиус кривизны волнового фронта пучка видимого света был пропорционален отношению длины волны света к длине волны электронов. Такое изменение геометрии восстанавливающего пучка по сравнению с геометрией записывающего пучка должно сопровождаться соответствующим увеличением голограммы-оригинала, записанной с помощью электронного пучка.

Изменение масштаба обычно описывается величиной, пропорциональной $\mu = \lambda_2/\lambda_1$, т. е. отношению длины волны восстанавливающего света (λ_2) к длине волны света, используемого при записи голограммы (λ_1). Увеличение голограммы обозначается m и определяется отношением поперечных размеров голограммы после увеличения к поперечным размерам голограммы-оригинала, т. е. $m = x'_2/x_2 = y'_2/y_2$. Если радиусы кривизны записывающего и восстанавливающего волновых фронтов также изменяются, то общее поперечное увеличение мнимого изображения V дается выражением

$$M_{\text{попер. } V} = m \left(1 + \frac{m^2 z_1}{\mu z_c} - \frac{z_1}{z_r} \right)^{-1}, \quad (1a)$$

а общее поперечное увеличение действительного изображения R имеет вид

$$M_{\text{попер. } R} = m \left(1 - \frac{m^2 z_1}{\mu z_c} - \frac{z_1}{z_r} \right)^{-1}. \quad (16)$$

Угловое увеличение, которое связывает кажущийся размер объекта, наблюдаемого через оптический прибор, с его угловым размером

при наблюдении без этого прибора, в любом случае определяется выражением

$$M_{\text{угл}} = \mu/m. \quad (2)$$

Продольное увеличение, часто называемое увеличением по глубине, пропорционально $M_{\text{попер.}}^2$.

Специалисты в области голографической микроскопии редко пользуются изменением масштаба изображения за счет применения различных длин волн для записи голограмм и восстановления изображения. Действительно, в диапазоне длин волн видимого света, применяемого для записи и восстановления, величина μ находится в пределах 0,57—1,75. Даже при использовании когерентного ультрафиолетового лазера для регистрации величина μ остается меньше 10. Ограниченный диапазон изменения величины μ и меры, которые необходимо предпринимать, чтобы избежать аберраций, связанных с применением различных длин волн при записи и восстановлении, приводит к тому, что увеличение изображений таким способом редко используется в голографической микроскопии.

Увеличение голограмм также трудно осуществить. Обычные голограммы имеют пространственные частоты по крайней мере 1000 мм^{-1} . Большинство фотографических увеличителей не способны обеспечить такое разрешение. Следовательно, увеличение голограмм также редко используется.

Таким образом, для большинства применений голографической микроскопии выбирают $\mu = m = 1$, т. е. $M_{\text{угл}} = 1$. Для минимизации аберраций опорная и восстанавливающая волны согласуются между собой по возможности точно. Обычно выбирают плоские волны, делая $z_r = z_c = \infty$ и $M_{\text{попер.}} = 1$. Но как при этом получить увеличенное изображение объекта?

10.7.3. Голографирование изображений, увеличенных микроскопом

Успешные применения голографии в микроскопии привели к созданию широко используемых методов, в которых лучшие качества обычной микроскопии усиливаются голографией. Нокс [8], Мак-Фи [14], Ван Лигтен и Остерберг [17], Томпсон, Уорд и Зински [см. § 10.12 настоящей книги], а также Кокс, Баклис и Уитлоу [1] с целью получения увеличенного изображения применяли голографию в сочетании с микроскопией. Те из свойств стандартной микроскопии, которые наиболее часто используются, обязаны высокому качеству современных оптических устройств. Мы подробно обсудим два вида голографической микроскопии, в которых для формирования изображения с хорошим разрешением и записи большого объема применяют обычный микроскоп.

10.7.3.1. Предварительное увеличение

Предварительное увеличение обычным микроскопом часто применяется в тех случаях, когда требуется получить высокое разрешение в небольшом поле зрения [17]. Объектом для голограммы служит действительное увеличенное изображение объекта (рис. 1).

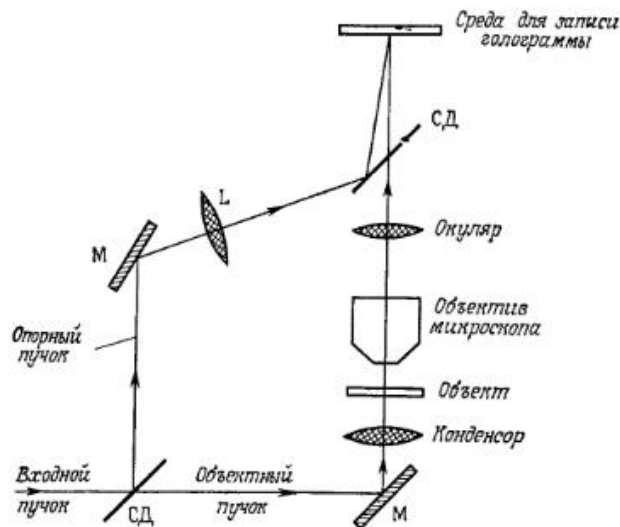


Рис. 1. Схема голографического микроскопа с предварительным увеличением в обычном микроскопе. Угол падения опорного пучка можно менять (для согласования пространственной частоты голограммы с разрешающей способностью пленки). М — зеркало; СД — светоделитель; L — линза.

В этой схеме обычный микроскоп образует увеличенное действительное изображение объекта, которое служит объектом для голограммы. Опорный пучок проходит мимо микроскопа. Опорный пучок представляет собой, как правило, плоскую волну, и угол его падения на фотопленку может изменяться. При восстановлении в зависимости от геометрии схемы можно изучать объектные волновые фронты, сходящиеся в действительное изображение или расходящиеся из мнимого изображения.

В рассматриваемой схеме разрешение фотопленки не играет особой роли, поскольку изображение, формируемое микроскопом, можно достаточно увеличить и тем самым преодолеть любые ограничения, обусловленные разрешением пленки, при условии, что угол падения опорного пучка выбран надлежащим образом. Однако регистрируемый объем объекта ограничивается глубиной поля обычного микроскопа. На голограмме нельзя записать большей глубины или поперечных размеров, чем имеет изображение, фор-

мируемое микроскопом. Для многих применений это не является серьезным недостатком. Такой метод обеспечивает много полезных результатов в тех случаях, когда исследуемый объект представляет собой тонкий образец или разыскиваемое событие лежит в очень узком диапазоне глубин. Голографическая интерферометрия позволяет довольно просто определить положение и характер объекта, изменяющегося во времени. Например, рост кристаллов или полимеров можно детально проанализировать, взяв две последовательные голограммы и восстановив изображения с наложенных друг на друга голограмм.

10.7.3.2 Последующее увеличение

В тех случаях, когда требуется получить высокое разрешение по большому полю зрения, нередко применяют последующее увеличение изображения с помощью обычного микроскопа (рис. 2)

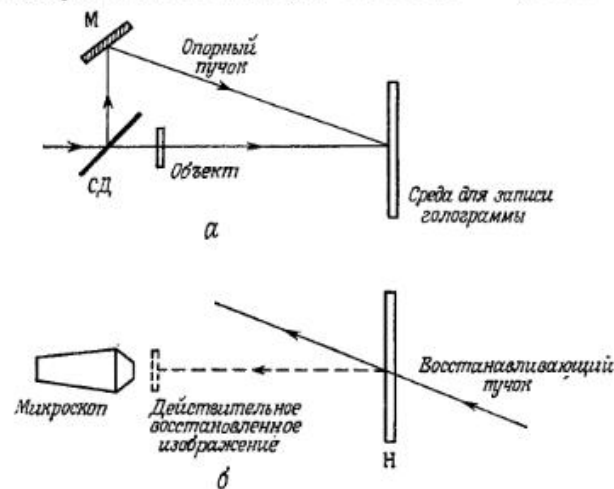


Рис. 2. Применение последующего увеличения с помощью обычного микроскопа. а — схема записи голограммы; б — схема восстановления изображения с голограммы. Угол падения опорного пучка и разница в длинах путей опорного и объектного пучков могут меняться (согласование пространственной частоты голограммы и разрешающей способностью пленки с длиной когерентности лазера). М — зеркало; СД — светоделитель; Н — голограмма.

[8, 13] В этом случае голограмма записывается с плоской волной в ближней или дальней зоне объекта. При восстановлении поле объекта, производящее действительное изображение объекта, можно исследовать с помощью обычного микроскопа.

Когда препятствием при таком способе оказывается разрешение фотопленки, можно провести несколько предварительных увеличе-

ний изображения в промежутке между объектом и голограммой [9, 16]. Такое предварительное увеличение можно получить, применяя высококачественную оптику, если таковая имеется в наличии, но можно использовать и оптику не столь высокого качества. В последнем случае эти же оптические элементы можно переставить таким образом, чтобы при восстановлении изображения компенсировать аберрации [3, 7].

Рассмотренные операции сводят объектное поле к исходным размерам объекта. Этот процесс оказывается наиболее полезным в тех случаях, когда наблюдаемый объект, например тонкие кровеносные сосуды под ногтем пальца, недоступен для работы с обычным микроскопом. Чтобы проверить, как течет кровь по этим сосудам, необходимо иметь большое увеличение, но с помощью обычного микроскопа невозможно заглянуть под ноготь. Однако в микроскоп можно направить объектное поле ногтя пальца. Этот метод обеспечивает большую глубину поля, записываемую голограммой, но часто не обеспечивает максимального разрешения. Его применение полезно в тех случаях, когда изучаемый объект является толстым или рассматриваемое событие находится в слое на большой глубине.

10.7.4. Уравнения голографической микроскопии

Для эффективного применения любого метода, выбираемого нами для получения голограммы микроскопического объекта, необходимо немного ознакомиться с теорией. Необходимо найти общие уравнения для голографии. С особой тщательностью мы должны выбирать среды для записи голограмм, обращая особое внимание на чувствительность, разрешение и обработку материалов. В этом разделе мы подробно изучим уравнения голографии, особенно с точки зрения их применения в голографической микроскопии.

10.7.4.1. Внеосевая голография

Во всех успешных применениях голографии в микроскопии использовался внеосевый опорный пучок с плоским волновым фронтом [10—12]. Применение такой геометрии приводит к минимальным аберрациям [15] и позволяет легко получать восстанавливающую волну, идентичную опорной, независимо от того, исследуется ли действительное или мнимое изображение. Хорошее качество голограммы достигается, если угол между опорным и объектным пучками можно выбрать таким, что пространственная частота интерференционных полос в интерференционной картине намного ниже максимума разрешающей способности фотопленки (рис. 3). Для пленки с максимальной разрешающей способностью 1000 линий на миллиметр расстояние между соседними интерференционными

полосами должно быть больше, чем 1 мкм. Если угол $\Omega_0 = 30^\circ$ (рис. 3), то средний размер объекта, на котором произошла дифракция, равен 1,22 мкм; при этом

$$\sin \Omega_R = \sin \Omega_0 - (\lambda/d). \quad (3)$$

В случае $d = 2$ мкм и $\lambda = 0,5$ мкм = 500 нм, мы имеем $\sin \Omega_R = \sin 30^\circ - (0,5/2)$, $\Omega_R = 14,5^\circ$. В общем случае $0 \leq \Omega_R \leq \Omega_0$.

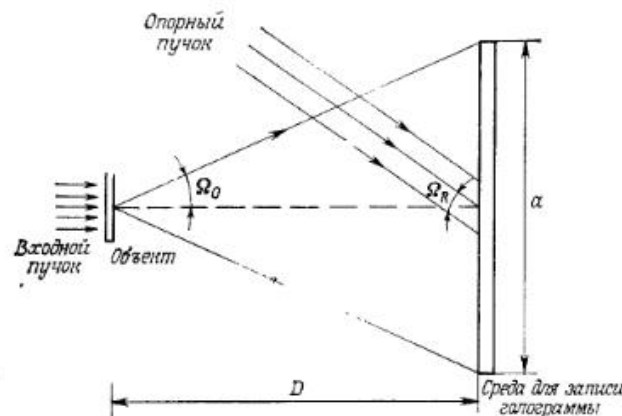


Рис. 3. Геометрия схемы записи внеосевой голограммы. Ω_0 — наибольший угол между полем объекта и нормалью к плоскости пленки.

Выбор угла падения опорного пучка также определяется значением телесного угла, стягиваемого объектом в плоскости голограммы. При восстановлении изображение должно лежать в стороне от опорного пучка. Это требует анализа полного спектра пространственных частот объекта; такое исследование проводится в § 2.4 (см гл. 1 настоящей книги).

Площадь объекта, наблюдаемого через окуляр обычного микроскопа, уменьшается пропорционально третьей степени числовой апертуры ($NA = n \sin \theta$) объектива. Глубина поля уменьшается пропорционально квадрату числовой апертуры NA. Следовательно, наблюдаемый объем объекта определяется выражением

$$V \sim 1/NA^3 \text{ для } NA > 0,20. \quad (4)$$

Удваивая числовую апертуру NA объектива и сохраняя прежний окуляр, мы наблюдаем, что объем объекта уменьшается до $1/8$ первоначальной величины, в то время как минимальный размер разрешаемого объекта уменьшается до половины прежнего значения.

В голографическом микроскопе (с предварительным увеличением или без него) изображаемое объектное пространство оказы-

вается в более сложной зависимости от числовой апертуры. В предположении, что величина угла падения опорного пучка выбирается для всех точек объекта таким образом, чтобы не превышать разрешающую способность регистрирующей среды, все объектные точки размером δ или больше будут изображаться в области объемом V с площадью (круглого) поперечного сечения A и глубиной D , если ширина фотопленки по крайней мере равна

$$W = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi} + \frac{2D NA}{\sqrt{1-NA^2}}}, \quad (5)$$

где

$$NA = \sin \theta = 0,61 \lambda / \delta. \quad (6)$$

При этом мы предполагали, что объект находится в воздухе.

Внеосевые голограммы предъявляют более строгие требования к когерентности освещающего источника света. Общее требование к когерентности записывается в виде следующего условия:

$$\Delta L_H \geq (a/2) \lambda \xi_r + (D/2) \lambda^2 \xi_{\max}^2, \quad (7)$$

где $\xi_r = \sin \Omega_R$ — пространственная частота опорной волны, a — длина пластинки голограммы, D — расстояние между объектом и голограммой, ξ_{\max} — максимальная пространственная частота объектного поля и λ — длина волны используемого света в вакууме. Первый член этого выражения определяет требования к когерентности для большинства применений. Для нашего примера, если расстояние от объекта до голограммы равно 2,0 см, $a = 35$ мм и $\xi_{\max} = 0,82 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$, мы имеем

$$\Delta L_H \geq \frac{35 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{2} (0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}) (\sin 14,5^\circ) + \frac{2 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{2} (0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м})^2 (0,82 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1})^2 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

Длина когерентности импульсных твердотельных лазеров, если только не предприняты специальные меры, обычно весьма мала, поэтому, прежде чем применять эти лазеры, нужно их тщательно подготовить (см. § 8.1 в т. 1 настоящей книги). Более чем достаточную длину когерентности имеет большинство непрерывных лазеров

10.7.4.2. Голограммы Френеля, Фраунгофера и Фурье¹⁾

В большинстве случаев применения голографии в микроскопии голограмма регистрируется в плоскости Фраунгофера, т. е. интерференционная картина формируется в плоскости, где происходит сложение плоских волн, исходящих из различных точек объекта,

Эту плоскость называют дальней зоной объекта. Когда мы имеем дело с объектами микроскопических размеров, «дальняя зона» находится, как правило, в нескольких миллиметрах от объекта. Но в микроскопии встречаются случаи, когда более удобно использовать зону Френеля или плоскость Фурье.

Анализ «ближней зоны» или зоны Френеля должен применяться в тех случаях, когда голограмма формируется в плоскости, где происходит сложение сферических волн, исходящих из различных точек объекта, независимо от того, является ли опорная волна плоской или сферической (см. § 2.2 и 4.1 т. 1 настоящей книги). В микроскопии встречается один специальный случай голограммы Френеля, когда увеличенное изображение объекта оказывается в плоскости фотопленки [2]. Применение голограммы сфокусированного изображения сводит к минимуму требования к пространственной когерентности восстанавливающей волны. Голограммы сфокусированного изображения можно освещать ярким протяженным источником. Однако в плоскостях, не совпадающих с плоскостью изображения, разрешение восстановленного изображения будет ухудшаться. Цветовая дисперсия и размытие приводят к разрушению изображения (см. гл. 6, т. 1 настоящей книги).

На голограммах Фурье записывается интерференция двух волн, распределение комплексных амплитуд которых в плоскости голограммы представляет собой фурье-образы распределений комплексных амплитуд как объекта, так и опорного источника. При этом опорный источник должен находиться в той же плоскости, что и объект. Следовательно, объект должен быть по существу плоским или по крайней мере его толщина должна быть меньше, чем расстояние от объекта до линзы. Линза применяется для того, чтобы получить фурье-образ распределений комплексных амплитуд как объекта, так и опорного точечного источника. Голограмма формируется в задней фокальной плоскости линзы.

Некоторые важные свойства голограмм Фурье используются в микроскопии. Изображение, восстановленное с голограммы Фурье, остается неподвижным при перемещении голограммы. Это позволяет восстанавливать неподвижные изображения с голограмм, записанных на рулонную пленку, в то время как пленка движется. На фотографии восстановленного с голограммы Фурье изображения получаются два действительных изображения, симметричных относительно изображению точечного опорного источника. Голограммы квази-фурье можно формировать без линз, если точечный опорный источник расположен в той же плоскости, что и объект (см. § 4.3, т. 1 настоящей книги).

В конкретных применениях голографической микроскопии могут оказаться полезными и иные схемы получения голограмм (с линзами или без них). Движение объекта в ограниченных пределах

¹⁾ См. гл. 4 (том 1 настоящей книги).

и окружающая обстановка во многом определяют схему записи голограммы. Ниже мы подробно рассмотрим соображения по поводу конструкции голографического микроскопа.

10.7.5. Конструктивные решения

Цель проектирования голографического микроскопа заключается в том, чтобы получить при имеющихся ограничениях восстановленное изображение высшего качества. Большинство голографических микроскопов проектируется «для самих себя». Следовательно, каждый конструктор учитывает применения, для которых он проектирует микроскоп. Важно также знать, кто будет работать на изготовленном приборе. Взаимодействие между конструктором и оператором играет большую роль для достижения целей, поставленных перед конструкцией.

10.7.5.1. Свойства объекта

Наиболее критическим параметром конструкции голографического микроскопа является размер минимально разрешимой микроструктуры макроскопического объекта. Поскольку нельзя разрешить объекты, которые меньше длины волны используемого света, в случае видимого света такими неразрешимыми объектами являются объекты с размерами меньше 1 мкм. Положение и размер кадра пленки определяют минимально разрешаемым размером объекта. А разрешение пленки будет определяться размером объекта и углом падения опорного пучка.

Выбор того или иного источника света определяется тем, движется объект или находится в покое. Для объектов, которые за время экспонирования перемещаются на расстояние, меньшее, чем $\lambda/20$, годится освещение непрерывным светом с механическим прерыванием. Для освещения же быстро движущегося объекта приходится применять импульсный источник света. Максимальная скорость объекта для данной длины волны λ и времени экспонирования Δt оказывается порядка $\lambda/8\Delta t$. Движение объекта может накладываться и другие ограничения, например требование к пиковой мощности вместо энергии светового импульса короткой длительности. Любая фоточувствительная среда характеризуется определенным уровнем экспозиции (энергией на единицу площади), выше которого она обеспечивает хорошее качество голограмм. Так как при освещении коротким импульсом время экспонирования короче, то для достижения той же самой экспозиции мощность импульса должна быть больше (см. гл. 8, т. 1 настоящей книги). Это может потребовать такой большой пиковой мощности излучения, которое, будучи направлено на объект и оптические приборы, приводит к их разрушению, особенно в тех случаях, когда значитель-

ная часть этой мощности поглощается объектом и(или) оптическими приборами.

Местоположение объекта и окружающая его обстановка создают дополнительные проблемы при конструировании голографического микроскопа. Большинство объектов окружает не воздух, и их нельзя закрепить на покровном стекле. Многие объекты находятся в жидкостях, как, например, кристаллы, растущие из расплава. Некоторые объекты находятся в вакуумных камерах или в камерах высокого давления. В тех случаях, когда объект помещен в отдаленное или физически недоступное место, конструктор должен предусмотреть, каким образом объектное поле подвести к плоскости фотопленки с возможно меньшими aberrациями. Может оказаться, что оптические устройства размещаются также не в воздухе. Поэтому необходимо учитывать влияние окружающей среды, особенно если она является турбулентной или рассеивающей значительное количество света.

Необходимо принимать во внимание и местоположение микроструктуры или то, в каком месте протекает интересующее нас событие в макроскопическом объекте. Даже в обычной микроскопии, чтобы получить качественное изображение фиксированного образца, приходится решать целый ряд проблем. Но если случайные объекты и(или) события происходят внутри объема образца, важно, чтобы они записывались на голограмму с целью их последующего исследования. Большой формат кадра пленки, небольшое расстояние от объекта до плоскости пленки и малое предварительное увеличение приводят в результате к регистрации большого объема объекта. Однако изображение, восстановленное с голограммы, должно изучаться в положении, в котором находился объект или(и) происходило событие в момент записи голограммы.

10.7.5.2. Длина волны излучения и когерентность источника

В большинстве голографических микроскопов высокого качества для записи голограмм и восстановления с них изображения используются непрерывные или импульсные лазеры. Специалисты по голографической микроскопии имеют возможность использовать многие лазеры с различными длинами волн и степенями когерентности, но при этом нельзя забывать и об экономической стороне вопроса, поскольку погоня за идеальным источником может дорого обойтись.

В первую очередь мы должны позаботиться о длине волны излучения. Например, для исследования красных кровяных телец нельзя выбирать лазер с одним лишь красным излучением. Надо быть уверенным, что объект не поглощает значительную долю падающего на него света с выбранной длиной волны. Кроме того, длина волны должна соответствовать спектральной чувстви-

ности фотопленки, так как свойства всех фоточувствительных сред зависят от длины волны, особенно экспозиция. Если в голографическом микроскопе применяются какие-либо вспомогательные оптические элементы, следует проследить за тем, чтобы они имели противоотражательное покрытие относительно выбранной длины волны.

Критичны и когерентные свойства источников света. Лучшие голограммы получаются в свете, обладающем высокой степенью как пространственной, так и временной когерентности. Однако высокая степень пространственной когерентности способствует интерференции между объектными полями, исходящими из двух (или более) точек объекта, далеко отстоящих друг от друга. А высокая степень временной когерентности приводит к появлению спеклов.

Импульсные лазеры, если не приняты специальные меры, обладают меньшей пространственной и временной когерентностью, чем большинство непрерывных лазеров. В большинстве голографических микроскопов при формировании объектного и опорного пучков полезно иметь амплитудное деление волнового фронта, при условии что разностью длин путей объектного и опорного пучков от светоделиителя до пленки можно будет управлять, делая ее меньше, чем длина когерентности источника света. Поскольку голограмма должна иметь максимально достижимый контраст интерференционных полос, комплексная степень когерентности должна быть максимальной в отсутствие посторонних источников шума.

10.7.5.3. Методы микроскопии

Предположим, что мы записали голограмму наилучшего качества, обработали ее и с нее восстановили изображение. Рассмотрим теперь, каким образом можно исследовать действительное восстановление изображения с помощью стандартных методов микроскопии. Если линза, применявшаяся в процессе регистрации голограммы, при восстановлении изображения снова помещается на то же самое место, что и при записи, то весь свет, не дифрагировавший на объекте, собирается в фокус (рис. 4). Помещая в фокус линзы непрозрачную заслонку, можно получить освещение по методу темного поля. А помещая в фокус линзы фазосдвигающий элемент, можно получить освещение по методу фазового контраста.

Интерференционная микроскопия может осуществляться несколькими способами. В некоторых случаях две голограммы накладываются друг на друга, и с них одновременно восстанавливаются изображения. Интерференцию, обусловленную изменениями в поле объекта, можно увидеть, если первая из голограмм является голограммой незанятого объектом положения. Интерференционные полосы, обусловленные ростом некоторых объектов,

можно увидеть, если сложить две голограммы, полученные в два различных момента времени.

При определенных очень ограниченных обстоятельствах можно обнаружить ненормальную структуру объекта, если голограмму объекта с нормальной структурой наложить на голограмму объекта с ненормальной структурой. В случае, когда объект относительно медленно движется или движение носит периодический характер, можно применять методы интерферометрии с усреднением по времени (см. § 10.4).

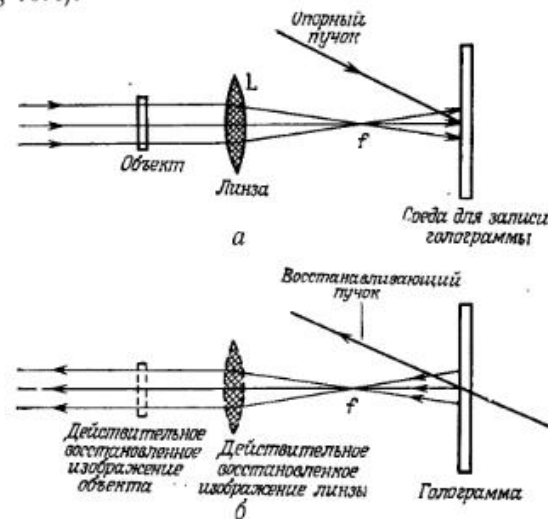


Рис. 4. Схемы записи голограммы (а) и восстановления с нее изображения (б) при необходимости иметь небольшое предварительное увеличение. Если линза возвращается на прежнее место, то действительное изображение восстанавливается без aberrаций. Кроме того, при восстановлении изображения в точку f можно помещать заслонки для получения фазового контраста, темного и светлого поля, или для наблюдения поляризации.

Ни один из перечисленных методов не разрушает и не изменяет исходной голограммы. Следовательно, несколько различных методов можно последовательно применить к одной и той же голограмме. Очень полезно и то, что голограмму для различных случаев можно исследовать разными методами. Голограмму можно записать и вновь использовать не повторяя исходный эксперимент.

10.7.5.4. Заключительные соображения по конструкции

На последнем этапе проектирования голографического микроскопа необходимо решить второстепенные вопросы, связанные с экономической выгодой и стоимостью. После того как принято решение конструировать голографический микроскоп и в проект

введены требования, диктуемые конкретным применением, в проект записываются данные о том, кто и для чего будет использовать голографический микроскоп. С этой точки зрения разработчик и потребитель должны быть тесно связаны.

Необходимо также тщательно рассмотреть вопрос о том, в каком месте лаборатории будет размещаться голографический микроскоп. Затемнение помещения может вызвать небезопасную ситуацию. Поэтому должно быть предусмотрено безопасное размещение и распределение пучков лазерного света, а также источников высокого напряжения с применением блокировки на входе в лабораторию. Кроме того, при наличии летучих химических веществ в лаборатории должна быть обеспечена соответствующая вентиляция.

Для работы с голографическим микроскопом необходим специальный оператор, причем более высокой квалификации, чем оператор, работающий с обычным микроскопом. В проекте необходимо предусмотреть как можно более простое управление голографическим микроскопом. При этом следует настроить установку на получение максимального качества и обеспечить стабильность самого голографического микроскопа. Поскольку голографический микроскоп — прибор, предназначенный для проведения микроскопических исследований, он не должен использоваться не по назначению.

Наконец, остались вопросы стоимости, а именно — во что обойдется конструирование и изготовление, а также эксплуатация установки. По-видимому, установка должна выполняться в виде отдельных взаимозаменяемых и надежных блоков, но не следует особенно увлекаться большим числом блоков. В стоимость эксплуатации установки входит также стоимость потребляемой электрической энергии и обслуживание ее оператором.

10.7.6. Заключение

Голография первоначально предназначалась для улучшения изображений в микроскопии. Однако к настоящему времени голографические микроскопы разработаны еще недостаточно, чтобы их можно было широко применять. Такое неудовлетворительное состояние дел связано с требованиями, касающимися получения высокого разрешения и качества изображения. В будущем более тесное сотрудничество специалистов по оптике с биологами и медиками, по-видимому, приведет к тому, что голографический микроскоп получит общее признание как необходимый оптический прибор. Разработка регистрирующих сред более высокого качества и разнообразных по свойствам, более целесообразный подход к решению задач, которые ставят биология и медицина, — все это позволит сделать голографический микроскоп полезным и широко используемым прибором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cox M. E., Buckles R. G., Whillow D., Appl. Opt., 10, 128 (1971).
2. Cox M. E., Vahala K. J., Appl. Opt., 17, 1455 (1978).
3. Briones R. A., Heflinger L. O., Wuerker R. F., Appl. Opt., 17, 944 (1978).
4. Gabor D., Nature, 161, 777 (1948).
5. Gabor D., Proc. Roy. Soc., A197, 454 (1949).
6. Gabor D., Proc. Roy. Soc., B64, 449 (1951).
7. Heflinger L. O., Stewart G. L., Booth C. R., Appl. Opt., 17, 951 (1978).
8. Knox C., Science, 153, 989 (1966).
9. Kogelnik H., Bell Syst. Tech. J., 44, 2451 (1965).
10. Leith E. N., Upatnieks J., J. Opt. Soc. Amer., 52, 1123 (1962).
11. Leith E. N., Upatnieks J., J. Opt. Soc. Amer., 53, 1377 (1963).
12. Leith E. N., Upatnieks J., J. Opt. Soc. Amer., 54, 1295 (1964).
13. Leith E. N., Upatnieks J., J. Opt. Soc. Amer., 55, 569 (1965).
14. McFee R. H., Appl. Opt., 9, 1834 (1970).
15. Meier R. W., J. Opt. Soc. Amer., 55, 987 (1965).
16. Toth L., Collins S. A., Appl. Phys. Lett., 13, 7 (1968).
17. Van Ligen R. F., Osterberg H., Nature, 211, 282 (1966).

10.8. ГОЛОГРАММНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Д. Клоуз

10.8.1. Введение

Цель данного параграфа заключается в рассмотрении проблемы использования оптических голограмм в качестве линз (или зеркал). Мы попытаемся дать исчерпывающее представление о свойствах таких оптических элементов, о характере работы и о тех трудностях, которые необходимо преодолеть, чтобы голограммные оптические элементы (ГОЭ) нашли практическое применение. В разд. 10.8.2 приводится качественное сравнение изображающих свойств ГОЭ и обычных линз и зеркал. Отсюда непосредственно следует вопрос об оптической эффективности, который мы рассматриваем в разд. 10.8.3. Если имеется желание использовать ГОЭ в оптической системе в любом случае, даже если низки их изображающие свойства и эффективность, то необходимо учесть возможности конструирования и изготовления элементов, рассматриваемые соответственно в разд. 10.8.4 и 10.8.5. В разд. 10.8.6 мы обсудим несколько конкретных примеров применения ГОЭ, чтобы показать, насколько в действительности полезны эти применения.

Оптики всегда представляют себе голограмму как аналог линзы. При такой аналогии записанная на голограмме интерференционная картина образует «внеосевую габоровскую зонную пластинку». Поскольку изображающие свойства зонных пластинок хорошо известны и давно изучены, интерпретация голограммы как суперпозиции зонных пластинок дает непосредственное и четкое понимание изоб-

ражающих свойств голограммы. В таком представлении ГОЭ — это всего лишь голограмма точечного объекта. Голограмма точечного объекта, когда она используется как ГОЭ, может быть «обращена», т. е. освещена совокупностью опорных или восстанавливающих точечных источников, составляющих объект, изображение которого должно быть сформировано с помощью ГОЭ. Совокупность всех восстановленных точек образует изображение, сформированное ГОЭ.

Из этой аналогии ясно, что для охвата какого-либо конечного поля зрения, ГОЭ не могут быть «обращены» непосредственно в той конфигурации, в какой были записаны. Поэтому изображение ГОЭ не бывает свободным от аберраций. Фактически количественное знание аберраций и возможность их минимизации или устранения на этапе расчета ГОЭ и есть главное, что позволяет использовать эти элементы в практических оптических системах.

Другой взгляд в сущность ГОЭ также основывается на интерпретации с помощью зонных пластинок. Для ГОЭ характерно наличие многих дифракционных порядков, причем оптическая сила каждого из них существенно различна. Кроме того, оптическая сила каждого порядка сильно зависит от длины волны, а количество света, дифрагировавшего в любой из порядков, зависит от конкретного способа изготовления зонной пластинки. Таким образом, если нам будут известны количественные данные об эффективности и мы сможем управлять ими, то это будет залогом успешного применения голограммных оптических элементов.

Обозначения, которые мы используем, соответствуют принятым в литературе. В частности, основные сведения по аберрациям можно найти в работе [2]. Латта [6] исследовал количественные характеристики аберраций и выполнил также большую оригинальную работу по определению хода лучей для анализа и конструирования ГОЭ [7]. Анализ голографических элементов, имеющих высокую оптическую эффективность, основан на теории толстых голограмм, развитой Когельником [5]. Многие вопросы достаточно полно освещены в книге Кольера и др. «Оптическая голография» [3].

10.8.2. Изображающие свойства

Наиболее важным является то, что ГОЭ могут иметь практически любую геометрию формирования изображения при любой ориентации и кривизне подложки. Это означает, что направление входящих и выходящих лучей не зависит от кривизны или показателя преломления материала подложки. С другой стороны, ГОЭ можно сконструировать для преобразования любого входного волнового фронта в любой другой выходной фронт независимо от

параметров материала подложки. При конструировании ГОЭ должны *учитываться* характеристики подложки, поскольку работа ГОЭ при других длинах волн, углах падения и т. п. *будет* зависеть от материала подложки. В действительности существует хорошее правило, которое состоит в том, что, чем больше изображающие свойства ГОЭ отличаются от свойств, описываемых законами преломления и отражения, тем значительно будут дисперсия, аберрация и изменения эффективности, когда входная волна отличается от расчетной. Из этого правила следует вывод, что прибегать к использованию ГОЭ необходимо лишь тогда, когда невозможно применить обычные линзы и зеркала. Иными словами, ГОЭ лучше использовать в тех конкретных применениях, в которых имеется необходимость в их специальных характеристиках.

ГОЭ представляет собой единственную преобразующую волновой фронт поверхность, поэтому его угловое увеличение должно быть равным единице. Как и в случае обычных линз и зеркал, чтобы построить телескоп или другой оптический инструмент, необходимо иметь много элементов. Привлекательная идея «создать голограмму» оптического инструмента, функции которого она бы выполняла, просто неосуществима и не соответствует пониманию изображающих свойств ГОЭ. Мы рассматриваем ГОЭ как единственную оптическую поверхность, «передаточная функция» которой зависит от многочисленных параметров, которыми можно управлять на этапе процесса конструирования. В настоящем разделе мы попытаемся дать понятие качественных и количественных характеристик ГОЭ, для того чтобы можно было понять, какие параметры ответственны за различного вида передаточные функции.

ГОЭ можно рассматривать как запись оптической интерференционной картины, такой, что в каждой точке регистрирующего материала поверхность интерференционных полос является зеркальной и отражает входной луч в выходной. Такой подход справедлив только для частной пары сопряженных волн, для которых рассчитывается ГОЭ. Подход полезен тем, что позволяет найти поверхность решетки, которая действительно определяет геометрию формирования изображения голографическими элементами. Эта поверхностная решетка представляет собой геометрическое место точек, в которых пересекаются «зеркальные» интерференционные плоскости с поверхностью материала, на котором записывается голограмма. Чтобы быть точными, это поверхность регистрирующего материала, из которой выходят преобразованные или дифрагированные волны. Поверхностная решетка плоской и объемной голограмм полностью определяет изображающую геометрию, т. е. положение изображения, аберрации, увеличение и т. п., какой бы волновой фронт ни преобразовывался ГОЭ. (К счастью, на *эффективность* ГОЭ, т. е. на амплитуду преобразованного волнового фронта, оказывают влияние другие факторы.)

10.8.2.1. Уравнение решетки

Поскольку изображающая геометрия ГОЭ сравнительно произвольна, то для ее описания удобнее пользоваться векторными обозначениями. Любая точка поверхностной решетки описывается четырьмя лучами. Это входящий луч **C**, выходящий луч **I** и два луча **O** и **R**, которые определяют структуру, или схему, ГОЭ. Направления этих лучей задаются соответствующими единичными векторами. Модель «зеркальных интерференционных полос» особенно подходит для лучей **O** и **R**, формирующих ГОЭ. Объектный и опорный лучи **O** и **R** используются при оптической записи голографических элементов. Рассмотренные четыре единичных вектора и единичный вектор **S**, нормальный к поверхности в рассматриваемой точке, связаны уравнением решетки. Это уравнение можно записать в двух видах, которые удобно использовать на практике, а именно:

$$\mathbf{I} = \mathbf{C} - \mu(\mathbf{R} - \mathbf{O}) + \Gamma \mathbf{S}, \quad \mu = q\lambda_c n_0 / \lambda_0 n_c \quad (1)$$

и

$$(n_c / \lambda_c)(\mathbf{I} - \mathbf{C}) \times \mathbf{S} = (q n_0 / \lambda_0)(\mathbf{O} - \mathbf{R}) \times \mathbf{S}, \quad (2)$$

где Γ — множитель, преобразующий вектор **I** в единичный, q — номер дифракционного порядка, λ_0 и λ_c — длины волн, которые используются при записи и использовании ГОЭ, а n_0 и n_c — соответствующие показатели преломления. Все единичные векторы определяются в объеме регистрирующего материала, они преломляются им и задают направления выходящих лучей.

Для расчета выходных характеристик объемных голограмм необходимо знать параметры объемных решеток. В таких решетках расстояние между интерференционными плоскостями равно

$$\Lambda = \lambda_0 / n_0 |\mathbf{R} - \mathbf{O}|; \quad (3)$$

единичный вектор, нормальный этим плоскостям, запишется в виде

$$\mathbf{N} = (\mathbf{R} - \mathbf{O}) / |\mathbf{R} - \mathbf{O}|. \quad (4)$$

Если в промежутке между записью и применением среда с записью ГОЭ была деформирована, то расстояние между полосами и их ориентация отличаются от значений, даваемых выражением (3) и (4), и они должны быть рассчитаны вновь с учетом деформаций.

Расчет изображения и направления дифрагированных лучей для любой точки ГОЭ выполняется следующим образом. Через систему проводят луч до его входа в ГОЭ. Затем строят картину преломления этого луча в голографическом материале и находят вектор **C**. Из конструкции схемы записи голограммы определяют для той же самой точки лучи **O** и **R**. Используя выражение (1), вычисляют дифрагированный луч **I**, преломляют его на выходе из гологра-

фического материала и находят искомый луч, формирующий изображение. Если параметр Γ комплексный, то выходная волна будет затухающей.

В зависимости от вида ГОЭ расчет направлений дифрагированных лучей может быть более или менее сложным. В случае, когда структура ГОЭ образуется двумя точечными источниками, вычисления оказываются простыми. Однако в большинстве практических случаев при создании ГОЭ для формирования записывающих пучков требуются оптические элементы, и расчет оказывается довольно сложным.

10.8.2.2. Уравнение решетки и вытекающие из него следствия

Из того факта, что работа ГОЭ определяется поверхностной дифракционной решеткой, вытекают следующие четыре основных изображающих свойства. Это сильная зависимость оптической силы от длины волны, значительная дисперсия, отсутствие зависимости дифракционной эффективности от геометрии воспроизведения изображения и двойственность отражающих и пропускающих элементов. Кроме того, в некоторых случаях дифракционная эффективность сильно зависит от длины волны и угла падения света; этот вопрос мы обсудим в разд. 10.8.3.

Значительные изменения оптической силы и дисперсии объясняются тем, что длина восстанавливающей волны λ_c входит в уравнение решетки (1) как линейный коэффициент. Шампань [2] получил уравнение для изменения оптической силы в случае голограммы с эквивалентным фокусным расстоянием f , записанной с помощью двух точечных источников, отстоящих от голограммы на расстояния R_0 и R_R :

$$\frac{1}{f} = \frac{q\lambda_c}{\lambda_0} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_R} \right). \quad (5)$$

Шампань [2] получил также уравнение для дисперсии дифрагированных лучей, выраженной через геометрические параметры схемы записи голограммы. Это уравнение для угла дифрагированных лучей записывается в виде

$$\sin \alpha_1 = \frac{q\lambda_c}{\lambda_0} (\sin \alpha_0 - \sin \alpha_R) + \sin \alpha_c. \quad (6)$$

Весьма интересным и полезным следствием из уравнения решетки является тот факт, что изображающие свойства ГОЭ не зависят от амплитуды изображения. Уравнения (2) и (4) показывают, что направление дифрагированных лучей зависит только от составляющих интерференционных полос, нормальных лучу **N**, т. е. касательных к поверхности среды. Это иллюстрируется на рис. 1,

на котором показаны поперечные сечения трех интерференционных структур с одинаковыми поверхностными составляющими. Поскольку период поверхностной решетки d для этих структур один и тот же, направление дифрагированных лучей для всех трех ГОЭ будет одинаковым, и, следовательно, эти элементы будут иметь

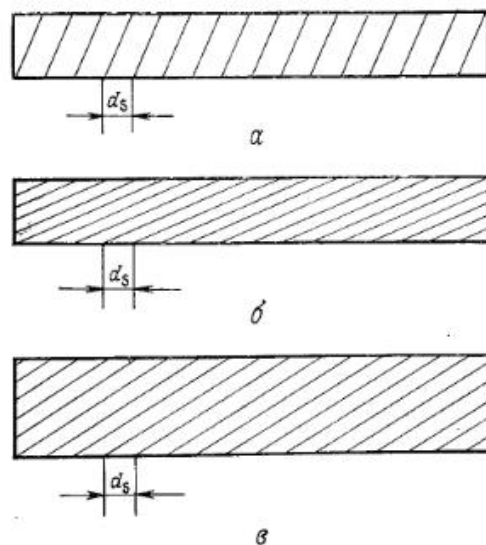


Рис. 1. Поперечные сечения трех голограмм с одинаковыми изображающими свойствами. a — пропускающий элемент; b — отражающий элемент; c — тот же отражающий элемент, но большей толщины.

одинаковые изображающие свойства, т. е. положение изображения, aberrации и т. д. Амплитуда света на выходе, безусловно, будет различной для каждого из рассматриваемых случаев. Это объясняется тем, что амплитуда дифрагированных лучей зависит не только от ориентации в пространстве интерференционных плоскостей, но и от их физической природы (т. е. изменений показателя преломления и т. п.). То, что изображающие свойства не зависят от амплитуды света, приводит к двум следствиям, имеющим практическое значение. Во-первых, имеется возможность рассчитывать геометрию формирования изображения с помощью ГОЭ без учета явлений, связанных с физическим процессом записи. Во-вторых, это позволяет сдвинуть максимум эффективности ГОЭ, изготовленного, например, для длины волны света 0,488 мкм, в область другой длины волны, скажем 0,546 мкм; для этого нужно лишь изменить на соответствующую величину толщину регистрирующего материала. Это иллюстрируется на рис. 1, b и c , откуда мы видим, что увеличение толщины слоя приводит к изменению наклона интерференционных полос и происходит согласование решетки с большей длиной волны. Такой цветовой сдвиг находит применение на практике, хотя при этом возникают довольно специфические условия формирования изображения, и такой прием полезен только для толстых голограмм. Голографические элементы, работающие на отражение, имеют коэффициент расширения, равный отношению длин волн восстанавливающего и записывающего лучей, или 1,119 для приведенного выше примера.

И наконец, дуализм отражательных и пропускающих элементов можно определить следующим образом. Изображающие свойства двух элементов будут одинаковыми, если один из них записан с заданными объектной и опорной волнами, а второй, когда одна из этих волн отражается в материале подложки. Это объясняется тем, что поверхностная дифракционная решетка остается неизменной, когда нормальная составляющая вектора полос меняет знак. Один из элементов будет отражательной голограммой, а второй — пропускающей. Разумеется, амплитуды дифрагированных волн различных порядков будут сильно отличаться, поэтому практически оба элемента трудно сравнивать. Дуализм бывает полезно использовать на этапе конструирования ГОЭ.

10.8.3. Эффективность

Эффективность, т. е. амплитуда дифрагированной волны, определяется физической природой зарегистрированной интерференционной структуры. Поскольку эти вопросы обсуждаются в § 8.3, здесь мы рассмотрим их лишь кратко.

Голографические оптические элементы мы рассматриваем лишь на основе фазовых голограмм, поскольку только фазовые голограммы обладают требуемой высокой дифракционной эффективностью и (или) малыми потерями света. Представляют интерес два типа фазовых голограмм: толстые, или объемные, фазовые голограммы (отражательные и пропускающие) и тонкие, или поверхностные. Объемные голограммы записываются в виде модуляции показателя преломления в толще регистрирующей среды. Поверхностные голограммы регистрируются как поверхностный рельеф материала.

Дифракционная эффективность объемных фазовых ГОЭ наилучшим образом описывается теорией связанных волн, предложенной Когельником [5]. Эффективность может быть высокой как для отражательных, так и для пропускающих элементов. Отражательные элементы характеризуются высоким отражением в узком диапазоне длин волн, причем длина волны, на которой отражение максимально, зависит от угла падения света и изменения толщины регистрирующего материала между записью и использованием элемента. Параметр Q отражательных голограмм приблизительно равен числу интерференционных плоскостей, записанных в толщине регистрирующего материала:

$$Q^{-1} = \Delta\lambda_c / \lambda_c \approx \Lambda / T, \quad (7)$$

где T — толщина материала, а Λ — расстояние между интерференционными полосами. Максимальная эффективность дается вы-

ражением

$$\eta_0 = \text{th}^2 \left(\frac{\pi \Delta n T}{\lambda_c \cos \theta_0} \right), \quad (8)$$

где $2\Delta n$ — двойная амплитуда модуляции показателя преломления.

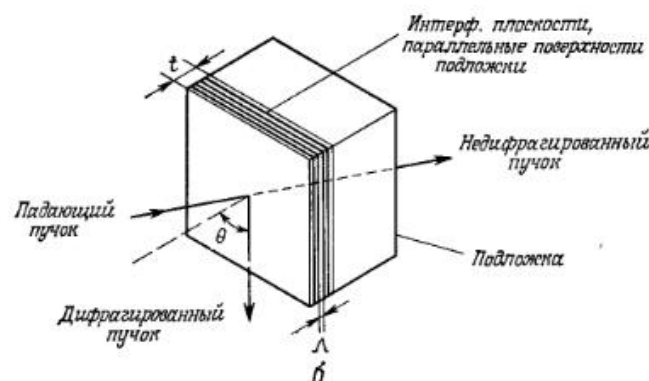
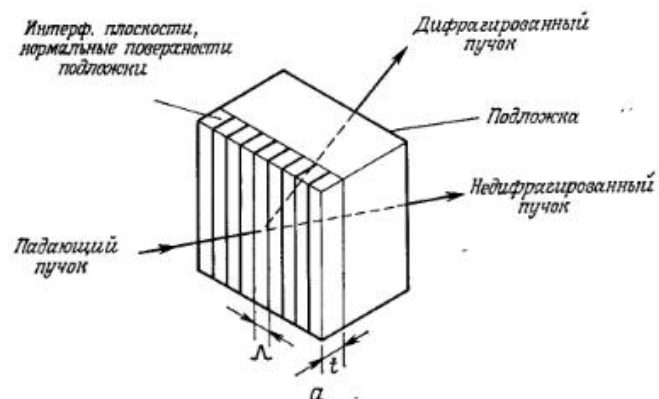


Рис. 2. Идеализированная геометрия толстых голограмм, объясняющая спектральную и угловую зависимости дифракционной эффективности. а — пропускающий элемент; б — отражающий элемент. Λ — расстояние между интерференционными полосами; t — толщина эмульсии.

Пропускающие фазовые голограммы характеризуются узким диапазоном углов, в котором для данной длины волны наблюдается высокая эффективность, и высокой эффективностью для широкого спектра длин волн при некотором угле падения. Угловой параметр Q пропускающего элемента также равен отношению толщины материала к расстоянию между интерференционными полосами: $Q^{-1} = \Delta\theta \approx \Lambda/T$. (9)

Максимальная эффективность пропускающего элемента дается выражением

$$\eta_0 = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n T}{\lambda_c \cos \theta_0} \right), \quad (10)$$

в которое входят те же параметры, что и в выражение для эффективности отражающего элемента. На рис. 2 показаны интерференционные структуры отражающих и пропускающих толстых голограмм.

Дифракционная эффективность голограмм с поверхностным рельефом сильно зависит от формы профиля рельефа и его глубины по сравнению с используемой длиной волны. Чтобы показать это, рассмотрим модель тонкой фазовой решетки, которая вносит в падающую волну фазовую модуляцию с амплитудой 2φ , и вычислим эффективность для некоторых частных случаев. Разложение модулированной волны в ряд Фурье дает значение эффективности для прямоугольного профиля:

$$\eta = 4 \sin^2 \varphi / \pi^2 q^2 \quad (q \text{ — четная величина}) \quad (11)$$

и для синусоидального профиля [3, стр. 223—226] ¹⁾:

$$\eta = J_q^2(\varphi); \quad (12)$$

здесь q — дифракционный порядок, а J_q — функция Бесселя. Из этих выражений максимальная эффективность получается равной 30—40% при $\varphi = \pi$.

Для того чтобы достичь высокой эффективности рельефных голограмм, поверхность делается блестящей и покрывается непрозрачным слоем хорошо отражающего свет металла, такого, как алюминий или золото. В этом случае дифракционную эффективность приходится определять численными методами, решая задачу о граничных значениях. С этой целью были составлены программы вычислений эффективности с помощью ЭВМ, причем полученные таким образом результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [4, 8]. В некоторых случаях рассмотренный тип поверхностной решетки может иметь почти 100% эффективность.

10.8.4. Конструктивные решения

При конструировании системы голографических оптических элементов важную роль играет вопрос о том, в каких случаях их следует применять в конкретной оптической системе. Мы не рекомендуем разработчикам систем использовать ГОЭ в каждой системе. По нашему мнению, ГОЭ следует применять лишь в тех случаях, когда какие-либо существенные характеристики очень трудно или вообще невозможно реализовать с помощью обычных линз и зер-

¹⁾ Здесь указаны страницы в русском переводе книги. — Прим. перев.

кал. В тех случаях, когда случается согласовывать характеристики ГОЭ с практическими потребностями, ГОЭ могут обеспечить элегантное решение проблемы. Мы рассмотрим здесь те характеристики ГОЭ, которые в случае их применения окажутся полезными, а также обсудим и те, польза от которых вызывает сомнение. Обсудим также некоторые общие способы предсказания характеристик ГОЭ и средства, требуемые для детальной разработки системы.

В общем случае ГОЭ следует рассматривать как некий тип элемента, который при необходимости должен использоваться в комбинации с другими элементами. Наш опыт показывает, что лучи, формируемые ГОЭ, следует рассматривать как создаваемые отдельными оптическими системами. Это означает, что ГОЭ представляет собой обычный элемент в трех оптических системах, причем параметры всех этих трех систем должны учитываться при конструировании.

10.8.4.1. Сравнение со стандартными оптическими элементами

Голографические и обычные оптические элементы имеют одно общее важное свойство: любой отдельный элемент может быть изготовлен так, что он будет иметь нулевые или малые аберрации для одной пары сопряженных точек. При этом для других сопряженных точек возникают аберрации. Чтобы избежать аберраций в некоторой протяженной области поля зрения или зрачка, в систему вводят дополнительные элементы. Параметры дополнительных элементов позволяют конструктору уменьшить аберрации системы в целом. В этом смысле задача разработчика состоит в том, чтобы определить, какие элементы и в какое место системы их нужно вставить, чтобы они действительно позволили устранить аберрации.

Голографические оптические элементы с успехом используются как внеосевые криволинейные зеркала или сдвинутые децентрированные линзы. Иными словами, они вносят в систему относительно большие аберрации, как правило астигматизм и кому. Кроме того, применение ГОЭ вызывает большую дисперсию, что приводит к необходимости использовать монохроматический свет или применять другие решительные меры (другие ГОЭ), чтобы получать изображения хорошего качества. Решить эту проблему можно также путем изготовления систем с необычными геометрическими конфигурациями и особыми спектральными характеристиками. В наших исследованиях большой уровень аберраций и значительная дисперсия играли отрицательную роль, но в других случаях, разумеется, они могут представлять интерес, например в спектроскопических исследованиях.

Особое свойство ГОЭ, которое не имеет аналога с обычными оптическими элементами, — это возможность их использования в оп-

тических системах формирования пучков света. Однако любые голографические элементы, предназначенные для этой цели, имеют очень высокую стоимость. Эти элементы обеспечивают дополнительные возможности для управления аберрациями, причем не требуется вводить дополнительных элементов в такие системы.

10.8.4.2. Некоторые полезные характеристики

Укажем теперь на некоторые применения ГОЭ в тех случаях, когда они действительно необходимы. Другие применения, обсуждаемые в данной главе, касаются выполнения произвольных очень точных преобразований волновых фронтов (§ 10.5), изготовления высокодисперсионных решеток с малым рассеянием (§ 10.9) и мультиплицирования изображений (§ 10.11). Теме данного параграфа более соответствуют такие применения ГОЭ, как создание необычных оптических схем (голографическое устройство воспроизведения информации, устанавливаемое на шлеме оператора), изготовление большого оптического элемента с малым весом (голографические приборы ночного видения), создание элементов высокой прозрачности и одновременно высокой отражательной способности в узком диапазоне длин волн (голографический экран для проектора, устанавливаемого на шлеме оператора), осуществление дополнительных оптических функций без введения новых поверхностей (формирование пучков). Эти примеры мы обсудим в разд. 10.8.6.

10.8.4.3. Предварительное проектирование

Конструирование оптических систем чем-то похоже на искусство, поскольку разработчик должен хотя бы приблизительно знать, с чего надо начинать решение задачи. В случае обычной оптики из опыта мы имеем набор исходных положений, которые можно назвать «конструкторскими схемами». Кроме того, по крайней мере для систем с круговой симметрией мы имеем достаточно хорошо разработанную теорию аберраций и можем определить, к каким эффектам приводит перемещение апертурной диафрагмы.

В случае голографических оптических элементов дело обстоит не столь просто. Во-первых, система оказывается более сложной в силу отсутствия симметрии и наличия многочисленных параметров, например в случае элементов в устройствах формирования пучков. Во-вторых, в первую очередь должна учитываться оптическая эффективность, поскольку во многих случаях ею определяются и другие характеристики устройства. В-третьих, мы не накопили еще большого опыта, которым можно было бы руководствоваться при конструировании.

Отметив трудности, укажем теперь на теоретические предположения, которые помогут установить некоторые правила конструирования. Во-первых, это теория аберраций отдельных элементов, например разработанная Шампанем [2]. Поскольку, по всей вероятности, система будет иметь лишь один ГОЭ, эта теория является весьма полезной. Основным недостаток большинства теорий аберраций голограмм заключается в рассмотрении только точечных источников для формирования пучков и плоских подложек. Во-вторых, значительную помощь оказывает простой путь получения некоторых результатов в приближении первого порядка или условий параксиальности. Одним из примеров этого служит теория геометрической оптики, рассмотренная Арсено [1]. Другим примером является аналогия с тонкими линзами, которую заметил Свитт [11], и которая позволяет строить лучи в системе ГОЭ без детального рассмотрения образования пучков. Наконец, имеется ряд общих теоретических результатов, которые позволяют выбрать геометрию ГОЭ. Хорошие примеры имеются в работе, опубликованной Смитом и Уилфордом [9, 12].

10.8.4.4. Построение хода лучей

Конструирование оптических систем с ГОЭ теперь не обходится без вычисления с помощью ЭВМ. Это позволяет быстро получать количественные значения параметров. Такой расчет необходим также на заключительном этапе конструирования, когда решаются задачи оптимизации и расчета допустимых отклонений параметров.

Геометрия оптических систем с ГОЭ такова, что в них целесообразно рассматривать все лучи как косые. Этот подход необходим также для наклонных и децентрированных элементов, которые часто используются в системах с ГОЭ. Основные сведения по построению хода лучей для таких элементов замечательно изложили Спенсер и Мерти в своей работе [10]. Единственная трудность, которая встречается при построении хода лучей в системе с ГОЭ, состоит в вычислении лучей O и R для произвольных точек голографического элемента, когда для образования записывающих лучей используются оптические элементы. В этом случае приходится применять итерации, поскольку невозможно узнать, каким образом следует направить луч, чтобы он попал в желаемую точку на голографическом элементе. Если овладеть соответствующими навыками, то процедура становится совершенно простой. По-видимому, единственной еще возможностью при построении хода лучей является автоматическая оптимизация параметров записывающих лучей ГОЭ в соответствии с критериями, определяемыми характеристиками всей системы.

10.8.5. Изготовление голографических элементов

Процесс изготовления ГОЭ состоит из подготовки установки для экспонирования и собственно записи голограммы на соответствующем регистрирующем материале. Установка для экспонирования обеспечивает необходимую геометрию записи с допустимыми отклонениями. Необходимо следить, чтобы во время экспозиции соблюдалась также интерферометрическая стабильность. Если при изготовлении ГОЭ для образования записывающих лучей используются оптические элементы, то последние должны быть установлены соответствующим образом и отъюстированы. После того как установлена аппаратура, подготовлены подложки и регистрирующий материал, проведено экспонирование и выполнена соответствующая обработка материала, можно считать, что ГОЭ готов. Достижение высокого качества ГОЭ требует чистоты и однородности обработки, что является правилом для большинства оптических производств.

Решающим моментом в производстве ГОЭ является регистрирующий материал. Для наших целей мы нашли только два подходящих материала: бихромированную желатину для объемных фазовых голограмм и обычный фоторезист для поверхностных рельефных голограмм. Хотя мы столкнулись с некоторыми трудностями, связанными с управлением процессом обработки, нам удалось получить хорошие результаты с этими материалами. Поскольку регистрирующие среды рассматриваются в § 8.3, мы их здесь не будем рассматривать.

Оптические системы с ГОЭ имеют сложную геометрию, поэтому их исследование представляет непростую задачу. Это связано с большими аберрациями ГОЭ, которые компенсируются аберрациями других систем. Следовательно, мы получаем элемент, который сам по себе имеет низкое качество, и единственная возможность испытать его заключается в том, чтобы собрать и настроить всю систему. Необходимо, чтобы отдельный элемент компенсировал аберрации ГОЭ хотя бы в одной точке поля зрения. По-видимому, хорошие перспективы для этого имеют голограммы, синтезированные на ЭВМ, которые довольно легко получить с помощью той же самой программы, которая используется для построения хода лучей и позволяет получить оптимальную конструкцию ГОЭ.

10.8.6. Примеры

В этом разделе обсудим кратко четыре примера оптических систем с ГОЭ. Разумеется, эти примеры не являются исчерпывающими, но они демонстрируют конкретные преимущества, которые можно получить, применяя ГОЭ.

10.8.6.1. Необычная геометрия

Эта оптическая система представляет собой устройство, установленное на шлеме оператора, которое формирует изображение экрана катодно-лучевой трубки на бесконечности, не заслоняя поле зрения оператора. Отражательный ГОЭ накладывается на защитное стекло шлема, он повторяет его форму и направляет свет от обычной оптической системы со стороны шлема в глаз оператора. В этой системе главный луч отражается под углом 13° при угле падения 47° по одну сторону от нормали к поверхности. Благодаря оптической силе ГОЭ изображение зрачка системы формируется на зрачке глаза и обеспечивает высокую его яркость. Такую систему нельзя осуществить средствами обычной оптики.

10.8.6.2. Большой элемент с малым весом

В этой оптической системе использовались два отражательных ГОЭ и дополнительный обычный оптический элемент, который изображает выходной экран усилителя света на бесконечность. Такая система устанавливается в прибор ночного видения и позволяет наблюдателю видеть усиленное изображение окружающей обстановки. Элементы являются достаточно большими, чтобы обеспечить расширенное поле зрения и чтобы наблюдатель при этом мог работать в обычных очках. Даже при значительных размерах голографические оптические элементы, расположенные на некотором расстоянии от головы наблюдателя, не создают большого момента силы на голову. В этом случае ГОЭ снова формирует изображение зрачка, а обычный оптический элемент, используемый для изготовления ГОЭ, позволяет компенсировать aberrации сложной оптической системы.

10.8.6.3. Отражательная способность в узкой спектральной полосе

В этой оптической системе ГОЭ используется в комбинации с элементами самолетной системы, предназначенной для воспроизведения информации с датчика, установленного на шлеме пилота. В данном случае используется способность ГОЭ отражать свет в узком спектральном диапазоне. Максимальное отражение достигало 80% при ширине полосы около 20 нм на уровне отражения в 10%. Максимум отражательной способности соответствовал длине волны 543 нм (сильной зеленой линии излучения люминофора Р-43). Эта система обеспечивала воспроизведение информации с достаточной яркостью и без заметного отражения света от внешних объектов, не нарушая их цветовые характеристики. Например, хотя ГОЭ отражал зеленый свет, при рассматривании через отражатель индикатора листья выглядели зелеными, а небо было голубым.

10.8.6.4. Дополнительные функции

В одной из оптических систем ГОЭ в виде поверхностной дифракционной решетки был вытравлен на металлическом покрытии вогнутого зеркала. Дифракционная эффективность составляла $< 1\%$ и решетка обеспечивала образование дополнительного пучка от зеркала. Этот пучок распространялся от зеркала под углом к основному отраженному пучку; оптическая сила ГОЭ, добавленная к оптической силе подложки, обеспечивала фокусировку такого пучка в соответствующей точке. При коррекции aberrаций, связанных с различием в длинах волн при записи и использовании решетки, а также с отклонением дифрагированного пучка, дополнительный пучок ничем не отличался от основного. Чтобы образовать такой пучок средствами обычной оптики, потребовалась бы значительно более сложная система; применение же ГОЭ не потребовало никаких дополнительных приспособлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arsenault H. H., J. Opt. Soc. Amer., 65, 903—908 (1975).
2. Champagne E. B., J. Opt. Soc. Amer., 57, 51—55 (1967).
3. Collier R. J., Burckhardt C. B., Lin L. H., Optical Holography, Academic Press, New York, 1971. [Имеется перевод: Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография.— М.: Мир, 1970.]
4. Kalhor H. A., Neureuther A. R., J. Opt. Soc. Amer., 61, 43—48 (1971).
5. Kogelnik H., Bell Syst. Tech. J., 48, 2909—2947 (1969).
6. Latta J. H., Appl. Opt., 10, 599—608, 609—618 (1971).
7. Latta J. H., Appl. Opt., 10, 2698—2710 (1971).
8. Loewen E. G., Neviere M., Maystre D., Appl. Opt., 16, 2711—2721 (1977).
9. Smith R. W., Opt. Commun., 21, 106—109 (1977); см. также более ранние ссылки.
10. Spencer G. H., Murty M.V.R.K., J. Opt. Soc. Amer., 52, 672—678 (1962).
11. Sweatt W. C., Appl. Opt., 17, 1220—1227 (1978).
12. Wellford W. T., Opt. Commun., 15, 46—49 (1975); см. также более ранние ссылки.

10.9. СПЕКТРОСКОПИЯ

Г. Колфилд

10.9.1. Определение

Я предлагаю определить голографическую спектроскопию в самом широком смысле, а именно как использование явления интерференции двух пучков света, исходящих из одного и того же источника, для регистрации или преобразования его спектра.

10.9.2. Применение интерферометров

Интерферометры, пригодные для голографической спектроскопии, должны формировать два волновых фронта, ориентированных таким образом, чтобы вдоль некоторой плоскости разность фаз между ними изменялась по линейному закону. На рис. 1 показаны две

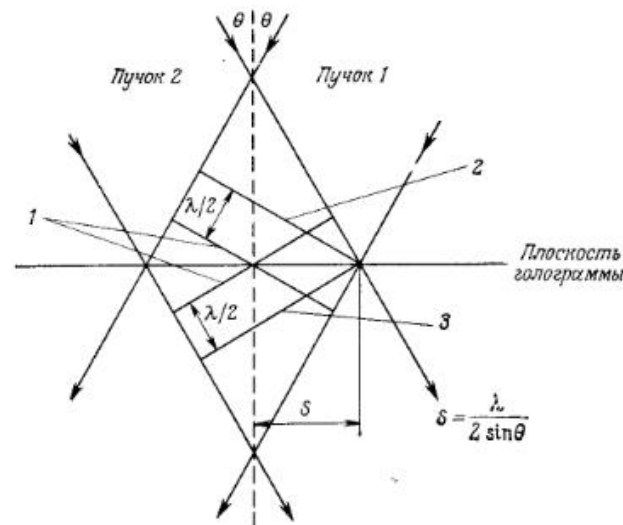


Рис. 1. Две плоские волны, падающие под углом $+\theta$ и $-\theta$ относительно нормали к плоскости голограммы, приобретают задержку, равную $\lambda/2$, на расстоянии S вдоль этой плоскости. 1 — волновые фронты с нулевой относительной задержкой; 2 — запаздывающий волновой фронт пучка 1; 3 — опережающий волновой фронт пучка 2.

плоские волны, распространяющиеся под углами $+\theta$ и $-\theta$ по отношению к оси x . Разность фаз этих фронтов дается выражением

$$\Delta\varphi = (4\pi x \sin \theta) / \lambda, \quad (1)$$

где λ — длина волны, а в точке $x=0$ оба плеча интерферометра имеют равные длины оптических путей. Поскольку в спектроскопии принято пользоваться не длинами волн, а волновыми числами:

$$\sigma = 1/\lambda, \quad (2)$$

выражение (1) можно записать в виде

$$\Delta\varphi = 4\pi\sigma x \sin \theta. \quad (3)$$

На рис. 2 показано, что два точечных источника, лучи которых образуют углы $+\theta$ и $-\theta$ с нормалью к середине линии, соединяющей источники, имеют точно такую же зависимость для раз-

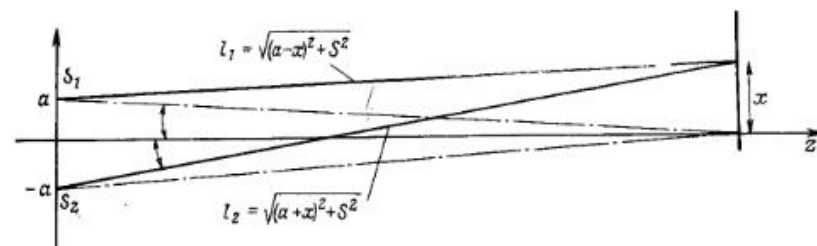


Рис. 2. К расчету интерференционной картины, создаваемой двумя сферическими волнами, излучаемыми источниками S_1 и S_2 ; $\Delta\varphi(x) = 2\pi(l_2 - l_1)\sigma \bmod(2\pi)$.

ности фаз интерферирующих пучков. При расстоянии между источниками $2a$ и расстоянии S от источников до рассматриваемой плоскости (см. обозначения на рис. 2) мы имеем

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= 2\pi(l_2 - l_1)\sigma = 2\pi\left\{\left[(a+x)^2 + S^2\right]^{1/2} - \left[(a-x)^2 + S^2\right]^{1/2}\right\}\sigma \approx \\ &\approx 2\pi S\left\{\left[1 + \left(\frac{a+x}{S}\right)^2\right]^{1/2} - \left[1 + \left(\frac{a-x}{S}\right)^2\right]^{1/2}\right\}\sigma. \end{aligned} \quad (4)$$

В случае $|(a+x)/S|^2 \ll 1$ это выражение принимает вид

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &\approx 2\pi S\left\{\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{a+x}{S}\right)^2\right] - \left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{a-x}{S}\right)^2\right]\right\}\sigma = \\ &= \pi S\left[\frac{(a+x)^2}{S^2} - \frac{(a-x)^2}{S^2}\right]\sigma = \frac{\pi\sigma}{S}[4ax]. \end{aligned} \quad (5)$$

Но поскольку

$$a/S = \tan \theta \approx \sin \theta, \quad (6)$$

мы получаем

$$\Delta\varphi \approx 4\pi\sigma x \sin \theta. \quad (7)$$

В третьем типе устройств не используются ни плоские волны, ни сферические. В этих устройствах (рис. 3) интерферируют волны

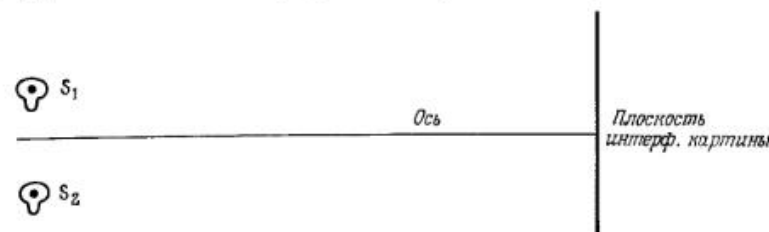


Рис. 3. Схема интерферометра с двумя источниками. S_1 и S_2 — одинаковые источники протяженных размеров.

от двух одинаковых протяженных источников. Все соответствующие точки источников отстоят друг от друга на одну и ту же ве-

личину $2a$ и находятся на примерно одинаковом расстоянии S от плоскости интерференции. Таким образом, каждая пара точек создает фазовую структуру одинаковой периодичности. Но что более

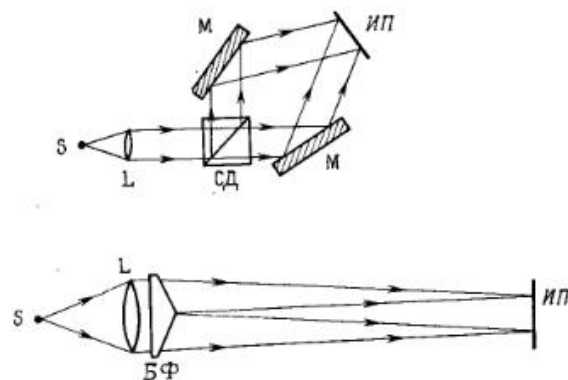


Рис. 4. Схемы двухлучевых интерферометров с плоскими волнами, которые пригодны для работы с точечными источниками. СД — светоделитель; ИП — плоскость интерференции; БФ — бипризма Френеля; L — линза; М — зеркало; S — источник.

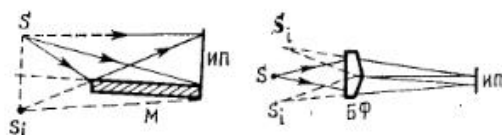


Рис. 5. Схемы двухлучевых интерферометров со сферическими волнами, пригодные для работы с точечными источниками. Здесь те же обозначения, что и на рис. 4. S_i — мнимый источник.

важно, — это то, что интерференционная картина определяется выражением

$$\Delta\varphi = 4\pi\sigma x \sin\theta, \quad (8)$$

где θ — угол, измеряемый от центра яркости источников.

На рис. 4 приведены схемы интерферометров с двумя плоскими волнами, а на рис. 5 — с двумя сферическими волнами. Схемы интерферометров с двумя источниками показаны на рис. 6.

Два волновых фронта можно записать в виде

$$A(\sigma) \exp[i\varphi(\sigma, x)/2] \quad (9a)$$

$$\text{и} \quad A(\sigma) \exp[-i\varphi(\sigma, x)/2]. \quad (9б)$$

Результирующее поле запишется как

$$F(\sigma, x) = A(\sigma) \{ \exp[i\varphi(\sigma, x)/2] + \exp[-i\varphi(\sigma, x)/2] \} = 2A(\sigma) \cos[\varphi(\sigma, x)/2]. \quad (10)$$

Если спектр излучения таков, что амплитуда света с волновыми числами между σ и $\sigma + d\sigma$ равна $S(\sigma)d\sigma$, то пространственное распределение амплитуд дается выражением

$$P(x) = 2 \int_{\sigma=0}^{\infty} S(\sigma) \cos[\varphi(\sigma, x)/2] d\sigma = \int_{\sigma=0}^{\infty} 2S(\sigma) \cos[2\pi\sigma x \sin\theta] d\sigma. \quad (11)$$

Таким образом, распределение амплитуд $P(x)$ является косинус-преобразованием Фурье спектра $S(\sigma)$.

Следует заметить, что мы до сих пор ничего не сказали о пучке в направлении (назовем его y), нормальном плоскости светоделителя. В случае двух плоских волн структура интерференционной картины не зависит от y . Для двух сферических волн интерференционная картина претерпевает некоторое изменение вдоль y , связанное с изменением расстояния S .

В интерферометрах, в которых нет раздвоения источника света, в соответствии с теоремой Ван Циттерта — Цернике источники должны иметь ограниченные размеры. В частности, можно рассчитать разрешающую способность [1]

$$R = \sigma / \Delta\sigma, \quad (12)$$

где σ — волновое число, а $\Delta\sigma$ — спектральное разрешение голограммы. Разрешающая способность и телесный угол источника света Ω связаны соотношением

$$R\Omega \leq 2\pi. \quad (13)$$

Для интерферометров с двойным источником это ограничение не играет роли.

Можно показать [1], что

$$R \approx N, \quad (14)$$

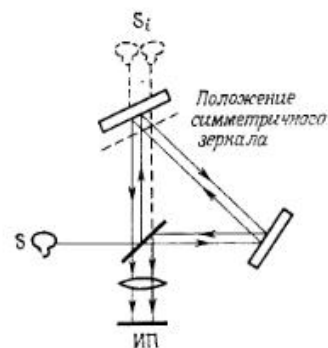
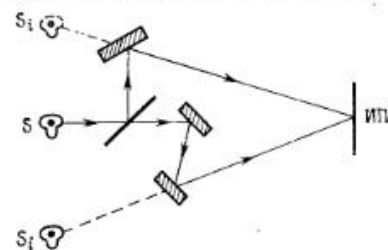


Рис. 6. Схемы интерферометров для работы с протяженными источниками.

где N — число интерференционных полос в используемой части интерференционной картины. Кроме того, в работе [1] я показал, что $\Delta\sigma \approx (\sin \theta)/2L$; (15)

здесь L — физическая длина используемой части интерференционной картины. Заметим, что $\Delta\sigma$ не зависит от σ .

10.9.3. Запись голограммы

Фотография распределения $P(x)$ называется «спектральной голограммой». Амплитудное пропускание голограммы при коэффициенте контрастности фотоматериала $|\gamma|=2$ дается выражением

$$H(x) = [P(x)]^2 = |P(x)|^2 = 2 \left| \int_0^\infty S(\sigma) \cos[2\pi x \sin \theta] d\sigma \right| = \\ = 2 \int_0^\infty S(\sigma) [1 + \cos(4\pi x \sin \theta)] d\sigma. \quad (16)$$

Если $|\gamma| \neq 2$, то при восстановлении информации голограмма может давать паразитные порядки. Подробное рассмотрение этих вопросов можно найти в моей статье [1].

10.9.4. Получение спектра

Спектр содержится в голограмме в закодированном виде. Декодирование, т. е. получение спектра $S(\sigma)$, можно осуществить различными способами. Рассмотрим некоторые из них.

При когерентном оптическом преобразовании Фурье распределения света, прошедшего через голограмму, в начале координат выходной плоскости наблюдается световое пятно с амплитудой

$$S_0 = 2 \int_0^\infty S(\sigma) d\sigma; \quad (17)$$

по обе стороны от начала координат мы имеем спектр $S(\xi)$, в котором

$$\xi = (2\lambda_L f \sin \theta) \sigma; \quad (18)$$

здесь λ_L — длина волны света, а f — фокусное расстояние линзы.

Спектр можно получить также с помощью ЭВМ путем вычисления преобразования Фурье. В тех случаях, когда голограмма записана на фотопленке, для ее обработки требуется применить микроденситометрию, но если она преобразуется в электрический сигнал посредством аналого-цифрового преобразователя с видеоконвертером, либо фотоприемника с зарядовой связью, либо какого-то иного приемни-

ка подобного типа, то применение ЭВМ оказывается весьма целесообразным.

Имеется много способов декодирования информации, записанной в виде спектра. Рассмотрим голограмму, записанную плоскими волнами, распространяющимися под углами $+\theta$ и $-\theta$ по отношению к нормали. Пусть голограмма освещается светом с волновым числом σ_1 под углом θ . Голограмма дифрагирует свет во многих направлениях. Амплитуда света, дифрагированного под углом $-\theta$, пропорциональна $S(\sigma_1)$. Фокусировка и пространственная фильтрация с помощью точечной диафрагмы позволяет сконцентрировать свет в одном этом направлении. Изменяя волновое число σ_1 (например, используя перестраиваемый лазер), получаем спектр $S(\sigma)$.

В других методах для получения спектра голограмму наклоняют на некоторый угол, при этом используется свет с постоянным волновым числом и сохраняется неизменным угол наблюдения [1].

10.9.5. Спектральная фильтрация

Если на спектральной голограмме при углах падения пучков $+\theta$ и $-\theta$ записан спектр $S_H(\sigma)$, то при освещении такой голограммы светом со спектром $S_1(\sigma)$ под углом $+\theta$ свет, дифрагированный в направлении $-\theta$, имеет спектр

$$S_0(\sigma) = S_H(\sigma) S_1(\sigma).$$

Таким образом, голограмма играет роль спектрального фильтра. Поскольку можно изготовить голограмму искусственным путем (синтезированием на ЭВМ), мы можем записать соотношение

$$S_H(\sigma) = S_0(\sigma) / S_S(\sigma),$$

где $S_S(\sigma)$ — спектральная чувствительность детектора, а $S_0(\sigma)$ — спектр некоторого опорного сигнала. Таким образом, детектируемый сигнал

$$D_{0,1} \sim \int_0^\infty S_0(\sigma) S_S(\sigma) d\sigma = \int_0^\infty S_0(\sigma) S_1(\sigma) d\sigma.$$

Отсюда следует, что $D_{0,1}$ представляет собой взаимную корреляцию спектров S_0 и S_1 . Это идеальный случай для задачи распознавания образов.

Автор предложил [2] и другой (значительно лучший) способ спектральной фильтрации, или спектральной корреляции. В этом способе обрабатываются прошедший и дифрагированный пучки. Основная идея схематически иллюстрируется на рис. 7. Один интерферометр образует пространственное распределение $P(x)$, второй точно компенсирует эффект, производимый первым. Таким образом мы

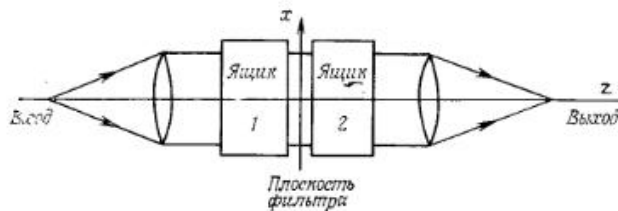


Рис. 7. Схема обобщенной голографической системы, содержащей два интерферометра (или «ящика»), первый из которых служит для получения изменяющейся по пространству временной задержки, а второй — для воссоединения всех лучей с общей нулевой временной задержкой для всей системы. Голограмма в плоскости x действует как спектральный фильтр. Очевидна аналогия с когерентной оптической обработкой изображений.

получаем одинаковые входной и выходной спектры. Однако, как и прежде, транспарант $H(x)$, расположенный в плоскости Фурье, преобразует входной спектр $S_I(\sigma)$ в выходной:

$$S_P(\sigma) = S_I(\sigma) S_H(\sigma).$$

10.9.6. Вопросы применения, основные преимущества и различные модификации

Регистрация спектра методами голографической интерферометрии имеет ряд существенных преимуществ перед другими методами. Наиболее часто упоминаемым преимуществом является скорость регистрации. Фокусируя свет в направлении оси y с помощью цилиндрической линзы и согласуя необходимое разрешение с разрешающей способностью фотоплёнки, можно добиться очень высокой скорости записи непрерывных событий. Последним достижением в скорости записи является $4 \cdot 10^6$ спектров в секунду [4]. В принципе можно записывать спектр непрерывно на быстро движущуюся плёнку [1]. Для импульсных источников время записи равно длительности импульса δt . Разрешение по частоте ограничивается условием $\delta \nu \delta t \geq 1$. Поскольку $\nu = c\sigma$, разрешение в волновых числах $\delta \sigma \geq (c \delta t)^{-1}$.

Другое преимущество связано с минимизацией случайных засветок, подавлением фона (вследствие работы с частью распределения фурье-образа, когда, как известно, фон невелик), высоким разрешением и (при определенных условиях) низкой стоимостью.

В случаях корреляционной обработки и фильтрации эти методы дают важные преимущества. Возможность создания практически любых спектральных характеристик имеет большое значение. Почти уникальной можно считать способность осуществлять многоканальную корреляцию с помощью нескольких фильтров, работающих параллельно в направлении y . Используя два соседних фильтра, спектры можно вычитать.

10.9.7. Некоторые замечания

Спектральные голограммы по свойствам аналогичны дифракционным решеткам. В самом деле, для любого волнового числа спектральные голограммы представляют собой некогерентную сумму голографических решеток.

Спектральные голограммы имеют сходство также с фурье-спектрометрами. Голограммы Фурье осуществляют спектральное преобразование Фурье во времени, а не в пространстве.

Другие спектрометры осуществляют пространственное преобразование Фурье и анализируют спектр путем генерации в этой плоскости соответствующим образом расположенной решетки с последующим детектированием модулированной составляющей света [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Caulfield H. J., Holographic spectroscopy, в кн.: «Advances in Holography» (ed. N. Farhat), Vol. 2, Marcel Dekker, New York, 1976.
2. Caulfield H. J., Opt. Commun., 23, 344 (1977).
3. Esplin R. W., Opt. Eng., 17, 73 (1978).
4. Tsuno T., Takahashi R., High speed photography of spectra, Proc. 9th Inter. Congr. High-Speed Photography, Motion Picture and Television, New York, 1970.

10.10. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОНТУРОВ РЕЛЬЕФА

Дж. Варнер

10.10.1. Введение

В данном параграфе мы кратко опишем три голографических метода получения контурных карт, характеризующих рельеф поверхности. Это двухчастотный метод (метод двух длин волн) [2], метод двух показателей преломления (иммерсионный метод) [2] и метод сандвич-голограмм [1]. Часть материала рассмотрена автором в книге [3], где указывается на преимущество голографических и муаровых методов получения контуров рельефа. Здесь мы не будем делать сравнительных оценок методов, за исключением сандвич-голограмм. Хотя здесь описываются лишь голографические методы, однако это не исключает, что в некоторых применениях неголографические методы могут оказаться более эффективными.

Определим контурную карту рельефа как двумерное изображение трехмерного объекта, представляющее собой совокупность линий пересечения поверхности объекта рядом эквидистантных плоскостей, перпендикулярных линии наблюдения. Мы рассмотрим каждый из

перечисленных методов на конкретных примерах, для которых контурные карты получаются в соответствии с данным определением и в то же время легко интерпретируются. В конце параграфа приведены ссылки на три работы, которые позволят читателю более глубоко ознакомиться с данной проблемой.

10.10.2. Двухдлинноволновый метод

Рассмотрим простое голографическое устройство, схема которого показана на рис. 1. Объект освещается двумя идущими в одном направлении плоскими волнами света с частотами f_1 и f_2 (соответствующие длины волн λ_1 и λ_2), которые можно рассматривать исходящими

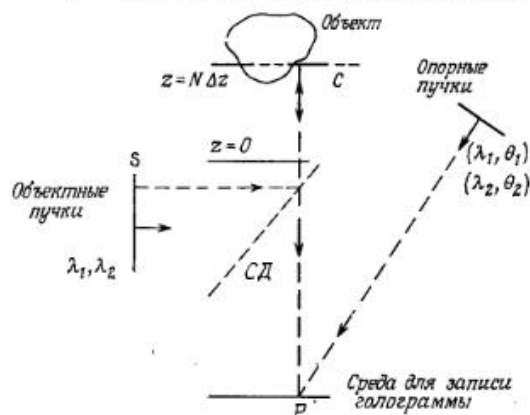


Рис. 1. Геометрия схемы, используемой в двухчастотном методе голографического получения контуров.

из плоскости S; отражаясь от светоделителя CD, эти волны попадают на объект. Рассмотрим некоторую плоскость C, которая перпендикулярна освещающему пучку и проходит через объект. Пересечение плоскости C с поверхностью объекта представляет собой контурную линию, которая записывается на голограмме следующим образом. Два световых пучка (на рисунке показаны штриховыми прямыми) с длинами волн λ_1 и λ_2 проходят абсолютно одинаковые пути от плоскости источника S до точки объекта (также пересекаемой плоскостью C) и затем до регистрирующей среды (хроматическим сдвигом, обусловленным конечной толщиной светоделителя обычно пренебрегают). В точке P регистрирующей среды каждый из объектных пучков интерферирует со своим опорным пучком соответствующей длины волны, и интенсивность двух образующихся интерференционных картин записывается на голограмме.

Для простоты предположим, что существует линейная зависимость между амплитудным пропусканием T регистрирующей среды

и экспозицией E . Таким образом,

$$T = a_0 - a_1 E \quad (1)$$

или

$$T = a_0 - a_1 |U_{01} + U_{02} + U_{r1} + U_{r2}|^2 t, \quad (2)$$

где U_{01} , U_{r1} — амплитуды электрической компоненты светового поля, а t — время экспозиции. В данном случае нас интересует изменяющаяся часть экспозиции E , которая имеет вид

$$E' = \cos(\omega x) + \cos(\omega x + \Delta\varphi), \quad (3)$$

где ω — пространственная несущая частота, а фаза $\Delta\varphi$ содержит информацию о контуре:

$$\Delta\varphi = (2\pi N/\lambda_1)2z - (2\pi N/\lambda_2)2z = 2\pi N 2z (\Delta\lambda/\lambda_1 \lambda_2). \quad (4)$$

Если плоскость C пересекает объект в ряде точек P, для которых $\Delta\varphi = N 2\pi$ (N — любое целое число), то модуляция, обусловленная E' , максимальна. Однако при

$$\Delta\varphi = (2N-1)\pi \quad (5)$$

такая модуляция стремится к нулю. Следовательно, при восстановлении изображения интенсивная дифракция имеет место для первого случая и отсутствует для второго. Чувствительность метода (или

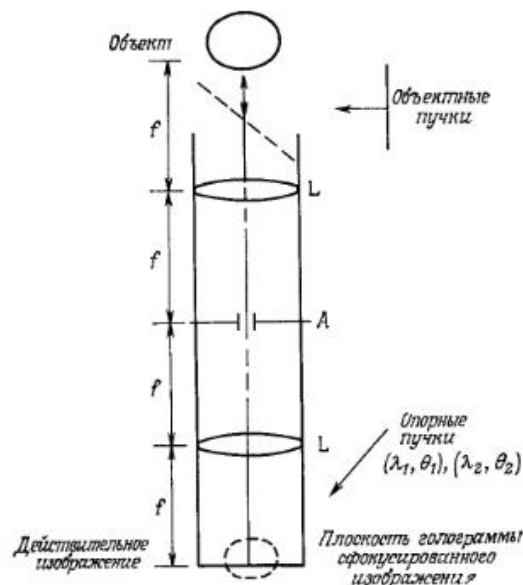


Рис. 2. Использование телескопической системы для голографического получения контурных карт.

цена одной контурной полосы, т. е. расстояние между светлыми контурными линиями) определяется выражением

$$\Delta z = \lambda_1 \lambda_2 / 2n\Delta\lambda. \quad (6)$$

В случае, когда $\Delta\lambda$ мало, а $n=1$, мы имеем $\Delta z = \lambda^2 / 2\Delta\lambda$.

Проведенное выше рассмотрение позволяет понять, как с помощью двухчастотной голографии получают информацию о контурах рельефа. Теперь исследуем метод, который, по моему мнению, является более полезным (рис. 2). В этом случае голограмма Н записывается действительное изображение O' объекта O , формируемое телескопической системой линз L . Использование телескопа для записи голограммы сфокусированного изображения объекта минимизирует хроматическую декорреляцию изображений на этапе восстановления. Во всех трех голографических системах для записи контурных карт рельефа поверхности можно использовать телецентрическую систему визуализации с некоторыми несущественными изменениями.

Апертура A телескопа играет важную роль в формировании контурной карты. Поскольку апертура A находится на оптической оси телескопа, через нее проходят лишь параксиальные лучи света, отраженного от объекта. Только свет, который идет точно по оси системы, дает однозначную информацию о контурах в виде высококонтрастных интерференционных полос. Однако при слишком малой апертуре A изображение оказывается размытым и пораженным спеклами; при этом контурные линии и детали изображения становятся плохо различимыми. Таким образом, контраст контурных линий можно увеличить лишь за счет четкости изображения (подробно рассматривается этот вопрос в диссертации автора [2]).

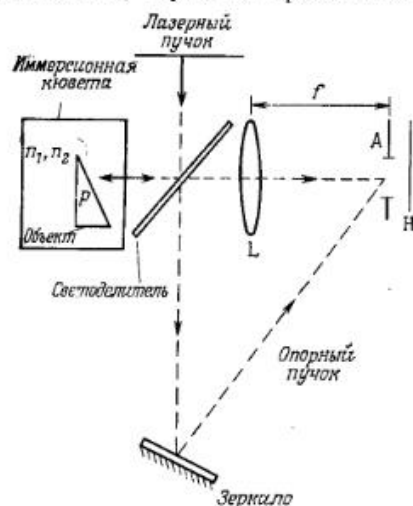


Рис. 3. Схематическое представление голографического метода получения контуров с использованием иммерсионной кюветы с двумя различными показателями преломления.

для получения контурных карт рельефа. Объект помещается в иммерсионную кювету, которая наполнена прозрачным веществом с показателем преломления n_1 . Объект освещается коллимированным пучком когерентного света с помощью светоделителя через прозрач-

ную стенку кюветы. Как и в предыдущем случае, для формирования и фильтрации светового потока, достигающего плоскости регистрации голограммы, используется телескопическая система. Первую голограмму записывают с помощью опорного пучка, формируемого, как показано на рис. 3 (или любым другим удобным способом). Затем вещество в иммерсионной кювете заменяют другим с показателем преломления n_2 (при этом каких-либо иных изменений в схеме не делается) и экспонируют вторую голограмму.

Когда показатель преломления вместо n_1 становится равным n_2 для точки объекта P , записываемая фаза меняется на величину

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda) |n_2 - n_1| 2z, \quad (7)$$

где z — расстояние от стенки кюветы до точки P . Если $z = N \Delta z$ приводит к изменению фазы φ на $N2\pi$, то можно определить семейство плоскостей, секущих исследуемую поверхность, с расстоянием между ними

$$\Delta z = \lambda/2 |n_2 - n_1|. \quad (8)$$

Но поскольку $\lambda/n_1 = \lambda_1$ и $\lambda/n_2 = \lambda_2$, то

$$\Delta z = \lambda_1 \lambda_2 / 2 |\lambda_2 - \lambda_1|, \quad (9)$$

т. е. мы получаем тот же самый результат, что и в двухдлинноволновом методе. Как и в последнем, здесь также необходима телескопическая система. Более того, наилучшие результаты получаются при нахождении объекта вблизи прозрачной стенки кюветы, что в двухдлинноволновом случае соответствует расположению голограммы в плоскости изображения телескопа.

10.10.4. Метод сэндвич-голограмм

Абрамсон [1] для изготовления контурных карт использовал сэндвич-голограммы в соответствии со схемой, показанной на рис. 4. Метод по существу сводится к модуляции одной системы интерференционных полос другой. Абрамсон рассматривает одну систему полос как полосы освещения, а вторую — как полосы наблюдения. Согласно Абрамсону, голограмма H_1 записывается с помощью пучка P_1 . Затем эта голограмма удаляется и записывается вторая голограмма H_2 , расположенная на несколько другом расстоянии от объекта, с помощью пучка P_2 . Помещая голограммы H_1 и H_2 точно в

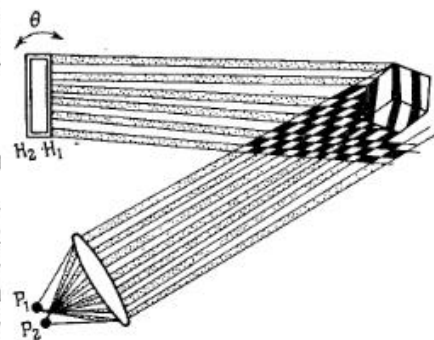


Рис. 4. Получение контуров методом сэндвич-голограмм.

их первоначальные положения, мы видим объект как бы освещенным одновременно двумя пучками P_1 и P_2 , в результате чего образуются полосы освещения. Из двух голограмм H_1 и H_2 любым способом создается жесткая конструкция. Когда такая конструкция из голограмм поворачивается на угол θ , два волновых фронта от изображения сдвигаются относительно друг друга и образуют систему полос наблюдения.

В тех местах, где эти две системы полос перекрываются, они модулируют друг друга, как показано на рис. 4. Любая точка на объекте, которая до поворота голограмм была светлой (темной), после их поворота становится темной (светлой), если ее перекрывает темная (светлая) полоса наблюдения. Точки, пересекаемые яркими полосами наблюдения, сохраняют после поворота свою первоначальную относительную яркость, поскольку яркая полоса указывает на фазовый сдвиг, кратный целому числу, умноженному на 2π . Результатом такой взаимной модуляции является система контурных полос, показанных на рис. 4 черными ромбами.

Расстояние между соседними яркими линиями дается выражением

$$y = 2xd/(d^2 + x^2 - 2xd \cos B)^{1/2}, \quad (10)$$

где x и d — расстояния между яркими и темными полосами наблюдения и освещения соответственно, а B — угол между освещающим пучком и линией наблюдения. В своей работе Абрамсон показал, как следует изменить систему, чтобы можно было получать контуры в плоских сечениях. К этим изменениям относится использование освещения плоскими волнами и приближения к телескопическим условиям наблюдения.

Контурные карты рельефа, полученные Абрамсоном [1] методом сандвич-голограмм, характеризуются замечательной видностью, а процедура их получения более гибка (по мнению автора), чем в любом другом голографическом методе. Манипулируя голограммами, можно поворачивать контурные плоскости в широком угле, что, очевидно, не легко осуществить другими голографическими методами. Как утверждает Абрамсон, это позволяет быстро установить направление наклона, к голограмме или от нее, и совместить контурные плоскости с некоторой опорной поверхностью.

Угол между линией наблюдения и плоскостями контуров дается выражением

$$\epsilon = \arcsin [x \sin B / (d^2 + x^2 - 2dx \cos B)^{1/2}]. \quad (11)$$

Обычно этот угол составляет 90° , что дает

$$y = d/\sin B, \quad x = d/\cos B, \quad B = \pi/2. \quad (12)$$

Абрамсон ссылается на проблему декорреляции, которая имеет место при повороте пары голограмм. В тех случаях, когда объект,

контурную карту которого надо получить, является диффузным, в спектре отраженной волновой картины будут преобладать высокие пространственные частоты, т. е. длина корреляции будет небольшой. Таким образом, возрастающий при повороте сдвиг приводит к быстрому падению контраста наблюдаемых полос. Относительно большой поворот необходим для получения цены одной контурной полосы порядка 10 мкм. В тех случаях, когда необходим поворот сандвич-голограммы на большой угол, чтобы получить угол ϵ , равный $\pi/2$, контраст контурных полос может оказаться слишком малым, чтобы быть приемлемым для практического применения.

Мы здесь не проводим какого-либо сравнения этого метода с неголографическими. Заметим лишь, что в общем случае голографические методы требуют более дорогого оборудования и более сложной обработки, чем неголографические; в этом отношении метод сандвич-голограмм оказался наиболее сложным. Однако то, что данный метод является легкоуправляемым, компенсирует его излишнюю сложность. Более четкое представление об этом методе и конкретные примеры можно найти в специальной литературе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abramson N., Appl. Opt., 15, 200 (1976).
2. Varner J. R., Multiple-Frequency Holographic Contouring, Ph. D. Dissertation, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1971.
3. Varner J. R., в кн.: «Holographic Nondestructive Testing» (ed. R. Erf.), Academic Press, New York, 1974, p. 105—107.

10.11. МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Г Колфилд

10.11.1. Введение

По многим причинам желательно уметь преобразовывать отдельное изображение в большое число идентичных изображений, и существует большое число методов, позволяющих это сделать. Мы перечислим четыре основных типа систем мультиплицирования изображений:

- 1) шаговые фотокамеры с последовательным экспонированием,
- 2) некогерентные оптические,
- 3) когерентные неголографические и
- 4) когерентные голографические системы.

Хотя темой настоящего параграфа является рассмотрение последней системы, мы дадим краткий обзор других, более ранних способов, поскольку они позволяют установить критерии для оценки успехов, достигнутых в мультиплицировании изображений.

На сегодняшний день лучшим прибором для систем мультиплицирования является шаговая фотокамера с последовательным экспонированием. Она очень проста и не формирует сразу множество изображений, а создает последовательно одно изображение за другим, причем их местоположением можно управлять. Преимущества такого прибора заключаются в доступности, легкости программирования, идентичности качества каждого изображения и разнообразии вариантов (они могут производить контактные отпечатки или

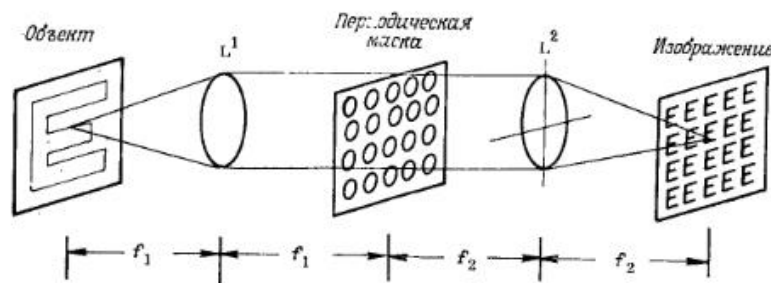


Рис. 1. Падающий на периодическую маску свет от некогерентно излучающего объекта образует в плоскости изображения множество изображений этого объекта.

проекционные снимки). Основной их недостаток — низкая скорость. Чтобы записать N изображений, необходимо в N раз больше времени, чем требуется для записи одного изображения. Отсюда очевидно стремление к мультиплицированию изображений. Основная цель ясна: нужно послать одно изображение в «черный ящик» и получить на выходе матрицу идентичных изображений.

На рис. 1 приведена схема, иллюстрирующая основную идею некогерентных методов мультиплицирования изображений. При точечном освещающем источнике в выходной плоскости формируется изображение периодической маски (ПМ). Если освещающим источником является входное изображение, то на выходе наблюдается множество копий входного изображения — по одному изображению для каждой точки периодической маски. Читатель понимает, что слово «некогерентный» в действительности вводит в заблуждение, поскольку метод требует пространственной когерентности света на периодической маске. Этот метод подробно обсуждается Томпсон [6].

Строго когерентный вариант такой системы рассматривал Томпсон [5], а позднее (в несколько другом виде) Калестинский [3]. Периодическая структура осуществляет выборку дифракционной картины Фраунгофера входного изображения, так что выходное изображение представляет собой свертку входного изображения с периодической функцией.

Этим двум методам присущи два основных недостатка. Во-первых, в выходном изображении имеет место конкуренция между яркостью и разрешением. Чтобы получить хорошее разрешение, маска должна иметь очень маленькие отверстия, а чтобы иметь хорошее пропускание, отверстия должны быть большие. Во-вторых, очень трудно получить N изображений с одинаковой яркостью. Эти проблемы голографического мультиплицирования изображений требуют своего решения.

10.11.2. Некоторые проблемы, рассмотренные в других разделах

Метод голографического мультиплицирования изображений, предложенный независимо Лю [4] и Гро [1], предлагает создание специального голограммного оптического элемента. Оптические элементы и их аберрации обсуждаются в § 2.4 и в разд. 10.11.7, поэтому здесь мы только заостряем внимание читателя на этих вопросах. Кроме того, качество изображений в большой степени зависит от условий восстановления (разд. 10.11.6). И наконец, серьезную проблему, которая характерна для всех когерентных изображений, представляют спеклы (см. § 9.2).

10.11.3. Мультиплицирование изображений с помощью голограмм Фурье

Пусть на входе системы имеем изображение с амплитудным пропусканием $f(x, y)$. Обозначим его фурье-образ через $F(u, v)$. Изготовим голограмму с пропусканием

$$H(u, v) = \sum_{m, n} \exp[-2\pi i (nx_0 u + my_0 v)],$$

где n и m — целые числа. Волновой фронт непосредственно за голограммой можно записать в виде

$$W(u, v) = F(u, v)H(u, v).$$

Оптическое преобразование Фурье этого распределения создает изображение

$$w(x, y) = f(x, y) * \sum_{m, n} \delta(x - nx_0, y - my_0) = \sum_{m, n} f(x - nx_0, y - my_0).$$

В действительности, конечно, мы получаем изображение $w(-x, -y)$, но в большинстве случаев это не имеет значения, и можно ввести коррективы, представив входное изображение в виде $f(-x, -y)$, а не в виде $f(x, y)$. Такой метод мультиплицирования рассматривал Лю [4]. На рис. 2 приведено схематическое представление этого метода.

Исследуем вопрос о том, как записать голограмму, необходимую для реализации данного метода. Голограмма восстанавливает плоские волны, распространяющиеся в нескольких направлениях (по числу N мультиплицируемых изображений). Единственная возможность получить соотношение интенсивностей объектного и опорного пучков $K=1$ по всей площади голограммы — это использование плоских волн; при этом достигается наивысшая возможная

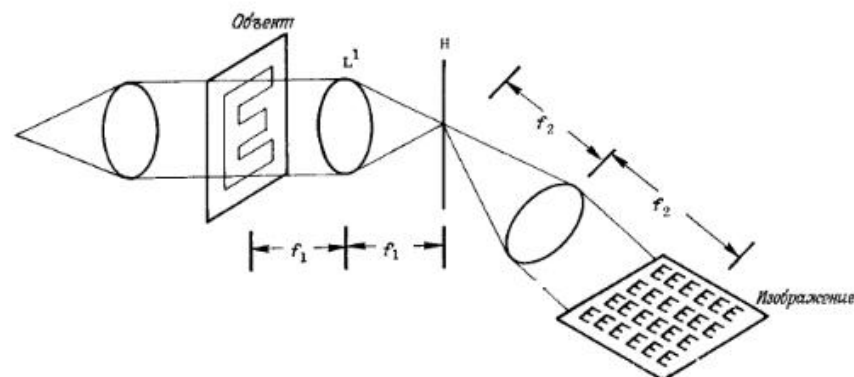


Рис. 2. Падающий на специальную голограмму H свет от когерентно излучающего объекта (O) формирует множество изображений этого объекта.

дифракционная эффективность. Более того, в этом случае каждая плоская волна освещает всю апертуру голограммы равномерно и однородными оказываются восстановленные волны. Остаются три основные проблемы:

1. Как избежать перекрестных искажений?
2. Как достичь максимальной дифракционной эффективности?
3. Как получить одну и ту же дифракционную эффективность для всех плоских волн?

Явление перекрестных искажений связано с нелинейной записью (см. § 8.3), при которой свет, вместо того чтобы попасть в точку с координатами (nx_0, ny_0) , попадает в другие положения. В случае строго периодического мультиплицирования, который рассматривается только из соображений простоты, свет будет наблюдаться в точках с координатами $(n'x_0, m'y_0)$. Для иллюстрации представим, что мы хотим записать голограмму N объектных волновых фронтов O_1, O_2, \dots, O_N с одной опорной волной R . При этом экспозиция будет пропорциональна

$$E = |O_1 + O_2 + \dots + O_N + R|^2 = \\ = |O_1|^2 + |O_2|^2 + \dots + |O_N|^2 + R^2 + RO_1^* + RO_2^* + \dots + RO_N^* + \\ + R^*O_1 + R^*O_2 + \dots + R^*O_N + CT,$$

где CT — перекрестная информация:

$$CT = \dots + O_1^*O_2 + O_1^*O_3 + \dots + O_1^*O_N + \\ + O_2^*O_1 + \dots + O_2^*O_3 + \dots + O_2^*O_N + \\ + O_3^*O_1 + O_3^*O_2 + \dots + \dots + O_3^*O_N + \\ \vdots \\ + O_N^*O_1 + O_N^*O_2 + O_N^*O_3 + \dots + \dots$$

В конкретном случае одномерной структуры, т. е.

$$O_1 = \exp[-2\pi i(x_0u)],$$

$$O_2 = \exp[-2\pi i(2x_0u)],$$

$$\dots \\ O_N = \exp[-2\pi i(Nx_0u)],$$

имеем

$$CT = \dots + \exp[-2\pi i(x_0u)] + \exp[-2\pi i(2x_0u)] + \dots + \\ + \exp\{-2\pi i[(N-1)x_0u]\} + \exp[2\pi i(x_0u)] + \dots + \\ + \exp[-2\pi i(x_0u)] + \dots + \exp\{-2\pi i[(N-2)x_0u]\} + \\ + \exp[2\pi i(2x_0u)] + \exp[2\pi i(x_0u)] + \dots + \dots + \\ + \exp\{-2\pi i[(N-3)x_0u]\} + \\ \vdots \\ + \exp\{2\pi i[(N-1)x_0u]\} + \exp\{2\pi i[(N-2)x_0u]\} + \\ + \exp\{2\pi i[(N-3)x_0u]\} + \dots$$

Группируя члены, получаем по одному члену $\exp[2\pi i(N-1)x_0u]$ и $\exp[-2\pi i(N-1)x_0u]$, по два $\exp[2\pi i(N-2)x_0u]$ и $\exp[-2\pi i(N-2)x_0u]$, \dots и по $N-1$ членов $\exp[2\pi ix_0u]$ и $\exp[-2\pi ix_0u]$. Освещая такую голограмму волной света R^* , можно записать следующие члены: $(R^*)^2O_1 + (R^*)^2O_2 + \dots + (R^*)^2O_N$, а также $R^*\exp[2\pi i(N-1)x_0u] + R^*\exp[-2\pi i(N-1)x_0u] + 2R^*\exp[2\pi i(N-2)x_0u] + 2R^*\exp[-2\pi i(N-2)x_0u] + 2R^*\exp[2\pi i(N-2)x_0u] + 2R^*\exp[-2\pi i(N-2)x_0u] + \dots + (N-1)R^*\exp[2\pi ix_0u] + (N-1)R^*\exp[-2\pi ix_0u]$. Эти члены описывают пучки, которые появляются вокруг восстанавливающего пучка и не перекрываются с объектным пучком. Однако при нелинейной записи голограммы ($\gamma \neq 2$) имеется некоторое взаимодействие между этими пучками и объектным пучком, причем картина выглядит так, как если бы линейная голограмма освещалась несколькими восстанавливающими пучками. Это приводит к тому, что входное изображение представляет собой свертку не с матрицей дельта-функций, а с дельта-функциями, свернутыми с периодической функцией, имеющей максимум в начале координат и простирающейся до $\pm(N-1)x_0$. Ясно, что при линейной записи ($\gamma=2$) перекрестные искажения отсутствуют. Однако осуществить линейную запись очень трудно, а иногда и невозможно. Проблема состоит в том, чтобы все же пре-

дотворить перекрестные искажения. Достичь этого можно только одним путем. Мы можем использовать при записи мультиплицирующей голограммы последовательную запись элементарных голограмм. (Вопрос о мультиплицировании голограмм обсуждается в § 5.2.) Как показано в § 5.2, дифракционная эффективность отдельной голограммы составляет $1/N^2$ дифракционной эффективности, достигаемой при записи одной голограммы с $N=1$, и $1/N$ эффективности, получаемой при N -точечном объекте. С другой стороны, при этом перекрестные искажения уменьшаются и легко достигается равномерная яркость изображений. При наличии перекрестных искажений и $|\gamma| \neq 2$ в принципе нельзя добиться равномерности изображений.

Характерный для неголографических методов обмен между разрешением и яркостью изображения (что связано с выбором размера отверстия) в случае голографии не имеет значения. Отверстия в решетке могут иметь дифракционно-ограниченные размеры или меньше (как они воспроизводятся линзой, осуществляющей преобразование Фурье) без потери дифракционной эффективности голограммы.

10.11.4. Метод мультиплицирования изображений с помощью безлинзовых голограмм Фурье

Предположим, что мы не используем линзы ни при записи голограмм, ни при проецировании мультиплицированных изображений, а вместо них применяем голограмму, которая сама выполняет их функции. На рис. 3, а показано, как можно записать такую голограмму, а на рис. 3, б — как ее использовать для размножения изображений. Этот метод был предложен Гро в 1968 г. [1].

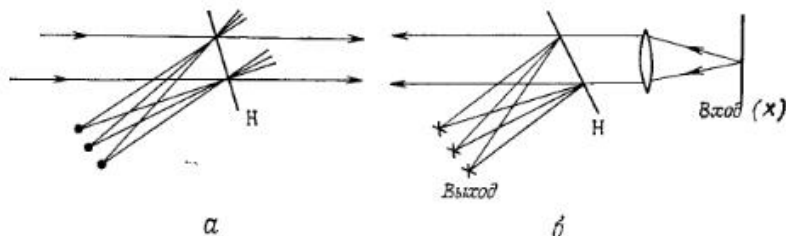


Рис. 3. а — формирование голограммы с использованием многих точечных объектов; б — при освещении полученной голограммы объектной волной (в нашем случае объектом является буква х) в месте восстановления каждого исходного точечного объекта будет формироваться изображение буквы х.

При записи такой голограммы необходимо, чтобы опорная и объектная точки находились на одинаковых расстояниях от голограммы с целью устранения квадратичных составляющих их волновых фронтов и получения однородной голограммы (см. § 4.3).

Как обсуждалось выше, точки можно записать последовательно или одновременно с присущими для каждого из этих подходов преимуществами и недостатками.

10.11.5. Голограммы, мультиплицирующие изображения

Калестинский [2] предложил свой вариант метода Гро, который с таким же успехом можно считать вариантом метода Лю. Идея предложения заключается в записи мультиплицируемого изображения с несколькими опорными пучками. При восстановлении мультиплицированных изображений используется один восстанавливающий пучок. Калестинский не видит каких-либо преимуществ в изготовлении голограммы, предназначенной для мультиплицирования только одного изображения, в то время как при таких же усилиях можно изготовить голограмму, которая мультиплицирует любое входное изображение.

10.11.6. Общие замечания

Голографические методы мультиплицирования имеют очевидные преимущества в скорости по сравнению с шаговой фотокамерой. Однако не ясно, имеет ли этот метод абсолютное преимущество. Для каждого из N изображений величина сигнала и отношение сигнал/шум изменяются как $1/N$ или $1/N^2$ в зависимости от способа записи голограмм. Необходимость достаточно хорошего отношения сигнал/шум ограничивает число мультиплицированных изображений. Имеются сообщения, что наилучшие голограммы позволяют получить до $N \approx 1000$ хороших изображений. Из-за внеосевых aberrаций голограммы (таких, как астигматизм) качество выходных изображений меняется от изображения к изображению. Налицо остаются все трудности, связанные с формированием изображения в когерентном свете. В некоторых случаях этими проблемами можно пренебречь, в других нельзя. С другой стороны, голография свойственна универсальность, что позволяет делать некоторые вещи исключительно хорошо. Например, операция юстировки каждого изображения, необходимая при последовательной процедуре мультиплицирования, в голографическом методе не нужна, поскольку для этого достаточно настроить одно-единственное изображение. Когда одно изображение отъюстировано, все выходные изображения оказываются настроенными.

Еще одно преимущество голографического мультиплицирования изображений по сравнению с неголографическим состоит в том, что в нем не существует проблемы, связанной с обменом между яркостью и разрешением в изображении, и, кроме того, можно улучшить равномерность освещения изображения.

10.11.7. Применения

Нам известно, что голограммы мультиплицированных изображений нашли применение в четырех случаях, а именно:

- 1) для записи изображений, например в фотолитографии при производстве полупроводниковых приборов,
- 2) для осуществления многоканальной параллельной оптической обработки одного входного изображения,
- 3) для реализации поэлементной пространственно-неинвариантной обработки изображений и
- 4) для различных целей в качестве согласующих элементов оптических волоконных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Groh G., Appl. Opt., 7, 1693 (1968).
2. Kaleszynski A., Appl. Opt., 15, 853 (1976).
3. Kaleszynski A., Appl. Opt., 14, 2343 (1975).
4. Lu S., Proc IEEE, 56, 116 (1968). [Имеется перевод: Лу С. ТИИЭР.— М.: Мир, 1968, т. 56.]
5. Thompson B. J., Laser Appl., 1, 33 (1971).
6. Thompson B. J., Appl. Opt., 15, 312 (1976).

10.12. ИЗМЕРЕНИЕ РАЗМЕРА ЧАСТИЦ

Б. Томпсон

10.12.1. Потребность в методе

Вопрос об измерении размера частиц имеет длинную историю и технически является трудной задачей. Однако эти измерения играют важную роль и необходимы во многих исследованиях. Для решения этой задачи разработано много разных методов, в том числе и чисто оптических. Голография может удовлетворить определенным требованиям в данной области, но без претензий на универсальность. Основное достоинство голографии состоит в том, что с ее помощью можно исследовать динамические ситуации, причем детальное изучение частиц выполняется на восстановленных с голограмм изображениях. Рассмотрим объем, заполненный движущимися частицами; сфотографировать этот объем — задача невозможная, если размеры отдельных частиц много меньше занимаемого ими пространства. Например, если частицы имеют диаметр 10 мкм и находятся в объеме 1 см³, то глубина фокуса изображающей системы, которая способна разрешить 10 мкм, много меньше 1 см! Однако можно зарегистрировать голограмму Фраунгофера частиц в таком объеме и последовательно восстано-

вить с нее изображение ансамбля частиц. Таким образом быстропротекающие события регистрируются на голограмме, с которой впоследствии восстанавливаются статические изображения.

10.12.2. Применения

Метод измерения размера частиц с помощью голограмм Фраунгофера, рассмотренных в § 4.2, был предложен в 1963 г. [1, 3]. С тех пор на эту тему написано большое число статей, и в последних обзорах можно найти достаточно ссылок на ранние работы (см., например, [4, 7]). Первоначально метод был использован для исследования капелек тумана, возникающего в естественных условиях [2, 5], но затем нашел широкое применение для измерения и расчета параметров частиц в различных других исследованиях.

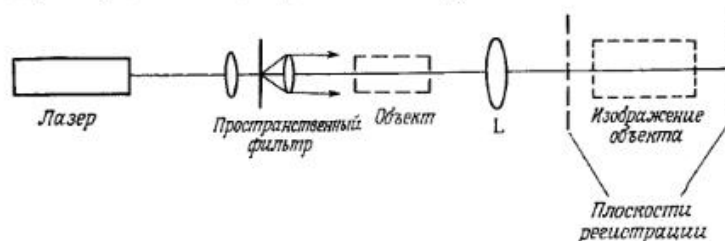


Рис. 1. Схематическое представление голографической системы для анализа размеров частиц, в которой используется голограмма Фраунгофера с осевым опорным пучком.

На рис. 1 приведена типичная схема установки, используемая для голографического определения размеров частиц. Освещение лучше всего осуществлять импульсным рубиновым лазером; этот лазер обеспечивает время экспозиции 10^{-6} с, которое требуется при разрешении в несколько микрометров и при средней скорости частиц 100 см/с. Естественно, что более высокие скорости требуют еще меньших экспозиций. Луч света рубинового лазера с модулированной добротностью проходит через пространственный фильтр, коллимируется (следует отметить, что коллимирование не является обязательным) и освещает исследуемый объем. Реальный объем, который может быть исследован, зависит от требуемого разрешения, но обычно он равен нескольким кубическим сантиметрам при размерах частиц от 2 мкм и более. Прежде чем записать голограмму, бывает выгодно ввести некоторое увеличение голограммы, чтобы облегчить требование к разрешающей способности регистрирующего материала. Исследуемый объем записывается целиком (на рис. 1 указаны типичные плоскости записи). Детали оптического оборудования таких систем зависят от специфики применения и природы исследуемого явления.

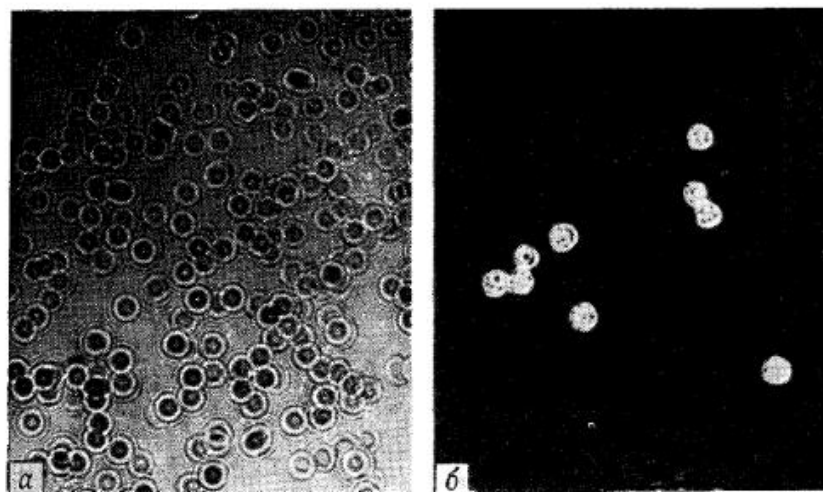


Рис. 2. *а* — голограмма распределения маленьких частичек пыльцы (диаметром около 20 мкм); *б* — изображение, восстановленное с части этой голограммы. (Согласно Тайлеру [9].)

Первоначальное применение метода к исследованию капелек тумана привело к более широким областям применения для решения самых различных задач, связанных с измерениями размеров частиц и аэрозолей. Применение этого метода к исследованию энергетических аэрозолей и работы форсунок ракет рассматривалось в работах [6, 8]. Другими примерами служат исследования частиц в камерах Вильсона, частиц морского планктона, выхлопа ракетных двигателей, двухфазных потоков, стекловолна, пылевой эрозии, снежинок и кристалликов льда, а также записи информации электронным лучом. Разумеется, что обсуждать здесь все эти области применения невозможно.

Разработка различных применений голографического метода для исследования частиц привела к необходимости дополнительного изучения самого голографического процесса и в результате к расширению диапазона его применимости; например, голографический метод стали использовать для исследования очень больших и совсем маленьких частиц, а также эффектов, связанных с изменениями показателя преломления.

На рис. 2, *а* представлена голограмма ансамбля небольших частиц пыльцы растений диаметром около 20 мкм. Изображение, восстановленное с части этой голограммы, показано на рис. 2, *б*. Хорошая резкость края частиц свидетельствует о том, что было получено разрешение порядка 1 мкм.

В данной области применений голографии все еще наблюдается большая активность, используются методы записи голограмм как с осевой, так и внеосевой геометрией, и можно ожидать, что будут получены новые существенные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Parrent G. B., Thompson B. J., *Optica Acta*, 11, 183 (1964).
2. Silverman B. A., Thompson B. J., Ward J. H., *J. Appl. Met.*, 3, 792 (1964).
3. Thompson B. J., *J. Soc. Photo-Opt. Instr. Eng.*, 2, 43 (1963).
4. Thompson B. J., *J. Phys.*, E7, 781 (1974).
5. Thompson B. J., Parrent G. B., Ward J. H., Justh B., *J. Appl. Met.*, 5, 343 (1966).
6. Thompson B. J., Ward J. H., Zinky W. R., *Appl. Opt.*, 6, 519 (1967).
7. Trolinger J., *Opt. Eng.*, 14, 383 (1975).
8. Trolinger J., Belz R. A., Farmer W. M., *Appl. Opt.*, 8, 957 (1969).
9. Tyler G. A., Ph. D. Thesis, Univ. of Rochester, Rochester, N.Y., 1978.

10.13. ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ПОРТРЕТ

В. Кехнер

Запись голографического портрета стала возможной благодаря созданию многокаскадных рубиновых лазеров [3—6, 8, 11, 12, 14, 15] с большой длиной когерентности излучения. Короткая длительность импульса твердотельных лазеров с модулированной добротностью позволяет пренебречь механической нестабильностью и движением объекта.

10.13.1. Лазер

В качестве источников света для получения голографического портрета могут использоваться рубиновые лазеры с модулированной добротностью и Nd : YAG-лазеры с удвоением частоты генерации и модулированной добротностью. Основные свойства этих систем описаны в § 8.1 (см. т. 1). В настоящее время для съемки голографического портрета обычно используют рубиновый лазер с модулированной добротностью, поскольку он обеспечивает значительно более высокую энергию на выходе по сравнению с Nd : YAG-лазером с удвоением частоты генерации.

Отличительными свойствами лазерных систем, применяемых при голографировании человека, является совмещение высокоэнергетического выхода и большой длины когерентности. Для получения голограммы одного человека требуется энергия минимум 250 мДж и длина когерентности 1 м. Голографический групповой портрет обычно регистрируется при энергии 4—10 Дж и длине когерентности 5—10 м [3, 8, 11].

Достаточную энергию и длину когерентности для рассматриваемого применения обеспечивают только системы, состоящие из генератора и усилителей. Обычно при голографировании одного человека применяют один усилитель, а для группового портрета необходимы два усилителя. Модулятором добротности генератора служат ячейки Поккельса, Керра или же просветляющийся краситель, поскольку точной синхронизации импульсов в данном применении не требуется.

10.13.2. Экспериментальные установки

Короткое время экспозиции снижает требования к механической стабильности всей установки, и получить высококачественные пропускающие или отражательные голограммы становится сравнительно легко.

На рис. 1 показана установка для получения пропускающих голограмм человека. Наиболее важным требованием при получении

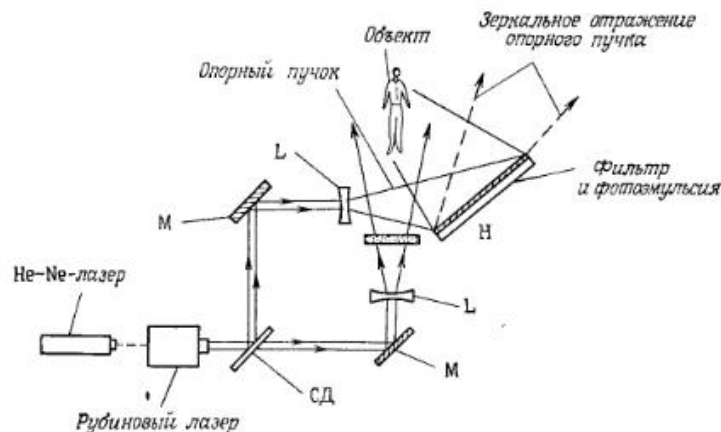


Рис. 1. Схема установки для получения пропускающих голограмм человека, в которой использован рубиновый лазер с модуляцией добротности. (Согласно Ансли [3].)

таких голограмм является защита глаз человека от повреждения лазерным излучением. На рис. 1 объектный пучок расширяется отрицательной линзой и проходит через диффузный экран. Если эти элементы выбраны надлежащим образом (см. разд. 10.13.3), то рассеянный от экрана свет не представляет опасности для человека, выступающего в роли объекта голографирования. Не менее важную роль играет требование к оптическому пути опорного пучка. Необходимо предусмотреть, чтобы часть (около 10%)

опорного пучка, отраженного фотографической пластинкой, направлялась в сторону от человека, как показано на рис. 1.

Человек обычно находится на расстоянии 1—2 м от фотографической пластинки. Оптические пути объектного и опорного пучков должны быть согласованы с позицией, занимаемой человеком-объектом.

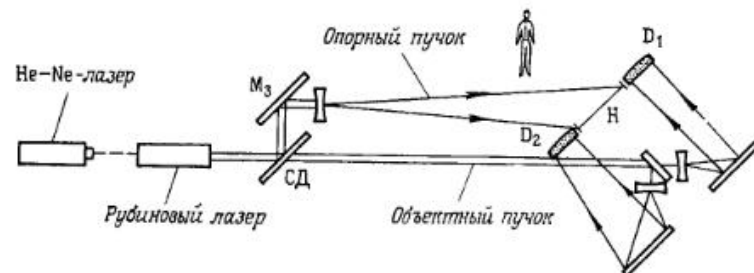


Рис. 2. Схема получения пропускающих голограмм с использованием двух объектных пучков. Н — голографическая пластинка; D₁ и D₂ — рассеиватели в виде матовых стекол. (Согласно Сиберту [12].)

На рис. 2 показана экспериментальная установка для записи пропускающих голограмм, отличающаяся от приведенной на рис. 1 наличием двух диффузных экранов на пути объектного пучка, которые обеспечивают более равномерное освещение.

Обычно голограммы записываются на фотопластинках Agfa 10E75 или 8E75 с размерами 9×12 или 18×24 см. Фотографические пластинки должны быть защищены фильтром с ограниченной полосой пропускания от засветки, вызываемой лампой-вспышкой или комнатным освещением (например, типа Schott glass RG-665). Если перед системой фильтр — фотографическая пластинка установлен затвор, то голограмма может быть получена при дневном освещении или в условиях нормального комнатного освещения. Работа такого механического затвора должна быть синхронизирована с лазером. Промышленностью выпускается электромеханический затвор, управляемый электромагнитом, с апертурой около 15 см, минимальное время открывания составляет 0,4—0,6 с.

На рис. 3 показана экспериментальная установка для записи отражательных голограмм человека. В этом случае восстанавливаемое с голограммы изображение можно наблюдать в белом свете. Главное отличие установки от схем, приведенных на рис. 1 и 2, заключается в способе формирования опорного пучка, который освещает фотографическую пластинку с обратной стороны (см. § 5.1). В этом случае особенно важно установить угол освещения фотопластинки, чтобы опорный пучок не попадал на человека.

Во всех устройствах, показанных на рис. 1—3, должны применяться только элементарные стеклянные линзы с противоотража-

тельным покрытием. При высоких уровнях мощности рубинового лазера с модуляцией добротности следует позаботиться, чтобы свет, отраженный от криволинейных поверхностей, не возвращался обратно в лазер. Желательно, чтобы отрицательная линза была плосковогнутой и вогнутая ее поверхность была обращена в сторону от лазера, а плоская слегка наклонена, чтобы отраженный обратно свет не попадал в выходное окно лазера.

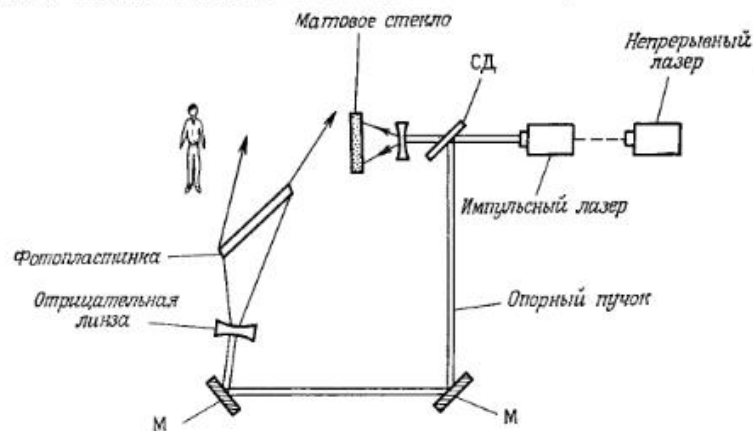


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для получения отражательных голограмм человека, восстанавливаемых в белом свете. (Согласно Ансли [3].)

Импульсы большой мощности вызывают также проблемы, связанные с фокусировкой луча в точку, так как при их фокусировке ионизируется воздух и разрушаются расположенные в этой области другие материалы. Это означает, что для устранения дифракционных эффектов нельзя пользоваться обычными пространственными фильтрами. Для расширения пучков без пространственных фильтров вместо микрообъективов, обычно используемых с маломощными лазерными пучками, должны применяться рассеивающие линзы.

Существенными элементами голографических систем являются зеркала. Поскольку алюминиевые зеркала поглощают 10% излучения рубинового лазера, их следует применять лишь с целью отражения расходящихся пучков. Для отражения мощных, неразведенных пучков должны применяться зеркала, способные отражать огромные энергии, такие, которые используются в резонаторах рубиновых лазеров. Светоделители также должны иметь отражающие и антиотражающие покрытия из диэлектрических материалов.

Нейтральные фильтры, которые обычно используются с непрерывными лазерами, будут разрушаться энергией высокоэнергетических импульсных лазеров. Поэтому необходимо иметь набор стеклянных фильтров, в которых поглощающее вещество более или менее равномерно распределено в стеклянной основе.

10.13.3. Защита глаз человека

Энергия освещения, попадающая в глаза, должна иметь безопасный уровень в расчете на то, что человек не имеет защитных очков.

10.13.3.1. Максимально допустимые уровни энергии

При освещении светом рубинового лазера с модулированной добротностью максимально допустимая плотность энергии на сетчатке глаза ограничивается величиной [1, 2]

$$I_{R \text{ макс}} = 0,07 \text{ Дж/см}^2. \quad (1)$$

Это пиковое значение плотности энергии, которое может быть безопасно для сетчатки глаза, должно быть связано с допустимой плотностью энергии на роговой оболочке глаза.

Пусть широкий параллельный пучок света падает на роговую оболочку глаза. Вследствие aberrаций минимальный размер точки на сетчатке глаза равен 10 мкм. Если глаз адаптирован к условиям малой освещенности, то диаметр зрачка составляет приблизительно 7 мм. В случае такой наихудшей ситуации фокусирующая способность глаза увеличивает плотность энергии параллельного пучка на роговой оболочке в $(7 \text{ мм})^2 / (10 \text{ мкм})^2 \approx 5 \cdot 10^5$ раз. Разделив максимальный безопасный уровень энергии для сетчатки на этот коэффициент, получаем максимально допустимую плотность энергии на роговой оболочке глаза, а именно $I_{C \text{ макс}} \approx 1 \cdot 10^{-7} \text{ Дж/см}^2$ [1].

Принимая коэффициент безопасности равным 10, определим максимально допустимый уровень экспозиции на сетчатке в случае прямого освещения или зеркального отражения света рубинового лазера с модулированной добротностью:

$$I_{C \text{ макс}} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/см}^2. \quad (2)$$

При адаптации глаза к условиям дневного освещения (диаметр зрачка 3 мм) безопасная плотность энергии может быть увеличена в 5 раз.

Из рис 1—3 видно, что объектный пучок расширяется и проходит через рассеиватель. В таком случае необходимо связать плотность энергии на сетчатке с плотностью энергии на диффузной рассеивающей поверхности. Как показано на рис. 4, площадка A_D на рассеивателе изображается на сетчатке как меньшая площадка A_R . Простой геометрический расчет дает отношение площадей $A_D/A_R = (r/f_E)^2$.

Теперь допустим, что плотность энергии на экране равна I_D , и предположим, что площадка экрана A_D рассеивает энергию $I_D A_D$, падающую на нее в телесном угле Ω_D . Рассеяние света матовым или обработанным струей песка стеклом даже отдаленно

не приближается к идеальному ламбертовскому рассеивателю. Свет сосредоточен в небольшом угле в направлении падения луча. Обычно для углов $> \pm 20^\circ$ относительно направления падения луча интенсивность рассеянного света составляет меньше 10% максимального значения [7, 9]. Если площадь зрачка глаза $A_c = (\pi/4)d_c^2$, то телесный угол, который стягивает ее на экране, составляет A_c/r^2 и доля энергии, которая попадает в глаз, равна $A_c/r^2 \Omega_D$. Следовательно, плотность энергии на сетчатке равна $I_R = I_D A_c / \Omega_D f_E^2$.

Заметим, что отношение I_R к I_D не зависит от r . Подставляя номинальные значения $d_c = 7$ мм, $f = 15$ мм, $\Omega_D = \pi/10$ ср и используя $I_{D \text{ макс}} = 0,07$ Дж/см², получаем $I_{R \text{ макс}} = 0,13$ Дж/см². Страхуясь несколько для безопасности, мы получаем, что плотность энергии лазерного пучка на рассеивающем экране должна быть меньше значения [2, 13]

$$I_{D \text{ макс}} = 0,07 \text{ Дж/см}^2. \quad (3)$$

10.13.3.2. Меры безопасности с объектным пучком

Площадь освещенной части на матовом стекле экрана вычисляется в соответствии с выражением

$$A_D = Q / I_{D \text{ макс}}, \quad (4)$$

где Q — выходная энергия излучения лазера. Лазерный луч расширяется отрицательной линзой с фокусным расстоянием $-f$; линза устанавливается перед рассеивателем на расстоянии s от него. Два параметра $-f$ и s можно определить из простых геомет-

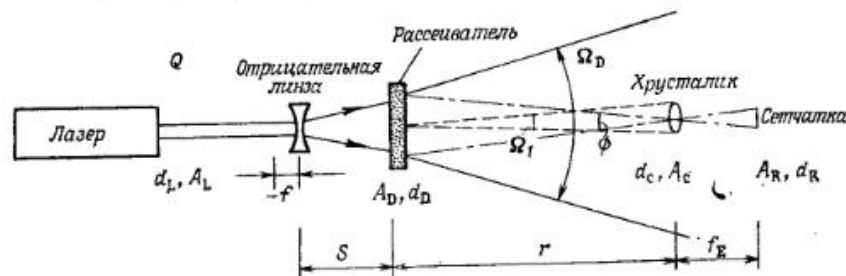


Рис. 4. Схема для оценки величины энергии на сетчатке глаза. Q — энергия на выходе лазера; d_L и A_L — диаметр и площадь поперечного сечения лазерного пучка; d_D и A_D — диаметр пучка лазера у рассеивателя и площадь рассеивателя; d_c и A_c — диаметр и площадь глазного зрачка; d_R и A_R — диаметр и площадь изображения лазерного пучка на сетчатке; ϕ — угол зрения, стягиваемый протяженным источником; Ω_D — угол рассеяния лазерного излучения; Ω_i — угол, стягиваемый зрачком глаза при наблюдении рассеивателя; f_E — фокусное расстояние глазной линзы; r — расстояние от рассеивающего экрана до наблюдателя; S — расстояние от отрицательной линзы до рассеивателя.

рических соотношений, чтобы получить плотность энергии на экране $I_{D \text{ макс}}$ при выходной плотности энергии лазера $I_L = Q/A_L$. Из рис. 4 следует $d_L/d_D = (-f)/(s-f)$ или

$$s = [(I_L/I_{D \text{ макс}})^{1/2} - 1](-f). \quad (5)$$

Пример. Пусть выходной пучок диаметром 1 см с энергией 1,5 Дж ($I_L = 2$ Дж/см²) расширяется отрицательной линзой с фокусным расстоянием $f = -5$ см. В соответствии с формулой (5) требуемое расстояние между линзой и рассеивателем $s = 21,5$ см. На поверхности экрана пучок расширяется до площади $A_D = 21,5$ см².

10.13.3.3. Меры безопасности с опорным пучком

При всех обстоятельствах необходимо не допустить прямого попадания или отражений опорного пучка в глаз человека. Например, опорный пучок, отраженный от фотографической пластинки, может повредить глаз. Для эмульсии Агфа Сайнтиса 8Е75 освещение фотографической пластинки должно быть приблизительно 15 мкДж/см². Считая, что от фотографической пластинки отражается 10% света, интенсивность света, попадающего в глаз, оказывается в 150 раз больше допустимого уровня, установленного согласно формуле (2). В случае отражательных голограмм опасность возрастает, поскольку опорный пучок освещает фотографическую пластинку со стороны, противоположной объекту. Только около 10% энергии поглощается эмульсией. Очевидно, во избежание повреждений глаз необходимо принять специальные меры предосторожности. Этому можно помочь, если создать такие условия, чтобы пучок попадал на фотопластинку под большим углом и свет отражался или проходил через нее, минуя объект.

10.13.3.4. Устранение случайных отражений

В установке должны быть предусмотрены специальные экраны для защиты объекта от случайных зеркальных отражений опорного или объектного пучков. Настоятельно рекомендуется для определения освещенностей этих пучков применять ионизационный He — Ne-лазер, свет от которого должен идти в том же направлении, что и от импульсного лазера.

10.13.4. Восстановление изображений (см. гл. 6)

Голографический портрет наблюдается обычным способом с помощью расширенных пучков от He — Ne- или аргонового лазера или отфильтрованным светом дуговой лампы. Отражательные голограммы освещаются от источника некогерентного света. Восстановленные с голограммы изображения обычно фотографируются

фотокамерами с фокусным расстоянием объектива 35 или 50 мм при апертурах $f/2$ — $f/5,6$. Выбор апертуры представляет собой компромисс между получением максимальной глубины фокусировки и минимума спеклов. С уменьшением апертуры увеличивается глубина фокусировки, но усиливается зернистость голографического изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ACGIH, Amer. Confer. of Governmental Industrial Hygienists, P.O. Box 1937, Cincinnati, Ohio, 45201, 1972.
2. ANSI, Amer. Nat. Standard for the Safe Use of Lasers, Z136.1—1973, Am. Nat. Std. Inst., New York, N.Y., 1973.
3. Ansley D. A., Appl. Opt., **9**, 815 (1970).
4. Ansley D. A., Siebert L. D., Ann. NY Acad. Sci., **168**, 475, February 1970.
5. Gregor E., Proc. SPIE, April 1971, p. 93.
6. Gregor E., Davies J. H., Electro-Opt. Syst. Design, July—August 1969, p. 48.
7. Levi L., Applied Optics: A Guide to Optical Systems Design, Vol. 1, Wiley, New York, 1968.
8. McClung F. J., Jacobson A. D., Close D. H., Appl. Opt., **9**, 103 (1970).
9. Middleton W. E. K., J. Opt. Soc. Amer., **50**, 747 (1960).
10. Myers G. E., Electro-Opt. Syst. Design, July—August 1973, p. 30.
11. Rundle W. J., Higgins T. V., Tech. Confer., Soc. Motion Picture Television Engrs. (SMPTE), 117th, Los Angeles, Calif., September 1975.
12. Siebert L. D., Proc. IEEE, **56**, 1242 (1968). [Имеется перевод: Сиберт Л. Д.—ТИИЭР.—М.: Мир, 1968.]
13. Sliney D. H., Freasier B. C., Appl. Opt., **12**, 1 (1973).
14. Wuerker R. F., Heflinger L. O., SPIE J., **9**, 122, May 1971.
15. Zech R. G., Siebert L. D., Appl. Phys. Lett., **13**, 417 (1968).

10.14. ФОТОГРАММЕТРИЯ

Н. Баласубраманиян

10.14.1. Введение

В руководствах по фотограмметрии она определяется как «наука или искусство получения достоверных измерений средствами фотографии». Специалисты по фотограмметрии используют перекрывающиеся фотографии для извлечения и анализа трехмерной информации. Относительная геометрическая ориентация перекрывающихся фотографий позволяет восстановить гипотетическую трехмерную стереомодель, которая затем используется для измерения размера, формы и положения объектной сцены. На основе данного определения можно применять фотографические принципы во всех случаях, когда имеется возможность получить фотограммы, дающие адекватную информацию. В прошлом основная роль фотограмметрических работ из-за их сложности была ограничена построением

топографических карт земной поверхности. Однако применение фотограмметрии в технике, биологии и медицине привело к широкому распространению фотограмметрических методов. Все применения, не связанные с топографией, называют «фотограмметрией компактных объектов».

В литературе сообщалось о некоторых применениях голографии к фотограмметрическим операциям. Одними из основных применений являются:

- 1) применение оптической обработки для автоматизации процесса расчета данных по стереофотографиям;
- 2) голографическая запись и измерения в фотограмметрии компактных объектов;
- 3) синтез голографических стереомоделей по стереофотографиям для последующих измерений и воспроизведения информации и
- 4) разработка прямых методов оконтуривания для получения количественной информации об объектах.

Применение оптической обработки с целью автоматизации получения данных по стереофотографиям привело к созданию большого числа различных методов и систем. Хороший обзор этих методов дан в работе [1]. В этом параграфе мы не будем рассматривать другие применения, такие, как голографическая память для хранения, обработка и воспроизведение аэрофотонизображений. Упор сделан на применение голографии в фотограмметрии компактных объектов и для синтеза голографических стереомоделей.

10.14.2. Фотограмметрия компактных объектов

Для начала будет полезно отметить основные различия между мнимым голографическим изображением и фотограмметрической стереомоделью. В стереофотограмметрии субъективно воспринимаемая трехмерная модель образуется пересечением двух сопряженных пучков лучей, исходящих из сопряженных изображений взаимно ориентированных фотографических стереопар. Эта субъективно воспринимаемая модель есть не что иное, как стереомодель. Даже такая стереомодель, будучи воспринятой глазом, дает всего лишь одну фиксированную перспективу объекта. Наоборот, мнимое изображение, восстановленное с голограммы, представляет собой истинное трехмерное изображение и содержит все монокулярные параллаксы, которые имел реальный исходный объект. Число различных перспектив ограничивается только апертурой голограммы, на которой записано рассеянное объектом поле.

Методология извлечения достоверной количественной информации из фотограмметрических стереомоделей хорошо отработана; такой же самый подход используется и для получения количественной информации из голографических мнимых изображений. Значительные исследования проводились по установлению гео-

метрической точности восстановленных изображений; результаты этих исследований изложены в работах [4, 8].

Геометрическая точность в большой степени зависит от того, насколько одинаковыми являются геометрии схем записи голограммы и восстановления голограммы. Самосветящаяся точка, связанная с устройством для измерения координат xuz и совмещенная с пространством мнимого изображения, восстанавливаемого с голограммы, используется как измерительная метка для обмера восстановленного изображения. На рис. 1 показана одна из систем

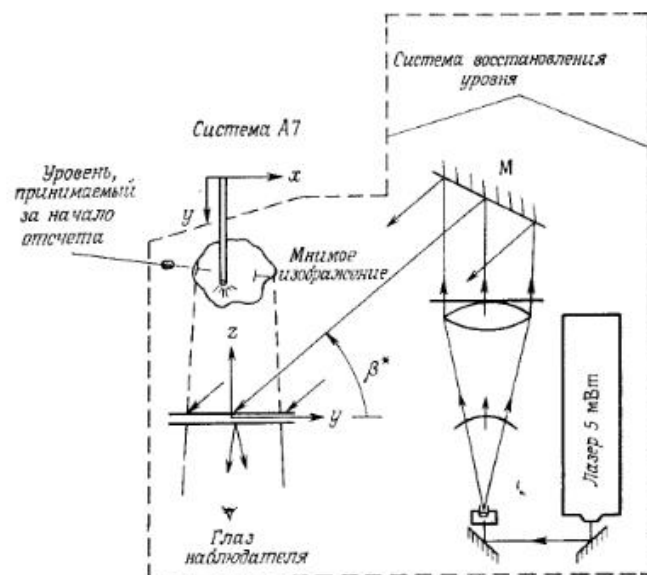


Рис. 1. Положение мнимого изображения (вид в плане) в системе для измерения геометрических параметров объекта.

такого типа. Самосветящаяся точка представляет собой торцевое оптическое стекловолокно, прикрепленного к измерительной системе самописца А7. Во время измерений плавающая точка совмещается с исследуемой точкой изображения; при этом координата плавающей точки дает координату точки изображения. Перемещая плавающую точку в одной плоскости, можно получать контуры и профили объекта и строить соответствующие кривые. На рис. 2, а в качестве примера приведена топограмма рельефа зубной коронки.

Точность измерения координат точки, которая в свою очередь определяет точность и разрешение для контуров, зависит от таких факторов, как контраст между изображением и измерительной меткой, распознаваемость изображения (способность указать знак кривизны поверхности), увеличение оптической системы и условия

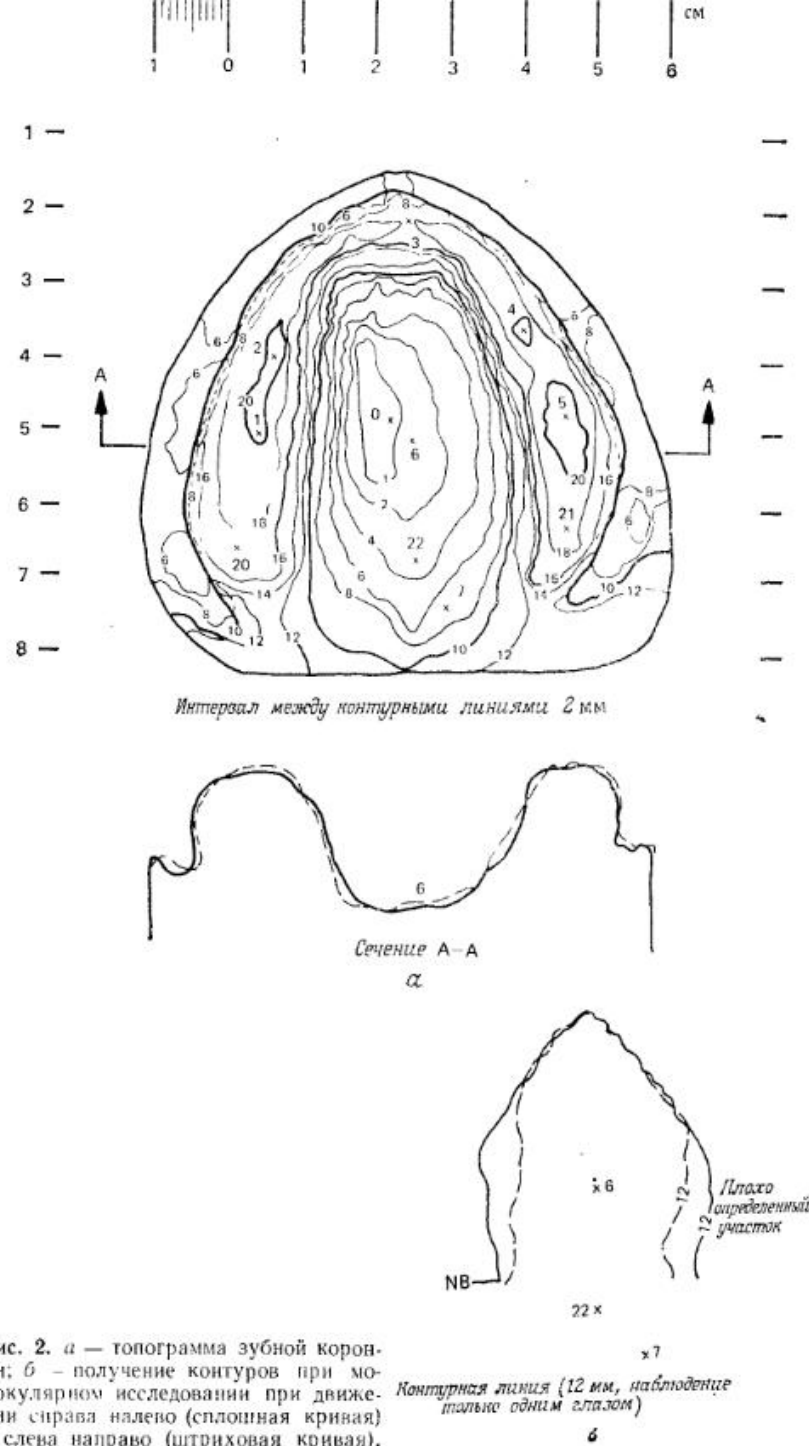


Рис. 2. а — топограмма зубной коронки; б — получение контуров при монокулярном исследовании при движении справа налево (сплошная кривая) и слева направо (штриховая кривая).

наблюдения во время работы. Кроме того, наличие спеклов в мнимом изображении непосредственно влияет на получаемое при обработке разрешение. Очень трудно установить однозначно число, которое определяет точность измерения координаты точки, восстановленной с голограммы. Точность зависит также от оператора, проводящего измерения. Из многих экспериментов следует, что стандартное отклонение при измерении координат точки равно

$$\sigma_{xy} = 0,025 \text{ мм и } \sigma_z = 0,075 \text{ мм,}$$

где σ_{xy} — отклонение в плоскости, параллельной голограмме, а σ_z — отклонение в направлении, перпендикулярном голограмме (вглубь).

Прямое голографирование открывает уникальные возможности в фотограмметрии компактных объектов. Глубина резкости восстановленного мнимого изображения зависит лишь от параметров используемого когерентного излучения, и ею можно управлять в соответствии с рассматриваемой задачей. В стереофотографии с целью получения большой глубины резкости прибегают к компромиссу, теряя в разрешении. Множество перспектив голографического изображения облегчает измерение координат точки, увеличивает точность и делает процедуру измерения менее утомительной. Эту операцию может выполнить даже человек с монокулярным зрением, что было бы невозможно в стереофотограмметрии. На рис. 2,6 приведен пример получения контуров при монокулярном зрении. Однако голография имеет свои собственные ограничения. Если фотограмметрия, проводимая с помощью стереофотографии, не имеет ограничений на размер исследуемого объекта, то геометрические и физические аспекты голографии вместе с требованием к когерентному освещению накладывают определенные ограничения на размер объекта. При измерениях голографического мнимого изображения используется масштаб лишь один к одному и нельзя добиться увеличения, не исказив при этом восстановленное изображение. В этом смысле стереофотограмметрия имеет определенные преимущества перед непосредственным голографированием. Однако способность регистрировать и обмерять трехмерные объекты без нарушения масштаба открывает новые возможности и делает голографию ценным дополнением к фотограмметрии компактных объектов. Курц и др. [7], а также Микэйл и др. [8] сделали хороший обзор работ, выполненных на эту тему.

10.14.3. Получение контуров рельефа поверхности методами голографической интерферометрии

Было предложено и продемонстрировано несколько методов получения контуров, представляющих собой топограмму поверхности объекта, с использованием принципов голографической ин-

терферометрии. Контурные линии в виде интерферометрических полос локализируются на поверхности объекта или очень близко к ней при рассматривании мнимого изображения. Интерференционная картина аналогична топографической контурной карте и обеспечивает количественную информацию об объекте. Имеются три общих метода получения голографических топограмм поверхности объекта:

- 1) метод нескольких длин волн (или нескольких частот) [5, 6, 10, 11].
- 2) метод нескольких источников [6, 10, 11] и
- 3) метод нескольких показателей преломления.

Мы не будем рассматривать эти методы получения контуров и анализировать их достоинства и недостатки. Эти вопросы подробно обсуждаются в § 10.10. Оценки, представленные здесь, следуют из фотограмметрических рассуждений. Прежде чем убедиться в том, что голографические методы получения контуров смогут оказаться полезными для исследований компактных объектов, нам нужно иметь некоторые представления о фотограмметрии.

Контурные линии должны быть эквидистантными и представлять собой ортоскопические проекции. Во всех голографических методах получения контурных карт рельефа поверхности контурные линии локализованы вблизи или на поверхности объекта (или его мнимого изображения). Когда объект (или его мнимое изображение) с наложенными на него контурными линиями регистрируется с помощью фотоаппарата, то, как хорошо известно в фотограмметрии, получают не ортоскопическую, а некоторую перспективную топограмму. Каждая контурная линия имеет свой масштаб увеличения и, следовательно, должна корректироваться индивидуально. Отсюда следует, что, прежде чем можно будет использовать голографический метод получения топограмм для получения количественной информации, необходимо модифицировать методы регистрации контурных линий. Кроме того, единственный путь установить, в каком положении находится данная контурная линия (т. е. ближе она или дальше от наблюдателя, чем соседняя), состоит из получения общего представления о трехмерном объекте, контуры которого снимаются. С этой точки зрения истинная трехмерность мнимого изображения помогает выполнить процедуру определения контуров. Однако, если осуществляется двумерная регистрация в виде фотографии, это преимущество теряется. Несмотря на наличие ряда проблем, методы получения голографических карт рельефа поверхностей уже взяты на вооружение; они предоставляют простые средства получения полуквантитативной метрической информации о компактных объектах.

10.14.4. Голографические стереомодели

В предыдущем разделе отмечалось, что голографирование объектов представляет собой полезное дополнение к фотограмметрии, и фотограмметрические методы определения координат точек можно применять для получения количественной информации на основании мнимого изображения объекта. Если объект либо слишком мал, либо слишком велик, чтобы можно было с достаточной степенью точности получить его контурную карту, то приходится прибегать к некоторому пересчету, который позволил бы сделать задачу удобной для извлечения информации. В частности, при больших размерах объекта его невозможно осветить когерентным светом, и необходимо производить некоторую промежуточную регистрацию данных. Эту промежуточную запись можно преобразовать в мнимое голографическое изображение, содержащее (с определенной субъективной точки наблюдения) информацию о рельефе поверхности объекта. В последние несколько лет был предложен ряд методов синтеза трехмерных мнимых изображений, восстановленных с голограмм, на которых записаны изображения набора двумерных фотографий объекта. Такие голограммы можно отнести к классу составных. Кольтер и др. [2] определили составную голограмму как совокупность небольших голограмм, расположенных в одной плоскости, причем каждая из них находится близко к соседней или перекрывается с ней. Волновые фронты, записанные на отдельных голограммах, не обязательно являются непрерывными или когерентными друг с другом. Однако при освещении восстанавливающим пучком одновременно всей такой голограммы, волновые фронты, записанные на отдельных небольших голограммах, взаимодействуют и образуют изображение, которое субъективно воспринимается как трехмерное. Варнер [10] дал хороший обзор этих методов. Дополнительную информацию по составным голограммам можно найти в § 5.5. Как правило, эти методы были предложены в качестве новых средств записи и наблюдения стереоизображений или же как методы уменьшения информационной емкости, для того чтобы можно было передавать голограмму трехмерного изображения по электрическим каналам связи. Исключением являются голографические стереомодели, которые предназначаются для последующей обработки и синтезируются с выполнением определенных требований.

Мы рассмотрим вопросы, связанные с записью и восстановлением различных типов голографических стереомodelей оптическими средствами, и отметим специфические преимущества и недостатки этих стереомodelей применительно к построению топографических карт местности.

Понятие голографической стереомodelи предполагает запись на одной голограмме изображений двух перекрывающихся друг друга

фотографий, имеющих одну и ту же площадь и соответствующую взаимную ориентацию для их последующего рассматривания. Перекрывающиеся изображения можно спроецировать непосредственно на голографическую пластинку или же предварительно спроецировать на прозрачный рир-экран и затем эти проекции записать

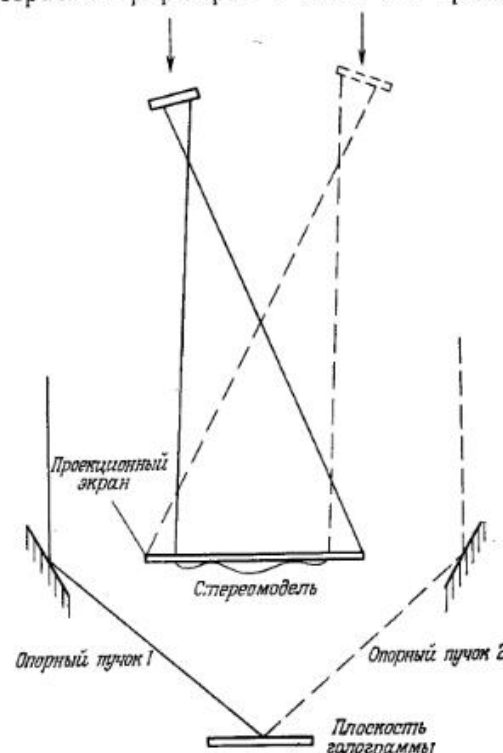


Рис. 3. Схема записи голографической стереомodelи по схеме Френеля.

на голограмму. В первом случае говорят о голографической стереомodelи сфокусированного изображения, а во втором — о френелевской голографической стереомodelи.

На рис. 3 представлена схема оптической системы для записи френелевской голографической стереомodelи. Стереотранспаранты проецируются на рир-экран с использованием когерентного света лазера. Сначала система двойной проекции настраивается так, чтобы устранить различия в масштабе и угле поворота для обоих перекрывающихся изображений. Во время записи включается поочередно то одна, то другая проекционная система. Каждый из проецируемых транспарантов записывается на всей фотопластинке с разными опорными пучками для обеих экспозиций, чтобы при

восстановлении можно было разделить изображения. На рис. 4 показана схема оптического восстановления голографической стереомодели. Вектор поляризации одного из восстанавливающих

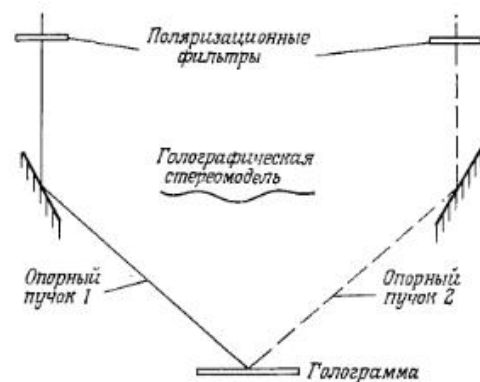


Рис. 4. Схема восстановления голографической стереомодели.

пучков с высокой точностью, однако для получения неискаженной модели необходимо, чтобы эти пучки были полной копией опорных пучков, использованных при записи. Кроме того, для неискаженного восстановления стереомодели необходимо, чтобы положение глаз совпало с центрами перспективы [3].

На рис. 5 приведена геометрия схемы оптического устройства для записи голографической стереомодели сфокусированного изображения. Это устройство аналогично тому, которое использовалось для записи френелевских голографических стереомodelей, за исключением лишь того, что вир-экран теперь заменен голографической фотопластинкой. Хотя стереомодель сфокусированного изображения можно восстановить таким образом, что она будет наблюдаться в такой же системе, как и френелевская модель, но для ее наблюдения лучше использовать белый свет или протяженный некогерентный источник. Разделение изображений достигается либо благодаря эффектам поляризации, либо с помощью углового разделения восстанавливающих пучков.

Голографическая стереомодель сфокусированного изображения может рассматриваться как суперпозиция на одной фотопластинке двух фотографий с двумя различными несущими частотами. Несущие частоты определяют угловое соотношение между восстановленными волновыми фронтами. В такой голографической стереомодели две несущие частоты соответствуют двум внеосевым зонным пластинкам, смещенным относительно друг друга, что позволяет пространственно разделить оба изображения. При освещении две

внеосевые зонные пластинки образуют два изображения источника, что идентично их разделению глазами. Такой упрощенный подход к записи и восстановлению голографической стереомодели сфокусированного изображения позволяет использовать более простые средства для их построения. Если имеется в готовом виде фотографическая стереопара одного масштаба, то обе фотографии можно

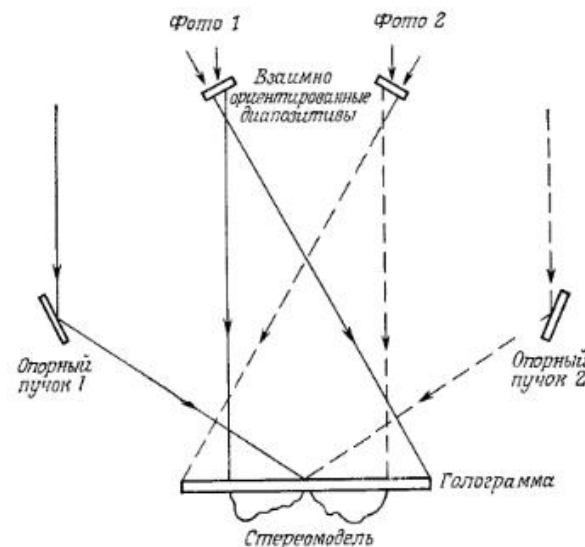


Рис. 5. Схема записи голографической стереомодели с использованием голограммы сфокусированного изображения.

непосредственно отпечатать контактным способом на голографической фотопластинке, используя когерентное освещение для создания пространственной несущей частоты. Такой подход не только упрощает процесс записи голографической стереомодели, но и дает некоторые преимущества, а именно приводит к меньшим геометрическим искажениям и обеспечивает более высокое разрешение и эффективность.

После того как стереомодель записана, можно выполнять измерения, как и в случае применения голографии в фотограмметрии компактных объектов, используя самосветящуюся метку в пространстве мнимого изображения. Таким образом, голографические стереомодели обеспечивают простой, эффективный и непрерывный способ хранения должным образом ориентированных стереоизображений, которые могут быть использованы для различных применений при составлении топографических карт. На рис. 6 показана топографическая карта, полученная с одной из первых голографических стереомodelей.

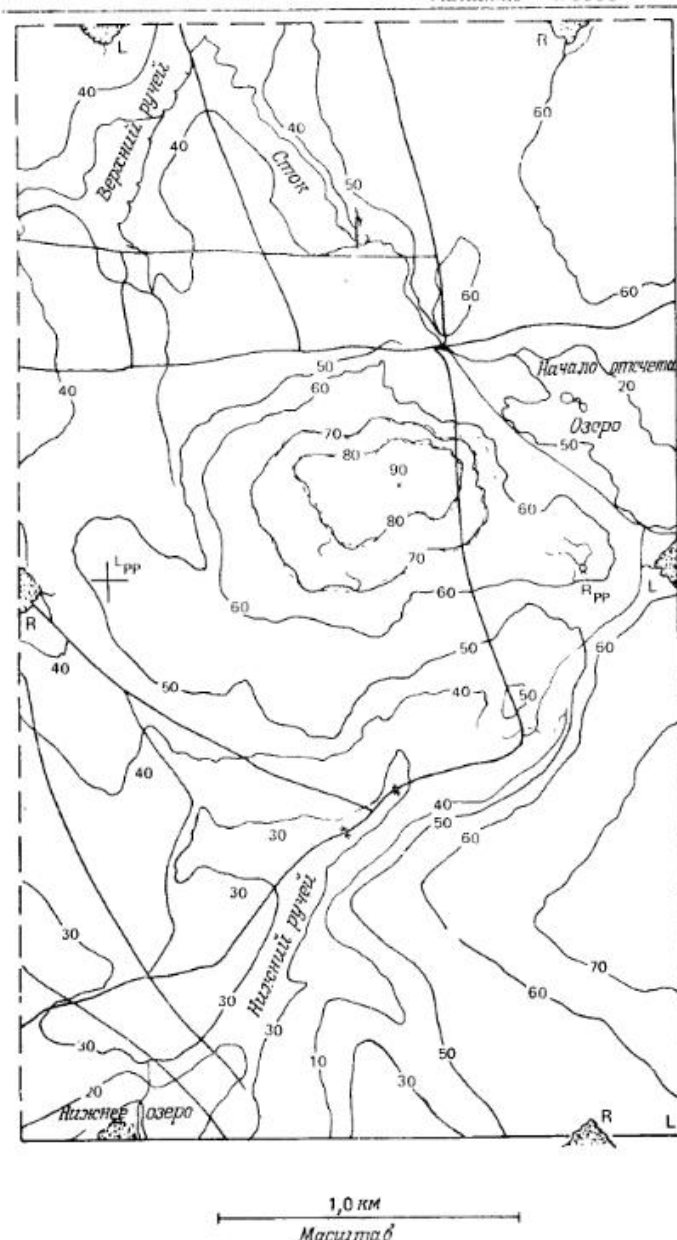


Рис. 6. Пример карты, изготовленной по голографической стереомодели. Интервал между контурными линиями $10 = 3$ м. Получено 7 мая 1971 г. на голографической стереомодели 2-17-3-71.

В литературе подробно рассматривались преимущества голографических стереомodelей, среди которых можно отметить следующие два:

- 1) постоянное хранение взаимно ориентированных стереофотографий и простое их восстановление при необходимости;
- 2) возможность получать голографические стереомodelи с помощью транспарантов и со специально подготовленных отпечатков.

В случае френелевской стереомodelи ее размер может быть больше, чем размер голограммы, в то время как для стереомodelи сфокусированного изображения размер модели ограничивается размерами регистрирующей фотопластинки. Однако последняя модель имеет ряд преимуществ, в частности ее можно применять для тренировки операторов или для качественного анализа информации. В случае голографической стереомodelи сфокусированного изображения отсутствуют спеклы, характерные для любого диффузного когерентного освещения. Можно также осуществить качественную, но быструю операцию получения данных из голографической стереомodelи путем наложения трехмерной решетки на мнимое изображение [9]. Приведенные аргументы убедительно показывают, что голографические стереомodelи могут стать хорошим дополнением к обычным фотограмметрическим методам.

10.14.5. Заключение

Применения голографии к топографии и фотограмметрии, осуществляемые в последнее время, показывают, что имеются области, в которых голография, по-видимому, предлагает реальные и практически полезные решения. Спеклы, вызванные диффузной природой объектов, ухудшают разрешение и создают препятствия при использовании голографии для топографических целей. Несмотря на неприятности, вызванные спеклами, голографические изображения, по-видимому, найдут применение для решения многих измерительных задач. Устанавливая оптические устройства (например, увеличители) в пространстве между действительным изображением и наблюдателем, можно не только уменьшить размер спеклов, но и увеличить изображение, так чтобы его наименьшие детали, представляющие интерес, стали крупнее спеклов. Спеклы отсутствуют в голографической стереомodelи сфокусированного изображения, поскольку в этом случае на этапе восстановления изображения используется пространственно-некогерентный свет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. SPIE (eds. N. Balasubramanian, R. Leighty), 45, March 1974.
2. Collier R. J., Burckhardt C. B., Lin L. H., Optical Holography, Academic Press, New York, 1971. [Имеется перевод: Кольтер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. — М.: Мир, 1973.]

3. Gifford D. L., Mikhail E. M., Final Tech. Rep., USAETL, ETL-CR-73-14, July 1973.
4. Glaser G. H., Mikhail E. M., Study of Potential Application of Holographic Techniques to Mapping, Purdue Univ., Interim Tech. Rep., ETL-CR-70-8 (AD718084), December 1970.
5. Heflinger L. O., Wuerker R. F., Appl. Phys. Lett., **15**, 28—30 (1969).
6. Hildebrand B. P., Haines K. A., J. Opt. Soc. Amer., **57**, 155—162 (1967).
7. Kurtz M. K., Balasubramanian N., Mikhail E. M., Stevenson W. H., Study of Potential Application of Holographic Techniques to Mapping, Final Tech. Rep., Project DAAK-02-69-C-0563 for US Army Topographic Lab., ETL-CR-71-17, October 1971.
8. Mikhail E. M., Glaser G. H., Kurtz M. K., Jr., Holograms for Mensuration of Close-Range Objects, Symp. Close Range Photogrammetry, Amer. Soc. Photogrammetry, January 26—29, 1971.
9. Mikhail E. M., Kurtz M. K., Stevenson W. H., Metric Characteristics of Holographic Imagery, Paper presented at SPIE Seminar in Depth, Quantitative Imagery in the Bio' Medical Sciences, Houston, Texas, May 10—12, 1971.
10. Varner J. R., Holographic Contouring (представлено на семинаре SPIE), Holography, Boston, Mass., April 14—15, 1971.
11. Zelenka J. S., Varner J. R., Appl. Opt., **7**, 2107—2110 (1968).

Дополнение

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ГОЛОГРАФИИ В ТРЕХМЕРНЫХ СРЕДАХ

Ю. Н. Денисюк

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность фотографической записи и воспроизведения волновых полей была обнаружена Д. Габором, как известно, применительно к случаю записи голограммы в плоской светочувствительной среде [1]. Бурное развитие голографии, которое последовало после того, как в 1962—1964 годах Э. Лейт и Ю. Упатниекс существенно усовершенствовали этот метод, применив лазер и внеосевую схему записи, привело к тому, что разработка принципиальных основ голографии в двумерных средах фактически была закончена уже к 1970 г. и этот метод поступил в арсенал средств инструментальной оптики.

Однако завершение работ по изучению свойств двумерных голограмм далеко не означало, что исследования в голографии закончились вообще. Еще в 1962 г. было обнаружено, что двумерная голограмма — это лишь частный случай трехмерной и что запись в трехмерной среде обладает гораздо более полным комплексом отображающих свойств [2, 3]. Переход от плоскости к трехмерному пространству не только расширил сферу исследований, но и одновременно предопределил переход голографии из области инструментальной оптики в область физики. В результате исследований в этом направлении стало постепенно выясняться, что в основе голографии лежит определенное явление, а именно способность материальной модели волны интенсивности воспроизводить волновое поле со всеми его параметрами — амплитудой, фазой, спектральным составом, состоянием поляризации и даже с изменениями этих параметров во времени. Изучение этого явления в настоящее время представляет собой главную научную цель голографии. В ходе этих исследований оказалось также, что трехмерная голограмма обладает целым рядом свойств, близких к свойствам человеческого мозга, а именно ассоциативной памятью, нечувствительностью памяти к повреждениям ее фрагментов и т. п. Новые перспективы открыли динамическая голография, органически объединяющая голографию в трехмерных средах с нелинейной оптикой, голография с записью в резонансных средах, а также допле-

ровская голография, основанная на записи бегущих волн интенсивности. Целью настоящего обзора является рассмотрение идей и представлений, лежащих в основе перечисленных направлений.

2. ОБЩАЯ СХЕМА ЗАПИСИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГОЛОГРАММЫ

Рассмотрим сначала в самом общем виде процесс записи и восстановления статической трехмерной голограммы.

При записи когерентное излучение W_s источника S , прошедшее на своем пути через объем V , заполненный прозрачным светочувствительным веществом, падает на объект O (рис. 1, а).



Рис. 1. К рассмотрению общего механизма записи и восстановления трехмерной голограммы. а — схема записи; б — схема восстановления; S' — источник излучения со сплошным спектром; V' — трехмерная голограмма; d_1' , d_2' , d_3' — зеркала, образовавшиеся на месте поверхностей пучностей стоячей волны; W_0' — волна излучения, восстановленного трехмерной голограммой; h — наблюдатель; O' — восстановленное голограммой объемное изображение объекта.

В этом объеме после экспозиции и соответствующего проявления образуется трехмерная голограмма — пространственная материальная модель стоячей волны. В зависимости от типа используемого фотоматериала и способа химической обработки эту модель можно изготовить, например, из металла, красителя, прозрачного диэлектрика и т. д. Во всех этих случаях зафиксированные голограммой поверхности пучностей стоячей волны d_1' , d_2' , d_3' и т. д. (рис. 1, б) можно рассматривать как систему своеобразных зеркал, поверхности которых имеют весьма сложную форму.

На рис. 1, б приведена схема восстановления трехмерной голограммы. На полученную рассмотренным способом голограмму V' направляется излучение точечного источника S' . Существенно, что в отличие от этапа записи этот источник может быть и монохроматическим; восстановление с трехмерной голограммы возможно также источником, имеющим сплошной спектр излучения.

При взаимодействии такой голограммы с восстанавливающим излучением точно воспроизводятся практически все параметры зарегистрированного на ней волнового поля объекта — амплитуда, фаза и спектральный состав. В частности, из сплошного спектра источника S' трехмерная голограмма сама выбирает и отражает излучение той длины волны, которая совпадает с длиной волны излучения, экспонировавшего голограмму во время записи. При этом после отражения от образовавшихся на месте поверхностей пучностей кривых зеркал d_1' , d_2' , d_3' и т. д. пространственная конфигурация первоначальной сферической волны восстанавливающего источника S' изменяется таким образом, что отраженная волна W_0' становится полностью идентичной волне W_0 , рассеянной объектом. Наблюдатель h , воспринимающий такую восстановленную волну, не может отличить ее от первоначальной объектной волны и, следовательно, видит объемное изображение O' объекта в цвете, соответствующем длине волны излучения, освещавшего объект при записи.

Таким образом, наиболее явные отличия трехмерной записи от двумерной сводятся к тому, что трехмерная голограмма допускает восстановление источником со сплошным спектром; при этом восстанавливается единственное изображение объекта в свете той длины волны, которая использовалась при записи. В этом случае также отсутствует ложное изображение, свойственное двумерной записи.

Простейшая интерпретация механизма записи и восстановления волнового поля с помощью трехмерной голограммы сводится к следующему. По своей сути поверхности пучностей стоячей волны, а следовательно, и зеркала, возникшие на их месте в объеме трехмерной голограммы, представляют собой геометрическое место точек, в которых фазы интерферирующих волн (в данном случае опорной и объектной волн) одинаковы. Очевидно, что в этих условиях восстанавливающая волна, достигая какого-либо из упомянутых зеркал, приобретает распределение фаз, совпадающее с распределением фаз объектной волны. В результате оказывается, что на поверхности каждого такого зеркала восстанавливающая и объектная волны отличаются лишь направлением своего распространения. Восстанавливающая волна движется слева направо, а объектная — справа налево. После отражения от такого «изофазного» зеркала направление распространения восстанавливающей волны изменится на противоположное, и она по всем пара-

метрам совпадает с объектной волной, т. е. преобразуется в объектную волну.

Таким образом, уже каждое из зеркал, образовавшихся на месте соответствующей поверхности пучностей, трансформирует падающую волну в волну излучения, рассеянного объектом. Роль всей системы следующих друг за другом зеркал сводится к тому, что такая структура, подобно липпмановской фотографии, выделяет из сплошного спектра и отражает излучение, длина волны которого совпадает с длиной волны излучения, экспонировавшего голограмму при записи.

3. КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГОЛОГРАММЫ; ПРИБЛИЖЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Проведенное выше рассмотрение по существу представляет собой схему одного из вариантов теории трехмерной голограммы в кинематическом приближении, которое исходит из предположения, что голограмма слабо воздействует на падающее на нее излучение. При таком условии можно ввести следующие существенные упрощения, а именно можно пренебречь изменением амплитуды восстанавливающей волны по мере ее проникновения в глубь голограммы и, кроме того, считать, что восстановленная волна покидает голограмму, не взаимодействуя снова с ее структурой. Такое приближение достаточно хорошо описывает качественный характер большинства эффектов, присущих трехмерной голограмме, даже в том случае, когда взаимодействие голограммы с падающим на нее излучением не является слабым, т. е. когда лежащие в основе этого приближения допущения грубо нарушаются.

Хотя кинематической теории свойствен главным образом один определенный механизм взаимодействия голограммы с излучением, однако в зависимости от того, на какие элементы раскладывается структура голограммы при расчете суммарной волновой функции восстановленного ею излучения, мы можем рассматривать различные варианты этой теории. Обсудим подробно некоторые из этих вариантов.

Механизм действия трехмерной голограммы можно описать, например, с помощью волнового и лучевого вариантов теории [3]. Оба этих варианта основаны на приближении геометрической оптики, которое предполагает существование непрерывных поверхностей пучностей. Такое приближение в свою очередь накладывает дополнительное требование, чтобы размеры объекта, записываемого на голограмме, были малы.

В этом приближении основным элементом разложения структуры голограммы является изофазный слой — тонкий слой голо-

граммы, заключенный между двумя поверхностями, соответствующими одинаковым значениям интенсивности стоячей волны. В частном случае изофазный слой может совпадать с максимумом интенсивности, т. е. с поверхностью пучностей. Для того чтобы найти уравнение поверхности такого слоя, запишем волновые функции ψ_S и ψ_O опорной и объектной волн соответственно в виде

$$\psi_S(r) = a_S e^{ik L_S(r)} \quad (1)$$

и

$$\psi_O(r) = a_O(r) e^{ik L_O(r)}, \quad (2)$$

где $k=2\pi/\lambda$ — волновое число, $L_S(r)$ и $L_O(r)$ — эйконалы соответственно опорной и объектной волн (функции, определяющие длину оптического пути).

Складывая выражения (1) и (2) и умножая результат на сопряженную величину, получаем распределение интенсивности стоячей волны, которая возникает в объеме голограммы при интерференции волн ψ_S и ψ_O :

$$I(r) = a_S^2 + a_O^2(r) + 2a_S a_O(r) \cos k(L_S - L_O). \quad (3)$$

В проявленной голограмме изофазный слой, как отмечалось выше, регистрируется в виде некоторой зеркальной поверхности. Приравнявая в выражении (3) аргумент косинуса некоторой постоянной, находим уравнение поверхности этого зеркала:

$$L_S(r) - L_O(r) = P. \quad (4)$$

Ход доказательств в волновом варианте теории в общих чертах сводится к следующему. Для того чтобы определить значение, которое принимает волновая функция восстановленного излучения на поверхности изофазного слоя, в выражении (1) эйконал восстанавливающей волны L_S в соответствии с уравнением (4) заменяется эйконалом объектной волны L_O , просуммированным с некоторой величиной P , постоянной для всех точек данного изофазного слоя. При этом волна $\psi_S(r)$ переходит в волну $\psi_O(r)$ и, следовательно, одиночный изофазный слой уже способен восстановить объектную волну. Суммарное действие объема голограммы учитывается интегрированием по всем изофазным слоям в пределах изменений параметра P , соответствующих изофазным поверхностям, проходящим через крайние точки объема голограммы (P_1 и P_2 на рис. 2а). Нетрудно показать, что результатом такого интегрирования является зависимость в виде δ -функции от длины восстанавливающей волны. Иными словами, интенсивность восстановленного голограммой излучения отличается от нуля только в том случае, когда длина волны этого излучения близка к длине волны излучения, используемого при записи голограммы. Таким

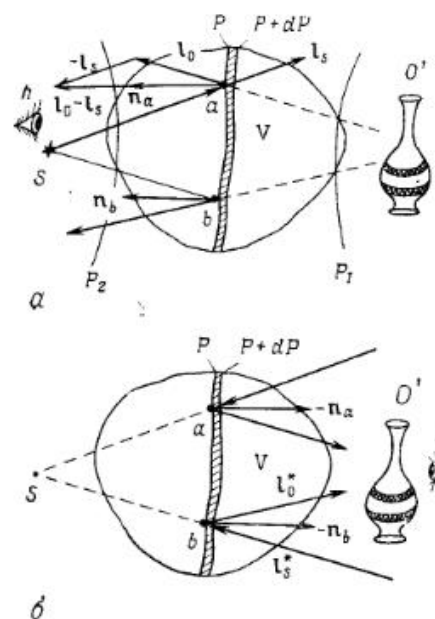


Рис. 2. К рассмотрению волнового и лучевого вариантов теории трехмерной голограммы. а — схема восстановления записанной на голограмме объектной волны (S — источник восстанавливающего излучения, располагающийся на том же месте, что источник, с помощью которого записывались голограммы; V — объем голограммы; P и $P+dP$ — поверхности, ограничивающие изофазный слой; l_s — лучевой вектор восстанавливающей волны; l_0 — лучевой вектор, восстановленный изофазным слоем объектной волны; n_a , n_b — нормали к поверхности изофазного слоя; P_1 и P_2 — изофазные поверхности, проходящие через крайние точки объема голограммы; O' — восстановленное изображение объекта, которое создает у наблюдателя h полную иллюзию присутствия этого объекта); б — схема восстановления волны, которая обращена по отношению к записанной на голограмме объектной волне (l_s^* — луч волны, сходящейся в точку S , в которой располагался источник излучения при записи голограммы; l_0^* — луч, восстановленный изофазным слоем обращенной волны, сходящейся в псевдоскопическое изображение объекта O' , воспринимаемое наблюдателем h').

образом выявляется эффект спектральной селекции, характерный для трехмерной голограммы.

Лучевой вариант теории трехмерной голограммы также основан на уравнении изофазного слоя (4), используя которое нетрудно определить соотношение, связывающее нормаль n к поверхности этого слоя и лучевые векторы волн, падающих на слой и отраженных им. В соответствии с законами аналитической геометрии единичный вектор нормали к поверхности, заданной уравнением (4), определяется градиентом левой части этого уравнения, нормированным к единице. Если при этом учесть, что эйконалы $L_s(r)$ и $L_0(r)$, приравненные константам, также являются уравнениями поверхностей волновых фронтов, а их градиенты определяют нормали к этим фронтам, т. е. лучевые векторы l_s и l_0 , то можно записать

$$n = \frac{l_s - l_0}{|l_s - l_0|}. \quad (5)$$

Из рис. 2, а, на котором приведено соответствующее этому соотношению построение, нетрудно понять, что нормаль n_a к поверхности изофазного слоя является биссектрисой угла, составленного векторами l_0 и $-l_s$. Из этого непосредственно следует, что каждый луч восстанавливающей волны l_s , который падает на зеркальную поверхность изофазного слоя, отражается ею в виде луча объектной волны

l_0 . Таким образом все семейство лучей волны, падающей на голограмму, преобразуется в семейство лучей объектной волны.

В лучевом представлении особенно просто и наглядно выступает весьма важное свойство голограммы, а именно ее способность создавать обращенную волну. Действительно, как это видно из рис. 2, б, геометрия лучей l_s , l_0 и нормали n такова, что изменение направления лучей восстанавливающей волны l_s на противоположное должно привести к соответствующему обращению направления лучей, отраженных изофазным слоем. В результате оказывается, что если голограмму восстановить излучением, сходящимся в точку, в которой был расположен источник излучения при записи, то она восстановит обращенную волну, т. е. волну, которая не расходится от объекта, а сходится к нему.

В классической оптике была неизвестна операция обращения волн. Свойства обращенных волн весьма необычны. В частности, изображение, созданное волной, обращенной с помощью голограммы, на которой была записана, например, ваза для цветов, имеет вид оттиска, полученного впечатыванием этой вазы в пластический материал. Все выпуклости вазы при этом будут казаться соответствующими впадинами.

На практике обращенная волна находит широкое применение для компенсации влияния различных оптических неоднородностей, поскольку такая волна, проходя через среду в обратном порядке, приобретает искажения обратного знака. Влияние оптических неоднородностей при этом полностью исключается [4].

4. ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ И ЧАСТОТНЫЙ ВАРИАНТЫ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ТРЕХМЕРНОЙ ГОЛОГРАММЫ

Рассмотренные ранее волновой и лучевой варианты теории трехмерной голограммы весьма наглядны, однако имеют тот недостаток, что в дополнение к ограничениям, накладываемым на величину дифракционной эффективности самим характером первого приближения, требуют также еще введения ограничений, свойственных приближению геометрической оптики. Вместе с тем такого рода ограничения совершенно не характерны для механизма записи голограммы, который, как известно, обеспечивает регистрацию не только малых объектов, но и объектов большой протяженности. В связи с этим рассмотрим два варианта теории, базирующейся на решении волнового уравнения, ограничиваясь при этом только рамками кинематического приближения и не накладывая каких-либо ограничений на размеры регистрируемого на голограмме объекта. В соответствии со смыслом характерных для этих представлений преобразований их можно назвать пространственным и частотным операторными вариантами теории трехмерной голограммы [2, 5].

Остановимся сначала на координатных представлениях. Пусть $\psi_s(r)$ и $\psi_0(r)$ — волновые функции излучения, создаваемого источником S и рассеянного объектом соответственно. Складывая эти функции ψ_s и ψ_0 и умножая результат на сопряженную величину, находим распределение интенсивности стоячей волны, записываемой в объеме голограммы:

$$I = a_s^2 + a_0^2(r) + \psi_0 \psi_s^* + \psi_0^* \psi_s; \quad (6)$$

здесь a_s и $a_0(r)$ — амплитуды соответствующих волновых функций. Нетрудно заметить, что модуляционные члены, являющиеся третьим и четвертым слагаемыми, обладают интересным свойством. Третий член представляет собой оператор поточечного преобразования волновой функции ψ_s в волновую функцию ψ_0 и соответствует случаю восстановления волны объекта. Четвертый член является оператором преобразования ψ_s^* в ψ_0^* и отвечает восстановлению обращенной волны. Введем для этих операторов специальные обозначения и запишем осуществляемые ими операции

$$G = \psi_0 \psi_s^*, \quad (7)$$

$$G\psi_s = a_s^2 \psi_0, \quad (8)$$

$$G^* = \psi_0^* \psi_s, \quad (9)$$

$$G^* \psi_s^* = a_s^2 \psi_0^*. \quad (10)$$

Рассмотрим, каким образом это свойство распределения интенсивности стоячей волны определяет отображающие свойства голограммы. Предположим, что после экспозиции и проявления в объеме голограммы образовался фотографический осадок, характеризующийся распределением диэлектрической проницаемости ϵ , пропорциональным интенсивности стоячей волны. Это распределение можно записать в виде

$$\epsilon = \epsilon_0 + \delta\epsilon, \quad (11)$$

где ϵ_0 — некоторое первоначальное значение диэлектрической проницаемости, а $\delta\epsilon$ — приращение, обусловленное экспозицией, причем

$$\delta\epsilon = \kappa I; \quad (12)$$

здесь κ — некоторый коэффициент пропорциональности, а I — функция распределения интенсивности стоячей волны, определяемая выражением (6). Волновая функция излучения, восстановленного голограммой, должна удовлетворять уравнению Гельмгольца

$$\nabla^2 \psi + \epsilon k^2 \psi = 0. \quad (13)$$

Запишем решение этого уравнения в виде суммы двух волновых функций: волновой функции ψ_s , удовлетворяющей уравнению

невозмущенной задачи, и малого возмущения ψ_t , обусловленного появлением небольшого приращения диэлектрической проницаемости. Таким образом,

$$\psi = \psi_s + \psi_t. \quad (14)$$

Подставляя это равенство и выражение (11) в (13), получаем

$$\nabla^2 \psi_s + \epsilon_0 k^2 \psi_s + \delta\epsilon k^2 \psi_t + \nabla^2 \psi_t + \epsilon_0 k^2 \psi_t + \delta\epsilon k^2 \psi_s = 0. \quad (15)$$

В этом уравнении первые два члена обращаются в нуль, в силу того что они удовлетворяют уравнению невозмущенной задачи. Третьим членом можно пренебречь, поскольку он содержит произведение двух малых величин $\delta\epsilon$ и ψ_t . Оставшиеся три члена образуют неоднородное уравнение Гельмгольца

$$\nabla^2 \psi_t + \epsilon_0 k^2 \psi_t + \delta\epsilon k^2 \psi_s = 0. \quad (16)$$

Решение этого уравнения записывается в виде

$$\psi_t = \frac{1}{2\pi} \int_V \frac{\delta\epsilon k^2 \psi_s e^{ikr}}{r} dV. \quad (17)$$

Подставляя сюда значение $\delta\epsilon$, найденное из выражений (12) и (6), и ограничиваясь одним слагаемым $\delta\epsilon$, соответствующим оператору G , определяемому формулой (7), в соответствии со свойством этого оператора (8) находим

$$\psi_t = \frac{1}{2\pi} \int_V \frac{\kappa k^2 \psi_0 e^{ikr}}{r} dV. \quad (18)$$

Это выражение по существу определяет значение, которое имеет в некоторой точке наблюдения h волна, созданная источниками, колеблющимися в каждой точке объема голограммы V синфазно с волной ψ_0 излучения, рассеянного объектом. Действительно, как это видно из выражения (18) (см. также рис. 3), каждый элементарный объем голограммы dV испускает колебания с амплитудой $\psi_0(r)$. Распространяясь от объема dV до точки наблюдения h , удаленной от него на расстояние r , амплитуда испущенной этим объемом волны уменьшается обратно пропорционально пройденному волной пути r , а набег фазы на этом пути равен e^{ikr} .

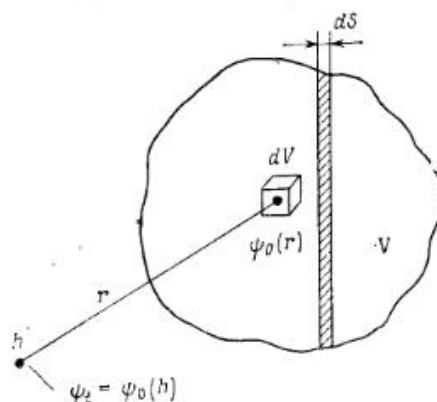


Рис. 3. К рассмотрению пространственного варианта кинематической теории трехмерной голограммы. V — объем трехмерной голограммы; dV — элемент объема; h — точка наблюдения; r — радиус-вектор, связывающий точку наблюдения с элементом объема dV ; dS — один из плоских слоев, на которые можно разбить объем голограммы при интегрировании с использованием формулы Кирхгофа — Зоммерфельда; $\psi_0(r)$ — волновая функция излучения объекта, восстановленная в точках объема голограммы; $\psi_t = \psi_0(h)$ — созданная излучением всех точек объема волновая функция, которая совпадает со значением объектной волны в точке h .

Нетрудно понять, что имеющая такой смысл функция ψ_i определяет волну, совпадающую по существу с объектной волной ψ_o . Убедиться в этом можно несколькими способами. В частности, можно заметить, что выражение (18) формально совпадает с выражением, описывающим объектную волну, которая пересекла на своем пути объем V , заполненный усиливающей средой [2, 5]. Очевидно, что в результате такого усиления увеличится лишь амплитуда объектной волны, а форма ее волнового фронта останется без изменения. Другой вариант отождествления волновой функции ψ_i основан на выполнении интегрирования по объему V посредством разбиения этого объема на плоские слои толщиной dS (рис. 3). В соответствии с известной формулой Кирхгофа — Зоммерфельда интеграл по каждому такому слою с точностью до незначительного (в данном случае косинусного члена) будет равен значению волновой функции ψ_o в точке наблюдения h . Суммирование по всем слоям приводит лишь к увеличению амплитуды восстановленной объектной волны.

Перейдем теперь к рассмотрению частотного представления [5, 6]. В этом случае процесс записи и восстановления трехмерной голограммы рассматривается в пространстве Фурье. Запишем волновые функции падающего на голограмму и восстановленного ею излучения в виде разложения по плоским волнам, а структуру голограммы представим в виде разложения по трехмерным гармоникам. Тогда процесс восстановления голограммы можно рассматривать как преобразование каждой плоской волны в компоненты восстановленной волны посредством отражения от соответствующих гармоник голограммы. Таким образом, основным элементом разложения структуры голограммы является пространственная гармоника. Рассмотрим свойства таких гармоник более подробно.

Предположим, что волновые функции падающего на голограмму излучения и излучения, рассеянного объектом, представлены в виде разложения по плоским волнам, и выделим по одной компоненте φ_s и φ_o из этих разложений:

$$\varphi_s = a_s e^{ik_s r} \quad (19)$$

и

$$\varphi_o = a_o e^{ik_o r}, \quad (20)$$

где k_s и k_o — волновые векторы, нормальные фронтам интерферирующих плоских волн. При этом имеет место очевидное в данном случае соотношение

$$|k_s| = |k_o| = k = 2\pi/\lambda_n, \quad (21)$$

где λ_n — длина волны в среде, в которой происходит интерференция. Складывая величины φ_s и φ_o и умножая результат на

сопряженную величину, находим интенсивность стоячей волны, образующейся при интерференции рассматриваемых плоских волн:

$$I_q = a_s^2 + a_o^2 + 2a_s a_o \cos(k_s - k_o) r. \quad (22)$$

Нетрудно заметить, что это выражение описывает пространственную гармонику, пространственная частота и ориентация которой характеризуются вектором решетки K , аналогичным по физическому смыслу волновому вектору k :

$$K = k_s - k_o. \quad (23)$$

Пространственный период гармоники Λ связан с величиной вектора решетки K соотношением, аналогичным (21):

$$|K| = 2\pi/\Lambda \quad (24)$$

На рис. 4 представлена схема образования пространственной гармоники. Из рисунка следует, что волновые векторы интерферирующих плоских волн связаны с вектором решетки соотношением

$$|K| = 2k \sin \theta \quad (25)$$

Подставив в это выражение значения $|K|$ и k из (24) и (21), получим зависимость длины волны от угла между интерферирующими плоскими волнами и от пространственного периода образованной этими волнами гармоники:

$$\lambda_n = 2\Lambda \sin \theta. \quad (26)$$

Предположим, что образованная при интерференции плоских волн гармоника интенсивности записана на голограмме, в результате чего мы получили структуру, диэлектрическая проницаемость которой также изменяется по гармоническому закону. Как известно, в соответствии с условием Брэгга такая пространственная решетка отражает только те плоские волны, угол падения которых θ и длина волны λ удовлетворяют соотношению, совпадающему в точности с выражением (26). Остальные плоские волны проходят через эту структуру беспрепятственно.

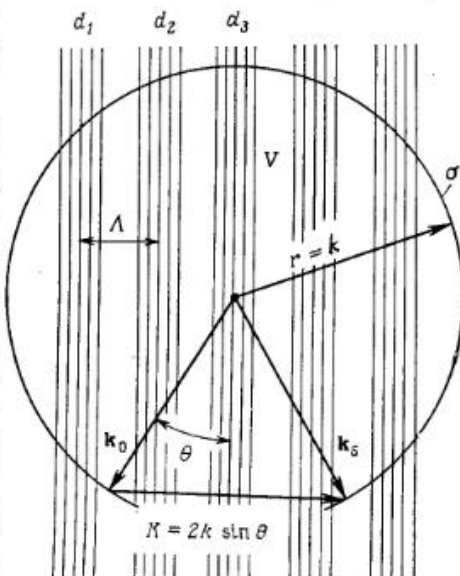


Рис. 4. К рассмотрению частотного варианта кинематической теории трехмерной голограммы. V — объем трехмерной голограммы; k_o и k_s — волновые векторы плоских волн, интерферирующих в объеме голограммы; d_1, d_2, d_3 — поверхности пучностей гармоники, образовавшейся при интерференции плоских волн; K — вектор решетки этой гармоники; Λ — ее пространственный период; σ — поверхность сферы Эвальда.

Таким образом, условие отражения излучения от пространственной гармоники имеет тот же вид, что и условие ее образования. Очевидно, что при этих обстоятельствах каждая из гармоник, взаимодействуя с излучением, выберет из него именно ту составляющую, которая участвовала в образовании этой гармоники при записи, и преобразует ее в соответствующую составляющую волновой функции излучения, рассеянного объектом. Рассматривая интерференцию всех плоских волн, из которых составлено падающее излучение, с плоскими волнами излучения, отраженного объектом, и используя упомянутое свойство пространственной гармоники, образованной при интерференции двух плоских волн, можно показать, что волновые функции излучения, отраженного трехмерной голограммой и объектом, совпадают.

При использовании частотного варианта теории весьма полезно опираться на понятие «сферы взаимодействия», или «сферы Эвальда». Этот геометрический образ непосредственно следует из выражения (23), которое связывает вектор решетки \mathbf{K} с волновыми векторами взаимодействующих с этой решеткой волн, а также из неявно сопровождающего это выражение условия равенства абсолютных значений этих волновых векторов.

Очевидно, что в частотном пространстве условие равенства длин волн полей излучения, интерферирующих при записи голограммы, а также полей излучения, падающего на голограмму и отраженного ею при восстановлении, сводится к тому, что концы волновых векторов, описывающих это излучение плоских волн, должны находиться на поверхности сферы σ , радиус которой равен волновому числу k (рис. 4). При этом из выражения (23) следует, что концы векторов всех решеток, которые можно записать в объеме голограммы или считать излучением на данной длине волны, также должны касаться поверхности указанной сферы.

Наиболее существенные следствия частотного варианта теории трехмерной голограммы получил ван Хирден, который предложил так называемую запись трехмерных голограмм без использования опорной волны. Он показал, что процесс считывания трехмерной голограммы обладает свойством ассоциативности, похожим на ассоциативную память мозга, а также предложил использовать трехмерную голограмму для сверхплотной записи информации [6].

5. ТЕОРИЯ СВЯЗАННЫХ ВОЛН И МОДОВАЯ ТЕОРИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГОЛОГРАММЫ

Как уже отмечалось, кинематическая теория, правильно описывая основной механизм трехмерной голограммы, не дает количественных соотношений; в частности, с ее помощью нельзя рассчитать дифракционную эффективность. Вместе с тем знание закономерностей, которые определяют эту весьма важную величину,

и параметров, от которых она зависит, играют определяющую роль при разработке технологии изготовления фотоматериалов, предназначенных для записи тех или иных типов трехмерных голограмм. При этом для оценки качества фотоматериала, как правило, используют некоторую условную величину — дифракционную эффективность простейшей объемной решетки, полученной в результате регистрации картины интерференции двух плоских

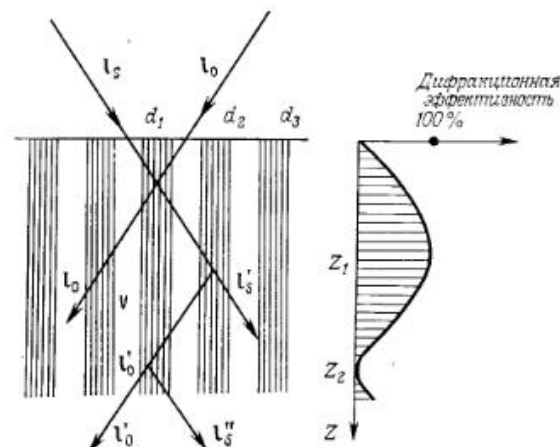


Рис. 5. К рассмотрению теории связанных волн. V — объем голограммы; l_0 и l_s — лучевые векторы плоских волн, экспонировавших голограмму при записи; d_1, d_2, d_3 — слои диэлектрика, образовавшиеся на месте поверхностей пучностей стоячей волны. Голограмма при освещении ее волной l_0 восстанавливает волну с лучевым вектором l'_0 , параллельным l_s , в свою очередь волна l'_0 восстанавливает волну l_0 , волна l'_0 — волну l'_s и т. д. Интенсивность восстановленной голограммой волны определяется посредством суммирования всех составляющих l_s, l'_s и т. д. с учетом их фаз. Справа приведен график зависимости дифракционной эффективности от толщины голограммы.

волн. Именно в применении к решению этой весьма важной задачи и используется в основном теория связанных волн, предложенная американским исследователем Когельником [7]. Рассмотрим соответствующий этой теории механизм взаимодействия света с решеткой несколько подробнее.

Предположим, что на голограмме записаны две плоские волны с лучевыми векторами l_s и l_0 , и что после проявления в ее объеме образовалась гармоническая фазовая решетка — система плоских слоев d_1, d_2, d_3, \dots , отличающихся значением показателя преломления (рис. 5). Пусть при восстановлении на такую структуру падает одна из образовавших ее плоских волн, например l_0 . В соответствии с представлениями кинематической теории восстанавливающая волна l_0 , проходя без затухания через объем го-

лограммы, преобразуется во всех точках этого объема в волну I_s , которая выходит из голограммы, не взаимодействуя с ее структурой.

Теория связанных волн внесла в эти представления уточнения. Очевидно, что восстановленная волна I_s , прежде чем покинуть объем голограммы, испытает взаимодействие с ее структурой и в результате частично преобразуется в волну I_0 , совпадающую по направлению с волной I_0 — второй из волн, записанных на голограмме. Волна I_0 в свою очередь снова трансформируется в волну I_s , совпадающую по направлению с волной I_s , и т. д.

Таким образом, на первоначальные падающую и восстановленные волны накладываются вторичные волны, совпадающие с ними по направлению, но отличающиеся по фазе. Результат сложения этих волн не является тривиальным. Например, в рассматриваемом случае при некоторой толщине голограммы Z_1 вся энергия перекачивается в волну I_s , т. е. дифракционная эффективность становится равной 100%. При дальнейшем увеличении толщины голограммы до значения Z_2 вся энергия переходит в волну I_0 , и дифракционная эффективность голограммы становится равной нулю и т. д.

Последовательность преобразований теории связанных волн сначала формально совпадает с соответствующей последовательностью теории первого приближения [см. выражения (13) — (15)]. Отличие состоит лишь в том, что в выражении (14) волны ψ_s и ψ_t считают равноправными и в выражении (15) поэтому нельзя пренебречь третьим членом. Учет связи падающей и восстановленной голограммой волн основан на рассмотренном ранее свойстве структуры голограммы преобразовывать в каждой своей точке одну из интерферирующих компонент в другую [см. выражение (8)]. В частном случае, когда на голограмме записана пара плоских волн, амплитуда которых не зависит от пространственных координат, указанное свойство действительно как при преобразовании ψ в ψ_t , так и наоборот. Учитывая это, а также опуская члены, соответствующие преобразованиям типа (10), выражение (15) можно записать следующим образом:

$$\nabla^2 \psi_s + \epsilon_0 k^2 \psi_s + \kappa k^2 a_t \psi_s + \nabla^2 \psi_t + \epsilon_0 k^2 \psi_t + \kappa k^2 a_s \psi_t = 0. \quad (27)$$

Поскольку это уравнение выполняется при произвольном выборе пары плоских волн ψ_t и ψ_s , записываемых на голограмме, то суммы членов, одна из которых содержит только ψ_s , а другая — ψ_t , должны обращаться в нуль по отдельности. Следовательно, мы получаем систему двух уравнений:

$$\nabla^2 \psi_s + \epsilon_0 k^2 \psi_s + \kappa k^2 a_t^2 \psi_s = 0, \quad (28)$$

$$\nabla^2 \psi_t + \epsilon_0 k^2 \psi_t + \kappa k^2 a_s^2 \psi_t = 0. \quad (29)$$

Нетрудно заметить, что эти уравнения связаны друг с другом: в уравнение для волновой функции ψ входит амплитуда волновой функции ψ_t , и наоборот. Подставляя в (28) и (29) вместо ψ_s и ψ_t

выражения для плоских волн, аналогичные (19) и (20), получаем два уравнения для амплитуд a_s и a_t , с помощью которых можно найти зависимость этих амплитуд от толщины голограммы.

Используя такой подход, Когельник рассмотрел наиболее характерные случаи записи. В частности, он показал, что дифракционная эффективность фазовой отражательной решетки при некоторой достаточно большой толщине стремится к 100%. Дифракционная эффективность такой же амплитудной решетки не превышает 7,2%.

Однако следует заметить, что теорию связанных волн нельзя рассматривать как теорию трехмерной голограммы во втором приближении. Действительно, голограмма по своему физическому смыслу представляет собой запись информации о сложном волновом поле, которое можно представить в виде суммы множества плоских волн. Поэтому решетку, образованную в результате записи картины интерференции двух плоских волн, свойства которой рассматриваются в теории Когельника, можно назвать голограммой только условно.

Теорию Когельника нельзя считать теорией даже элементарного механизма голограммы — процесса записи и восстановления двух плоских волн, на основе которого можно было бы разработать общую теорию, учитывающую закономерности записи и воспроизведения произвольного волнового фронта, составленного из множества плоских волн. Трудность здесь обусловлена тем, что одна и та же плоская волна, как правило, участвует в создании множества решеток. В таких условиях практически все решетки оказываются связанными друг с другом, и поле излучения, восстановленное голограммой, в отличие от первого приближения уже нельзя представить в виде простой суммы полей, соответствующих отдельным решеткам. При этом теория Когельника не дает ответа на основной вопрос о том, как учесть все эти связи.

Более плодотворным путем развития теории трехмерной голограммы оказался подход, предложенный Эвальдом [8] и основанный на идеях динамической теории дифракции рентгеновских лучей. Первоначально эта теория применялась для изучения простой объемной голографической решетки [9]. Впервые для анализа собственно объемной голограммы, т. е. структуры, составленной из множества решеток, ее использовали Аристов и Шехтман (см., например, [10]). В этих работах, в частности, было показано, что, в случае когда голограмма получена с участием мощной опорной волны, а также когда записанная на голограммах волна имеет сложную структуру, для определения интенсивности восстановленной волны можно пользоваться формулами Когельника.

Представления, основанные на динамической теории дифракции, нашли наибольшее выражение в так называемой модовой теории трехмерной голограммы, предложенной Сидоровичем [11].

По существу эта теория обобщает введенное Эвальдом понятие волны, согласованной с периодической неоднородной структурой. В теории Эвальда это понятие удалось применить только к простейшей объемной решетке — пространственной гармонике показателя преломления. Например, в случае, представленном на рис. 6, согласованными волнами фазовой решетки G являются две пары плоских волн — пара, характеризующаяся волновыми векторами I_s и I'_s , и пара I_0 и I'_0 . Пара I_s и I'_s образует стоячую волну, максимумы распределения интенсивности которой совпадают с максимумами d_1, d_2, d_3 функции распределения показателя преломления решетки. Распределение интенсивности такой стоячей волны приведено в нижней части рисунка в виде сплошной кривой. Пара I_0 и I'_0 образует стоячую волну, максимумы которой совпадают с минимумами показателя преломления решетки. На рис. 6 соответствующая кривая отмечена штриховой линией. Таким образом, первая согласованная волна распространяется как бы через однородную среду с показателем преломления n_{\max} , а вторая — через среду с показателем преломления n_{\min} . При этом решетка действует так, как если бы различные согласованные волны, проходя через среды с различными значениями показателя преломления, изменяли бы свою относительную разность фаз.

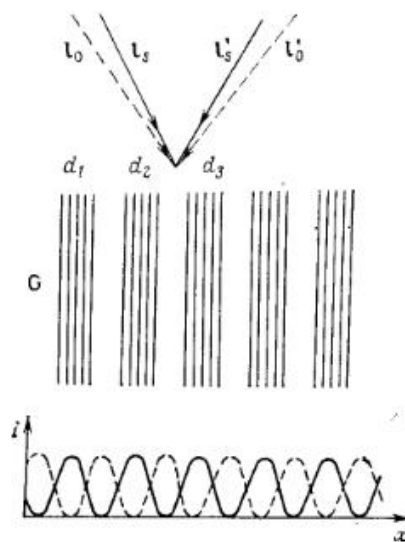


Рис. 6. К рассмотрению модовой теории трехмерной голограммы. Понятие волны, согласованной с периодической структурой. d_1, d_2, d_3 — слои гармоники G , характеризующиеся максимальным значением показателя преломления; I_s, I'_s — пара волн, создающая стоячую волну, максимумы которой совпадают со слоями d_1, d_2, d_3 ; I_0, I'_0 — пара волн, создающая стоячую волну, максимумы которой располагаются между слоями d_1, d_2, d_3 . Внизу приведен график распределения интенсивности стоячей волны $I(x)$.

Обсуждаемая модовая теория трехмерной голограммы доказывает то, что согласованные волны (моды) можно сопоставлять не только простейшим периодическим структурам, но также и трехмерным голограммам — объемным структурам, полученным в результате регистрации интенсивности сложных волновых полей. Оказывается, что каждой трехмерной голограмме соответствует полная система согласованных с нею волн (мод) и что любую волну, эффективно взаимодействующую с трехмерной голограммой, можно

разложить по этим модам. В частности, применительно к фазовой голограмме теория предполагает, что каждая мода проходит через голограмму как через однородную среду с определенным показателем преломления. В этом случае действие голограммы состоит в том, что она сдвигает относительную разность фаз между модами.

В общих чертах рассмотрение проводится следующим образом. Волну, записанную на голограмме, представляют в виде суммы N плоских волн:

$$\psi_0 = \sum_{n=1}^N a_n e^{i k_n r}. \quad (30)$$

Подставив это значение ψ_0 в выражение (6), найдем с помощью соотношения (12) функцию распределения диэлектрической проницаемости голограммы:

$$\delta\epsilon = \kappa \sum_{n,m} a_n a_m e^{i(k_n - k_m)r}. \quad (31)$$

Будем считать, что условиям распространения света через данную среду удовлетворяют специальные волновые функции (моды)

$$\psi'_0 = \sum_{s=1}^N a'_s e^{i k'_s r}. \quad (32)$$

Относительно этих функций предполагается, что они составлены из тех же плоских волн, которые участвовали в записи голограммы, однако их направления распространения вследствие изменения диэлектрической проницаемости среды после экспозиции стали несколько другими. Кроме того, будем считать, что для любых компонент данной моды это изменение диэлектрической проницаемости одинаково. Все эти условия имеют вид специальных соотношений между волновыми векторами моды k'_s и волновыми векторами k_n излучения, записанного на голограмме.

Подставляя в уравнение Гельмгольца (13) выражение (32) для ψ'_0 и учитывая упомянутые соотношения между k_n и k'_s , можно получить систему N уравнений, связывающих амплитуды компонент моды с амплитудами составляющих поля, записанного на голограмме. В матричной форме эти уравнения имеют вид

$$\|\delta\epsilon_{n,m}\| \|a'_s\| = \delta\epsilon^l \|a'_s\|,$$

где $\|\delta\epsilon_{n,m}\|$ — матрица голограммы, составленная из коэффициентов, $\kappa a_n a_m$, $\|a'_s\|$ — линейная матрица амплитуд l -й моды, $\delta\epsilon^l$ — значение диэлектрической проницаемости, соответствующее l -й моде. Таким образом, задача сводится к нахождению собственных функций и собственных значений оператора $\|\delta\epsilon_{n,m}\|$, характеризующего структуру голограммы. Поскольку этот оператор является самосопряженным, система его собственных функций (мод) состав-

ляет полный ортогональный базис, по которому можно разложить любую волновую функцию, составленную из плоских волн, экспонировавших голограмму.

Модовая теория существенно упрощает рассмотрение процессов, протекающих в трехмерной голограмме, благодаря тому, что она автоматически учитывает очень сложные взаимные связи между рассеянием света на множестве решеток, из которых составлена голограмма, а также и потому, что аналогично теориям первого приближения представляет результат в виде суперпозиции независимых функций. Конкретно модовая теория была развита в применении к фазовым пропускающим [11, 12], амплитудным усиливающим [13] и трехмерным отражательным голограммам [14]. В настоящее время наиболее актуальным является применение модовой теории к описанию отражения света «бриллюновским зеркалом» [15]. В данном случае модовая теория правильно предсказывает значение полного коэффициента усиления в среде, которое необходимо, чтобы амплитуда обращенной волны превышала шум. Модовая теория позволяет также сформулировать условия устойчивости обращенной волны при ее распространении сквозь усиливающую голограмму. Все это нашло подтверждение в большом числе экспериментов.

6. НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕХМЕРНЫХ ГОЛОГРАММ, ЗАПИСАННЫХ В АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

В заключение рассмотрения вопросов теории остановимся кратко на особенностях взаимодействия света с трехмерными голограммами, записанными в анизотропных средах. Поскольку для записи трехмерных голограмм широко используются кристаллы, например ниобат лития, изучение этих сред играет весьма важную роль не только в вопросах теории, но также и в практических приложениях. Трехмерная фазовая голограмма, записанная в анизотропной среде, характеризуется не изменением показателя преломления, а вариациями тензора диэлектрической проницаемости, т. е. имеет существенно анизотропный вид. Свойства таких голограмм были наиболее подробно исследованы Степановым и др. [16—21].

Одной из особенностей анизотропных голограмм является то, что из-за различия показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей условия Брэгга для этих лучей выполняются при различных углах падения света на голограмму. На основе этого свойства была осуществлена запись волны с произвольным состоянием поляризации на одной голограмме за счет раздельной и независимой записи голограмм, соответствующих обыкновенному и необыкновенному лучам.

Однако, пожалуй, наиболее интересным свойством анизотропных решеток оказалась их способность изменять состояние поляризации падающей на них волны. Такое взаимодействие света с решеткой Степанов и др. назвали анизотропной дифракцией. На рис. 7 приведена векторная схема этого явления.

Изображенные на рисунке окружности σ_o и σ_e представляют собой сечения плоскостью чертежа поверхностей волновых векторов обыкновенного и необыкновенного лучей в отрицательном одноосном кристалле (например, в ниобате лития). Оптическая ось кристалла в данном случае перпендикулярна плоскости рисунка. Поверхность волновых векторов обыкновенного луча σ_o представляет собой обычную сферу Эвальда. Соответствующая поверхность необыкновенного луча σ_e является эллипсоидом, вытянутым вдоль оптической оси кристалла. Предполагается также, что в кристалле записана решетка, характеризующаяся вектором решетки K .

В случае изотропной дифракции, т. е. такой, при которой состояние поляризации волны не меняется, для обыкновенного луча условию Брэгга удовлетворяет взаимная трансформация волн концы волновых векторов которых k_{o1} и k_{o2} располагаются в точках, в которых конец вектора решетки K касается сферы Эвальда σ_o . Соответственно для необыкновенного луча изотропная дифракция характеризуется взаимным преобразованием волн, концы волновых векторов которых k_{e1} и k_{e2} находятся на поверхности σ_e .

Что же касается анизотропной дифракции, при которой обыкновенный луч преобразуется в необыкновенный и наоборот, то она возникает при так называемом межмодовом переходе, когда вектор решетки K соединяет разноименные поверхности σ_o и σ_e . Условию Брэгга в этом случае удовлетворяют взаимные трансформации пар волн, концы волновых векторов которых k_{o3} и k_{e3} , k_{o4} и k_{e4} находятся в точках, где вектор решетки K касается вол-

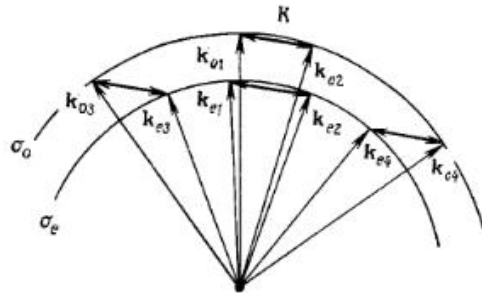


Рис. 7. Векторная схема анизотропной дифракции света на решетке, записанной в отрицательном одноосном кристалле. σ_o — поверхность волновых векторов обыкновенного луча; σ_e — поверхность волновых векторов необыкновенного луча; K — вектор решетки, записанной в кристалле; k_{o1} и k_{o2} — волновые векторы волн, удовлетворяющих условию Брэгга при изотропной дифракции обыкновенного луча на решетке K ; k_{e1} и k_{e2} — соответствующие волновые векторы для необыкновенного луча; k_{o3} и k_{e3} , k_{o4} и k_{e4} — волновые векторы волн, удовлетворяющих условию Брэгга при анизотропной дифракции, сопровождающейся поворотом плоскости поляризации.

новых поверхностей σ_o и σ_e . Существование такого вида дифракции было подтверждено соответствующими экспериментами с кристаллами ниобата лития.

Из рис. 7 следует, что при анизотропной дифракции геометрия процесса считывания голограммы существенно искажается по отношению к изотропному случаю. В рассмотренной работе было показано, что такого рода искажение создает благоприятные условия при считывании голограммы излучением, длина волны которого отличается от использованной при записи. Эта возможность играет важную роль для практики, поскольку благодаря ей можно осуществить «недеструктивное» считывание, т. е. такое, при котором считывающая волна не стирает записанную ранее на голограмме информацию.

7. ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКОСЛОЙНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ГОЛОГРАММ В ИЗОБРАЗИТЕЛЬНОЙ И ПРОЕКЦИОННОЙ ТЕХНИКЕ

Одно из первых практических приложений трехмерная голография нашла в изобразительной голографии [2] и в создании голограммных отражательных фокусирующих элементов [2, 3]. В обоих этих случаях голограмма записывается на относительно небольшую глубину ($\sim 6-10$ мкм), при этом в качестве светочувствительной среды используются либо липпмановские фотопластинки, либо слой бихромированной желатины.

Изобразительные трехмерные «отражательные» голограммы получают по схеме, которая в общих чертах совпадает с приведенной на рис. 1. Основным достоинством таких голограмм является то, что для их восстановления не требуется лазер; благодаря селективным свойствам трехмерной записи эти голограммы могут быть восстановлены с помощью обычного источника со сплошным спектром — лампой накаливания, дуговой лампой и т. п. Это свойство трехмерных отражательных голограмм существенно упрощает решение технических вопросов, связанных с их экспозицией, а также дает гарантию безопасности для глаз наблюдателя (зрителя).

В настоящее время техника получения изобразительных трехмерных голограмм достигла высокой степени совершенства. В Советском Союзе Протас и Кириллов разработали специальные высокочувствительные липпмановские фотопластинки со сверхвысоким разрешением, на которых могут быть получены голограммы с дифракционной эффективностью до 50% [22—24]. В США Шанков разработал фотослой на основе бихромированной желатины, который имеет более низкую светочувствительность по сравнению с липпмановскими фотопластинками и позволяет по-

лучить голограммы с дифракционной эффективностью около 100% [25].

На основе липпмановских фотопластинок Соболев, а также некоторые другие исследователи получили крупноформатные (с размерами до 600×800 мм) изобразительные отражательные голограммы, которые позволяют создавать эффектные объемные монохроматические изображения золотых изделий, оружия, фарфоровых статуэток и т. д. [26, 27]. Эти голограммы с успехом экспонировались на многих выставках и в музеях.

Освоение в США технологии записи голограмм в слое бихромированной желатины позволило наладить мелкосерийный промышленный выпуск голограмм-украшений в виде значков, кулонов, брошей и т. п.

Дальнейшее развитие изобразительных трехмерных отражательных голограмм связано с разработкой метода, который позволил бы воссоздать также и цвет зарегистрированных на них объектов. С точки зрения теории разработка такого метода не должна вызывать затруднений, поскольку для этого достаточно лишь записать голограмму одновременно в свете трех длин волн — красной, синей и зеленой. При восстановлении благодаря своим селективным свойствам трехмерная голограмма воспроизведет все три цветоделенных изображения одновременно. Сложение этих изображений даст единое цветное изображение объекта.

Основная трудность, которая стоит в настоящее время на пути создания цветных отражательных голограмм, заключается в необходимости разработки такого фотографического слоя, который после проявления оставался бы достаточно прозрачным для длин волн, регистрируемых на голограмме. В настоящее время эта проблема решается либо за счет комбинации липпмановских слоев со слоями бихромированной желатины, либо за счет применения специальных методов отбеливания.

Освоение технологии получения цветных голограмм, а также методов их регистрации с помощью импульсных лазеров позволит снять все существующие в настоящее время ограничения на цвет, стабильность и фактуру голографируемых объектов, и изобразительные отражательные голограммы найдут широкое применение в музейном деле, для получения объемных портретов, а также для украшения интерьеров общественных зданий и частных квартир.

Голограммные отражательные фокусирующие элементы представляют собой голограммы с записью интерференционной картины двух встречных волновых фронтов с разными кривизнами. Такие элементы, помимо того что они могут преобразовывать одну из записанных на них волн в другую, выполняют функции сферических зеркал, используемых в классической оптике.

В настоящее время наиболее широкое распространение такие элементы получили в авиационной приборостроении, где они используются

в устройствах для введения информации в поле зрения пилотов [28]. На рис. 8 приведена принципиальная схема такого устройства. На лобовое стекло самолета G наносится слой бихромированной желатины H , на котором записывается голограмма, способная преобразовать сферический волновой фронт, исходящий из некоторой точки f , в пучок параллельных лучей L_1 , L_2 . Установленная

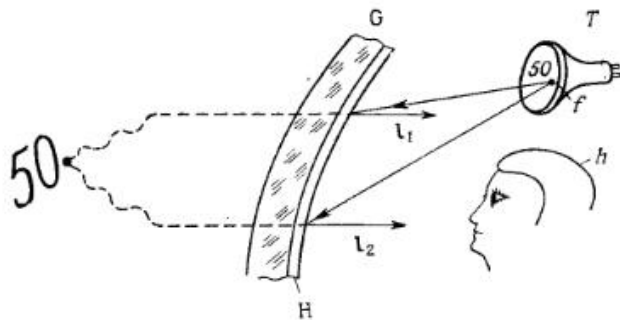


Рис. 8. Схема голограммного отражательного фокусирующего элемента, используемого для введения информации в поле зрения пилота. G — лобовое стекло самолета; H — нанесенный на нем голографический фокусирующий элемент; T — телевизионная трубка, на которую выводится информация; h — пилот.

на самолете такая голограмма не мешает наблюдению, поскольку отражает излучение только в достаточно узком спектральном интервале, а в остальном диапазоне длин волн является прозрачной.

Необходимая пилоту информация, например значения высоты, скорости полета и т. д., выводится на телевизионную трубку T , которая испускает свет в спектральном диапазоне, соответствующем максимуму отражения голограммного элемента, и располагается в районе его фокальной плоскости, т. е. вблизи точки f . Голограммный фокусирующий элемент проецирует изображение экрана трубки со всеми появляющимися на нем метками прямо в поле зрения пилота h таким образом, что эти метки кажутся пилоту удаленными на бесконечность, т. е. в то место, в которое сфокусирован его зрительный аппарат во время полета. Очевидным достоинством такой системы является то, что пилоту в этом случае нет необходимости переводить взгляд с местности на приборную доску, чтобы получить необходимую ему информацию. Предполагается, что такая система сможет найти применение и в автомотостроении.

Оптические элементы, выполненные в виде тонкослойных трехмерных голограмм, начали успешно применяться и в ряде других областей: в качестве дисперсионных элементов оптических резонаторов [29], для проекции объемных изображений зрителю [30] и т. п.

8. СВЕРХПЛОТНАЯ И АССОЦИАТИВНАЯ ПАМЯТЬ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНЫХ ГОЛОГРАММ С ГЛУБОКОЙ ЗАПИСЬЮ

Развитие голографии с записью на относительно большую глубину стимулируется в основном попытками осуществить идею американского исследователя ван Хирдена, который предложил использовать уникальные возможности трехмерной голографии для создания оптической памяти с чрезвычайно большой емкостью [6]. По мнению ван Хирдена, сходство некоторых свойств голограммы и мозга подтверждает гипотезу английского физиолога Берля о том, что мозг хранит каждый бит информации не в одиночной пространственно-локализованной ячейке, а в виде одиночной пространственной гармоник возбуждения, заполняющей весь объем мозга [31]. Такой способ хранения информации имеет ряд достоинств. Например, в этом случае повреждение одного или нескольких участков мозга не вызывает полного исчезновения какой-либо части записанной в нем информации.

Вход в такую «нелокализованную» память весьма удобен. В отличие от памяти на пространственных ячейках, когда каждая расположенная внутри объема ячейка должна быть соединена с входным устройством специальным нервным волокном, в данном случае каждый элемент соединен только с ближайшими соседями.

Потенциальная емкость такого рода памяти грандиозна. Ван Хирден показал, что число независимых гармоник, с помощью которых можно записать информацию, равно объему голограммы, деленному на кубик с линейными размерами порядка длины волны света, используемого при ее записи. Для видимого света эта величина составляет порядка 10^{10} ячеек/см³.

Практическое уплотнение записи при использовании трехмерной голограммы достигается за счет того, что на один и тот же участок фотоматериала впечатывается одновременно много голограмм, отличающихся либо длиной волны записи, либо направлением опорного луча. Благодаря селективным свойствам трехмерной голограммы последующее считывание каждой из записанных голограмм можно провести независимо. Например, изображения O_1, O_2, \dots могут быть одновременно записаны в виде голограмм на одном и том же участке фотоматериала либо с помощью опорных волн, характеризующихся одним и тем же волновым фронтом R_1 и различными длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots$, либо с помощью опорных волн R_1, R_2, \dots , характеризующихся одной и той же длиной волны, но различными направлениями распространения (рис. 9).

Появление оптической памяти с емкостью, приближающейся к предельной теоретической емкости трехмерной голограммы, должно оказать существенное влияние на развитие вычислительных машин. В такой памяти можно было бы записать, например,

громадную таблицу данных, полученных в результате различных математических операций, по аналогии с тем, как это делается при составлении таблиц логарифмов или синусов, и затем по мере надобности извлекать эти данные из памяти, не производя громоздких вычислений. Аналогия трехмерной голограммы с мозгом

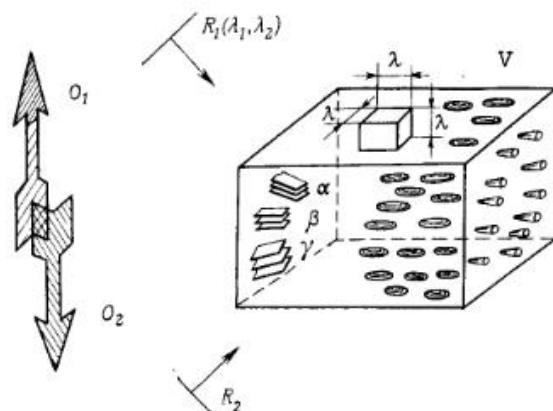


Рис. 9. К рассмотрению сверхплотной и ассоциативной памяти, реализуемой в трехмерных глубоких голограммах. V — объем голограммы, O_1 , O_2 — объекты, записываемые последовательно с помощью опорных волн $R_1(\lambda_1, \lambda_2)$ и R_2 , отличающихся направлением и длиной волны. Количество независимых ячеек при записи равно количеству кубиков $\lambda \times \lambda \times \lambda$, помещающихся в объеме V . Безопорная трехмерная голограмма формируется в случае, когда опорная волна отсутствует, и запись осуществляется только излучением точек самого объекта, например точек стрелки O_1 . Такая голограмма восстанавливает «по ассоциации» целое изображение объекта, если на нее падает излучение какой-либо его части — например, излучение точек острия стрелки O_1 .

простирается, по-видимому, гораздо дальше возможности создания сверхплотной памяти, нечувствительной к повреждению ее отдельных участков. В упомянутой работе ван Хирдена показано, что трехмерная голограмма может быть безопорной и что ей, как и мозгу, присуще свойство ассоциативной памяти.

Схему получения и восстановления трехмерной безопорной голограммы, т. е. такой, при записи которой не используется опорная волна, можно также уяснить из рис. 9. В этом случае при записи на голограмме регистрируется только излучение самого объекта, например стрелки O_1 , при этом опорная волна отсутствует. Излучение каждой точки объекта, интерферируя с излучением всех его остальных точек, запишет в объеме голограммы множество пространственных гармоник, отличающихся значением пространственного периода и ориентацией в пространстве (гармоники α , β , γ на рис. 9).

Такая голограмма восстанавливается излучением от какой-либо отдельной части записанного на ней объекта, например из-

лучением точек острия стрелки O_1 . Излучение каждой из таких точек в силу селективных свойств объемных пространственных гармоник будет взаимодействовать только с теми гармониками, в формировании которых это излучение участвовало во время записи¹⁾. При этом, поскольку излучение любой из точек острия стрелки взаимодействовало с излучением всех остальных точек стрелки, каждая из точек острия восстановит изображение всей стрелки в целом. Эти изображения, складываясь, усиливают друг друга, и в результате образуется единое яркое изображение стрелки. Таким образом, по отдельной части записанной на ней сцены (по острию стрелки) голограмма «вспомнила» всю сцену, т. е. восстановила изображение всей стрелки.

Замечательной особенностью этого на первый взгляд простого процесса является то, что он весьма схож с ассоциативной памятью. Любой человек пользуется этим фундаментальным свойством мозга: коснулся нашего слуха небольшой отрывок полузабытой мелодии — и вот уже вспомнилась вся песня, принес ветер какой-то аромат — и в памяти возникает образ цветка.

Аналогия между трехмерной голограммой и мозгом весьма глубока и далеко не ограничивается лишь свойством ассоциативной памяти. В качестве примера иного свойства человеческого мозга, которым может обладать голограмма, следует упомянуть операцию, напоминающую «концентрацию внимания» [32]. Этот эффект имеет место при считывании голограммы, записанной в динамической среде, реагирующей на свет непосредственно в момент его воздействия. При восстановлении такой голограммы восстановленная волна, проходя далее через объем голограммы, начинает снова записываться, что приводит к усилению записи и постепенному «разгоранию» восстановленного изображения.

Однако рассмотренные выше свойства трехмерной голограммы, позволяющие моделировать некоторые функции головного мозга, пока не нашли практического применения в основном из-за отсутствия светочувствительного материала, обладающего необходимыми качествами. Первоначально глубокие трехмерные голограммы пытались регистрировать на щелочно-галогенидных кристаллах [6, 33], а затем на кристаллах ниобата лития [34]. Однако следует заметить, что в том и другом случае запись не фиксируется, поэтому при считывании голограммы записанная на ней информация быстро стирается под действием считывающего излучения.

В самое последнее время перед голограммами с глубокой записью в трехмерной среде открылись широкие перспективы практического использования в связи с появлением нового светочувствительного материала «реоксан», который был предложен в 1978 г. советскими физиками Г. И. Лашковым и В. И. Сухановым [35—37].

¹⁾ Двумерные пространственные гармоники не обладают селективными свойствами, и поэтому двумерная голограмма не может быть безопорной.

В основе механизма светочувствительности этого материала лежит так называемая сенсibilизированная реакция фотоокисления, а фазовая модуляция осуществляется за счет использования дисперсионных соотношений Крамерса — Кронинга. В общих чертах схема записи в этом случае сводится к тому, что сенсibilизатор, поглощая свет в видимой части спектра, инициирует химические реакции, вызывающие изменение показателя поглощения в ближнем ультрафиолете, что в соответствии с соотношениями Крамерса — Кронинга приводит к изменению показателя преломления в видимой области спектра.

Светочувствительные компоненты реоксана растворены в полимерной матрице (органическом стекле), которая перед экспозицией насыщается кислородом на глубину до 3 мм; на этой глубине матрица становится светочувствительной. После экспозиции кислород удаляется, и слой теряет светочувствительность. Таким способом осуществляется фиксирование. При необходимости слой можно снова пропитать кислородом и затем записать на нем дополнительную информацию. Предыдущая запись при этом не стирается.

Уже первые эксперименты показали, что на одном и том же участке поверхности реоксана можно записать несколько десятков голограмм [38]. Таким образом, в этом случае практическое увеличение плотности записи за счет увеличения глубины голограммы составляет около двух порядков. Светочувствительность материала равна приблизительно нескольким Дж/см², а достижимая величина дифракционной эффективности около 100%. Существенно также, что в отличие от кристаллов ниобата лития реоксан очень дешев и его предельные размеры практически не ограничены.

9. ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ

Развитие методов глубокой записи голограмм обусловило появление «динамической голографии». Под этим обычно понимают ситуацию, когда картина стоячих волн записывается в нелинейной среде, т. е. в такой среде, которая реагирует на излучение непосредственно в момент его воздействия. Динамическая голография представляет собой синтез голографии и нелинейной оптики, причем голография используется для описания сложных трансформаций волновых фронтов, а нелинейная оптика — для описания характера поведения светочувствительной среды при воздействии на нее излучения.

Собственно говоря, динамические эффекты были обнаружены в первых же экспериментах по записи глубоких голограмм, поскольку для записи таких голограмм применялись щелочно-галогенидные кристаллы и кристаллы ниобата лития — явно нелинейные среды. В ходе этих исследований выяснилось, что динамические эффекты представляют самостоятельный научный интерес и что их

не следует рассматривать только с точки зрения тех помех, которые они вносят в процесс записи голограммы. Американские исследователи Стаблер и Амдей [39] обнаружили один из наиболее интересных динамических эффектов, а именно направленную передачу энергии между взаимодействующими в объеме голограммы волнами. Этот эффект, наблюдающийся при записи в кристаллах ниобата лития, в общих чертах сводится к следующему (рис. 10). Предположим, что на кристалл V падают две плоские волны R и S , образующие стоячую волну с распределением интенсивности $I(x)$, показанным на рисунке слева. Благодаря особым свойствам кристалла ниобата лития возникающая под действием этой стоячей волны гармоника распределения показателя преломления (ее максимумы обозначены на рисунке z_1, z_2, z_3) окажется несколько смещенной относительно гармоники интенсивности — вниз или вверх в зависимости от направления оптической оси кристалла C .

Оказывается, что если упомянутый сдвиг равен четверти периода гармоники, то по мере записи голограммы энергия выходящих из кристалла волн R' и S' , первоначально имеющих одинаковые амплитуды, начнет перераспределяться. При этом волна R' усиливается, а S' ослабляется. В правой части рис. 10 приведены зависимости интенсивности этих волн от времени. Если ориентация оптической оси кристалла меняется на 180° , то волны R' и S' как бы меняются местами и направление переноса энергии меняется на противоположное.

Физический смысл этого явления достаточно прост. Как видно из рис. 10, при сдвиге на четверть периода максимумы интенсивности поля стоячей волны попадают на какие-то определенные «склоны» гармоники распределения показателя преломления. В результате оказывается, что волновое поле проходит через кристалл таким образом, что волны R и S становятся неравноправными. Одна из них (в данном случае R) отражается от гармоники показателя преломления как от более плотной среды, а другая волна (S) — как от менее плотной среды.

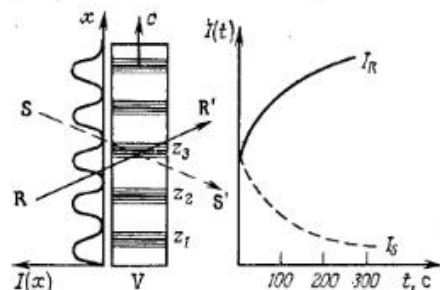


Рис. 10. К рассмотрению явления направленной передачи энергии между волнами R и S , интерферирующими в динамической голограмме, записанной в объеме V кристалла ниобата лития. C — оптическая ось кристалла; $I(x)$ — интенсивность стоячей волны, образовавшейся при интерференции волн R и S ; z_1, z_2 и z_3 — максимумы гармоники показателя преломления, возникающей в кристалле под действием стоячей волны; $I(t)$ — зависимость интенсивности выходящих из кристалла волн от времени экспозиции динамической голограммы.

В такой ситуации, как известно, одна из составляющих при отражении теряет по фазе половину длины волны, а вторая сохраняет ту же фазу. Та компонента, которая, отразившись от склона гармоника показателя преломления, потеряла половину периода, сложится с прошедшей сквозь склон волной с обратным знаком. Амплитуды этих двух волн вычтутся друг из друга, и интенсивность соответствующей выходящей из кристалла суммарной волны уменьшится. Интенсивность другой покидающей кристалл волны, в которую входит компонента, не изменившая фазу при отражении от структуры голограммы, соответственно увеличится.

В 1973 г. советский физик Соскин [40] предложил использовать этот интересный эффект для коррекции формы волновых фронтов

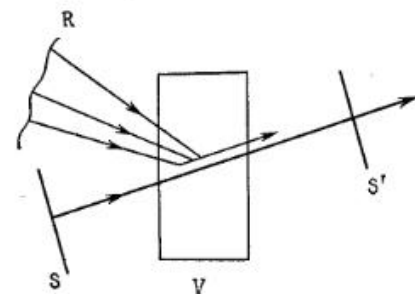


Рис. 11. Коррекция формы волнового фронта излучения лазера с помощью динамической сдвиговой трехмерной голограммы. R — интенсивная неоднородная волна; S — слабая волна правильной формы; V — динамическая сдвиговая голограмма; S' — исправленный и усиленный волновой фронт.

излучения лазеров [40]. Действительно, если на объемную светочувствительную нелинейную среду V направить излучение неправильной по форме интенсивной волны R лазера, излучение которого необходимо скорректировать, и одновременно с этим слабую по интенсивности, но правильную по форме волну S, то, обеспечив сдвиг структуры голограммы относительно структуры интерференционной картины на четверть периода, можно добиться того, чтобы энергия волны R перешла в волну S (рис. 11). В работе [41] показано, что таким образом энергия может быть перекачана полностью.

Последующие более тщательные исследования показали, что хотя сдвиговые голограммы действительно можно использовать для исправления формы волновых фронтов лазеров, однако в этом случае трудно избежать нелинейных искажений, наводимых макроструктурой пучка. Более удачными оказались схемы, основанные на эффекте обращения волновых фронтов.

Первую схему обращения волнового фронта, называемую четырехволновой, фактически повторяющую в динамическом варианте рассмотренную выше схему обращения статической трехмерной голограммы, предложили советские физики Степанов, Ивакин и Рубанов [42], а также независимо от них американский физик Вордман [43]. На рис. 12 поясняется принцип действия этой схемы и возможный способ использования обращенной волны для компенсации влияния оптических неоднородностей рабочего тела лазерного усилителя. В этом случае созданная задающим генератором

слабая плоская волна W_0 проходит слева направо через оптически неоднородное тело усилителя U. Оптические неоднородности усилителя приводят к искажению этой волны и ее трансформации на выходе в волну сложной формы W_u , усиленную относительно первоначальной. Четырехволновая динамическая голограмма H формируется в нелинейной среде вследствие смещения волны, вышедшей из усилителя, плоской опорной волны R и распространяющейся навстречу ей волны R^* , полученной при отражении опорной волны от зеркала M.

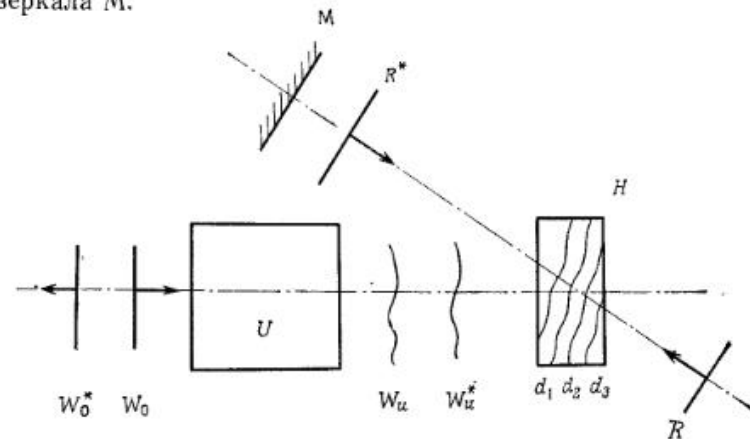


Рис. 12. Схема получения обращенной волны с помощью четырехволновой динамической голограммы и использования этой волны для коррекции излучения лазера. W_0 — исходная плоская волна; W_u — та же волна, деформированная после прохождения лазерного усилителя U; H — динамическая голограмма; R — опорная волна; M — зеркало, R^* — считывающая волна; W_u^* — волна, обращенная по отношению к волне W_u ; W_0^* — исправленная и усиленная волна.

При рассмотрении механизма действия этой голограммы можно принять, что в результате интерференции волны, вышедшей из усилителя, со встречной по отношению к ней опорной волной образуется трехмерная голограмма, характеризующаяся изофазными поверхностями d_1, d_2, d_3, \dots . При считывании такой голограммы волной, которая, отразившись от зеркала, распространяется навстречу опорной, формируется волна W_u^* , обращенная по отношению к волне, записанной на голограмме. С тем же основанием можно считать, что роль опорной волны при записи голограммы выполняет волна, отраженная от зеркала, а считывание осуществляется плоской волной R. В обоих случаях результат будет одинаковым; образуется волна, совпадающая по форме с объектной волной, падающей на голограмму, но распространяющаяся в противоположном направлении. Такая обращенная волна после прохождения строго по обратному пути через усилитель приобретает

искажения противоположного знака и трансформируется в плоскую волну W_0^* , усиленную и распространяющуюся навстречу исходной волне W_0 .

Рагульский, Зельдович и др. [44] нашли еще один, более естественный способ получения обращенных волн. Оказалось, что если на кювету K , заполненную веществом, которое способно к вынужденному рассеянию Мандельштама — Бриллюэна (например, сероуглерод), направить волну W_u с неоднородным волновым фронтом, то от кюветы эта волна отразится в виде волны W_u^* , обращенной по отношению к волне, падающей на кювету (рис. 13). Система с такими свойствами называется «бриллюэновским зеркалом».

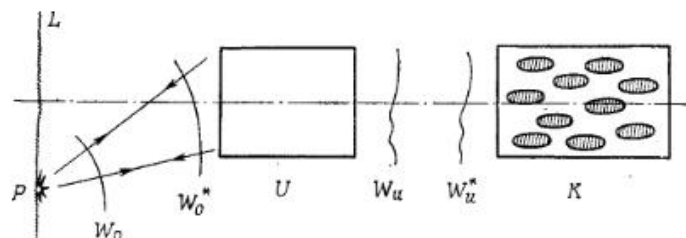


Рис. 13. Схема обращения волнового фронта бриллюэновским зеркалом и использования обращенной волны для фокусировки на мишень. L — диффузный экран; P — точка, подсвеченная излучением постороннего лазера; W_0 — волна, исходящая из точки P ; U — лазерный усилитель; W_u — волна, искаженная оптическими неоднородностями лазерного усилителя; K — кювета, заполненная веществом, способным к вынужденному рассеянию света на звуке; W_u^* — волна, обращенная бриллюэновским зеркалом; W_0^* — усиленная исправленная волна, фокусирующаяся на мишень.

Механизм действия бриллюэновского зеркала можно интерпретировать следующим образом. В данном случае в кювете регистрируется безопорная трехмерная голограмма типа рассмотренной на рис. 9. Отличие заключается лишь в характере реакции светочувствительной среды: в случае обычной голографической записи показатель преломления светочувствительной среды изменяется пропорционально интенсивности воздействующего излучения. В соответствии с этим световые «сгустки», образовавшиеся в результате интерференции падающего на голограмму излучения, регистрируются средой в виде соответствующих равномерно заполненных сгустков показателя преломления. В случае же бриллюэновского зеркала благодаря специфическим свойствам среды в местах расположения световых сгустков развивается процесс вынужденного рассеяния света на звуке, в результате чего каждый световой сгусток заполняется звуковой волной, распространяющейся в том же направлении, что и излучение, падающее на кювету. Гребни звуковой волны, следующие друг за другом на расстоянии Λ , сильно отражают в обратном направлении падающий на них свет, анало-

гично тому, как это делает система следующих друг за другом металлических зеркал трехмерной голограммы (на рис. 13 эти гребни показаны в виде отдельных вертикальных штрихов).

Изменение характера отклика светочувствительной среды, естественно, приводит к изменению результата взаимодействия восстанавливающего излучения со структурой голограммы. Если на равномерно заполненных сгустках показателя преломления излучение только преломлялось и поэтому восстановленная волна распространялась в том же направлении, что и падающая, то в случае бриллюэновского зеркала те же сгустки, модулированные поперечными звуковыми волнами, сильно отражают свет в обратном направлении. Изменению направления волны на противоположное при неизменной общей конфигурации картины ее интерференции (конфигурация сгустков в обоих случаях одинакова, изменяется только их наполнение) соответствует переход к сопряженной волне.

Обращение волнового фронта при записи безопорных динамических голограмм в средах, в которых происходит вынужденное рассеяние света на звуке, представляет собой, по-видимому, лишь одно из проявлений общего свойства вынужденного рассеяния. В частности, обращенную волну наблюдали Соколовская и др. [45] в экспериментах со средами, способными к вынужденному комбинационному рассеянию. Однако в этом случае обращенная волна претерпевает существенные изменения, обусловленные тем, что этот вид вынужденного рассеяния претерпевает сильный частотный сдвиг, т. е. длина волны обращенного излучения значительно отличается от длины волны падающего.

Одной из наиболее существенных перспектив использования операции обращения волнового фронта является осуществление автоматической фокусировки излучения на мишень, что крайне важно, например, для осуществления термоядерного синтеза. Схема эксперимента, выполненного для этих целей Рагульским и др. [46], поясняется также на рис. 13. Достаточно слабое излучение дополнительного лазера на рубине подсвечивает точку P на экране L . Интенсивность волны W_0 излучения, рассеянного этой точкой, после прохождения волны через лазерный усилитель U увеличивается; при этом оптические неоднородности усилителя вызывают трансформацию волны W_0 в волну W_u . Волна W_u падает на бриллюэновское зеркало K , обращается им и трансформируется в волну W_u^* , сопряженную с волной, падающей на кювету. После прохождения через усилитель обращенная волна переходит в волну W_0^* , обращенную по отношению к слабой волне, испущенной мишенью. Эта волна точно фокусируется на мишень, несмотря на присутствие оптических неоднородностей рабочего тела усилителя и оптических деталей, установленных на пути излучения.

10. ДИНАМИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ, ПАРАМЕТРЫ КОТОРЫХ ИЗМЕНЯЮТСЯ ВО ВРЕМЕНИ

До сих пор мы рассматривали динамические голограммы только как средство мгновенной регистрации стационарных волновых полей. Однако запись в нелинейной среде, отслеживающей все изменения параметров падающего на нее излучения, заключает в себе также и возможность регистрации волновых полей, изменяющихся во времени. Поскольку любое изменение параметров волно-

вого поля приводит к изменению его частоты и соответственно к различию частот объектной и опорной волн, то в объеме голограммы будут записываться не стоячие, а бегущие волны интенсивности. В связи с этим возникает вопрос: будут ли такие волны также обладать отображающими свойствами и в чем состоит их специфика?

На рис. 14 схематически показано образование бегущей волны интенсивности при сложении двух плоских волн W_1 и W_2 , частоты которых отличаются друг от друга. В этом случае поверхности пучностей уже не являются неподвижными, а перемещаются в пространстве со скоростью, пропорциональной разности частот этих волн.

Направление движения волны интенсивности в общем совпадает с направлением движения той волны напряженности, частота которой имеет большее значение. Пространственный период бегущей волны интенсивности характеризуется вектором K , перпендикулярным ее поверхностям пучностей d_1 , d_2 . Как и в случае стоячей волны, этот вектор равен разности волновых векторов интерферирующих волн k_1 и k_2 . Однако, поскольку абсолютные величины векторов k_1 и k_2 в данном случае различны, вектор решетки K для бегущей волны интенсивности не совпадает с биссектрисой oa угла, составленного этими векторами. На первый взгляд может показаться, что материальная модель бегущей волны интенсивности не будет обладать свойствами голограммы, т. е. не сможет трансформировать одну из образовавших ее волн в другую

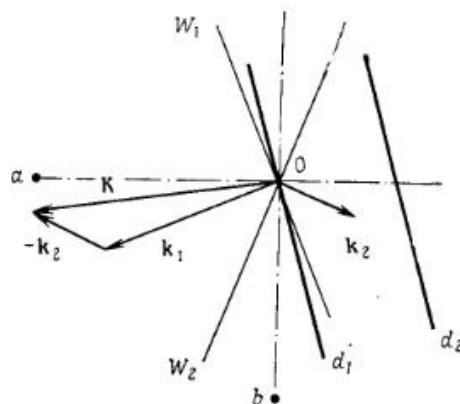


Рис. 14. К рассмотрению отображающих свойств бегущей волны интенсивности. W_1 и W_2 — волновые фронты волн, характеризующихся различными частотами колебаний; k_1 и k_2 — волновые векторы этих волн; d_1 , d_2 — поверхности пучностей бегущей волны интенсивности, образовавшейся при интерференции волн W_1 и W_2 ; K — вектор решетки волны интенсивности.

(например, волну W_2 в волну W_1). В самом деле, очевидно, поскольку поверхность зеркала, образовавшегося на месте поверхности пучностей d_1 , не является биссектрисой угла, образованного векторами k_1 и k_2 , то восстанавливающая волна W_2 , идущая по направлению вектора k_2 , в соответствии с обычными законами зеркального отражения не может быть преобразована в волну W_1 , идущую по направлению вектора k_1 . Таким образом, создается впечатление, что в данном случае не выполняется даже одно из самых элементарных условий восстановления волны записанного на голограмме излучения.

Однако более подробный анализ показывает, что бегущие волны интенсивности способны отображать волновые поля не менее точно, чем стоячие [47]. Что же касается рассмотренного эффекта, то оказывается, что закон Снеллиуса выполняется лишь при отражении от неподвижного зеркала. Если же зеркало движется с достаточно большой скоростью, то угол падения перестает быть равным углу отражения. Замечательно, однако, что при этом угол отражения изменяется таким образом, что обеспечивается возможность трансформации волны W_2 в волну W_1 .

В самом деле, несложный расчет показывает, что движущийся волновой фронт W_2 встречается с движущимся изофазным зеркалом d_1 вдоль прямой ob — биссектрисы угла, составленного волновыми фронтами W_1 и W_2 . Итак, эффективное положение движущегося зеркала d_1 оказывается таким, что обеспечивает взаимную трансформацию волновых фронтов записанного на голограмме излучения.

Используя аналогичные методы рассмотрения, а также пространственный вариант кинематической теории трехмерной голограммы, нетрудно показать, что в данном случае выполняются условия Брэгга и голограмма с записью бегущих волн интенсивности в отличие от обычной трехмерной голограммы воспроизводит относительный частотный сдвиг интерферирующих волн, и что отображающие свойства бегущих волн интенсивности распространяются также и на случай записи волновых полей с произвольными конфигурациями волнового фронта [47].

Следует заметить, что наиболее оптимальным светочувствительным материалом для записи бегущих волн интенсивности, по-видимому, являются среды, способные к вынужденному рассеянию, причем их резонансная частота должна совпадать с разностью частот объектной и опорной волн [48].

Голограмма с записью бегущих волн интенсивности, которую правильнее следует называть доплеровской, обладает по крайней мере еще одной интересной особенностью. Рассмотрение процесса обращения света такой голограммой показывает, что в этом случае обратная волна имеет искажения [47]. Анализ наиболее общего случая, когда различие частот объектной и опорной волн обусловлено доплеровским смещением, возникающим при отражении

излучения от движущегося объекта, показывает, что упомянутая деформация волнового фронта обусловлена тем, что образуемое обращенной волной изображение воспроизводит движение объекта [49].

Более подробно это явление представлено на рис. 15. В рассматриваемом случае движущийся объект O рассеивает излучение

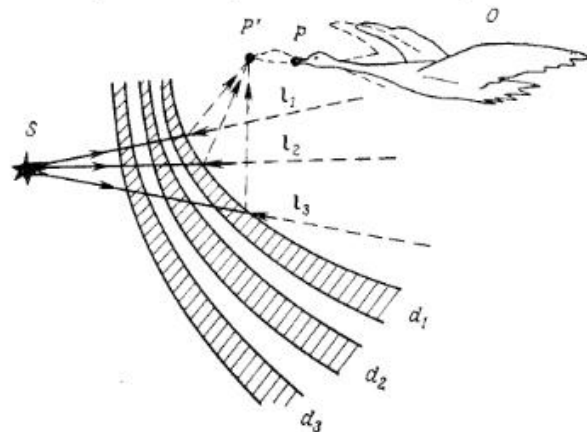


Рис. 15. К рассмотрению свойств волны, обращенной с помощью доплеровской голограммы. S — источник излучения; O — движущийся объект; d_1, d_2, d_3 — поверхности пучностей бегущей волны интенсивности, образовавшейся при интерференции падающего на объект и рассеянного им излучения; l_1, l_2, l_3 — лучи волны, с помощью которой осуществляется обращение доплеровской голограммы; P — одна из точек объекта; P' — эта же точка в псевдоскопическом изображении, образуемом обращенной волной.

когерентного источника S . Рассеянное излучение, смещенное по частоте вследствие эффекта Доплера, смешиваясь с падающим, образует систему бегущих волн интенсивности с поверхностями пучностей d_1, d_2, d_3, \dots . После материализации в соответствующей среде эти поверхности превращаются в систему движущихся зеркал.

Обращение голограммы осуществляется лучами l_1, l_2, l_3, \dots , сходящимися к источнику S . Полученная при этом обращенная волна, так же как и в статическом случае, образует псевдоскопическое изображение. Отличие заключается в том, что псевдоскопическое изображение при обращении доплеровской голограммы располагается не на том месте, где находился объект в момент, когда он испустил зарегистрированное голограммой излучение, а оказывается смещенным вперед по ходу движения этого объекта (на рисунке псевдоскопическое изображение отмечено штриховой линией). Смещение образованного обращенной волной изображения получается таким, что отраженные голограммой лучи и объект прибывают к месту локализации изображения одновременно.

В частности, точка объекта P изображается обращенной волной в положении P' ; это есть положение, в котором окажется точка P через промежуток времени, необходимый свету для того, чтобы пройти путь от точки P до голограммы и обратно до точки P' .

Такая несколько мистическая способность голограммы предсказывать положение объекта в будущем становится понятной, если перейти к системе координат, связанной с движущимся объектом. В этой системе отсчета волна интенсивности становится неподвижной относительно объекта, и доплеровская голограмма переходит в обычную статическую. При этом предсказание положения объекта в будущем сводится к тривиальной неизбежности фокусировки обращенной волны на объект.

С познавательной точки зрения данный эффект интересен как проявление принципа относительности в голографии. Возможно, он найдет применение при исследовании деформаций, ускорений и вращений движущихся тел.

Способность доплеровской голограммы регистрировать значения меняющегося волнового поля в каждый данный момент времени не является пределом возможностей голографии в направлении отображения временных характеристик волновых полей. Оказалось, что, записав голограмму в так называемой резонансной среде, можно, кроме того, также и запомнить, а затем воспроизвести всю последовательность изменений волнового поля во времени.

Толчком к развитию этого нового направления послужило явление фотонного эха, обнаруженное американскими исследователями Абеллом, Курнитом и Хартманом [50]. Этот эффект наблюдается в резонансных средах, т. е. в таких средах, в которых линия поглощения — испускания при переходах на нижний уровень совпадает с длиной волны экспонирующего голограмму излучения. В общих чертах он сводится к тому, что если на резонансную среду послать последовательно два импульса света, разделенные интервалом времени τ , то через следующий точно такой же интервал времени τ после второго импульса появится эхо, т. е. среда испустит добавочный третий импульс.

Появление эха можно интерпретировать как способность среды запоминать и воспроизводить временные параметры электромагнитного поля, в данном случае это интервал времени между последовательными импульсами. Первооткрывателей фотонного эха интересовало именно это свойство, хотя также отмечалось, что среда «помнит» и пространственное распределение фаз первого импульса.

Развивая идеи фотонного эха, советские исследователи Штырков и Самарцев [51] предложили записывать резонансные динамические голограммы импульсами объектного и опорного излучения, не перекрывающимися во времени. В этом методе на резонансную среду V в данный момент времени $t=0$ направляется импульс объектной волны I_0 , который переводит часть атомов среды из

нижнего основного состояния 1 в верхнее возбужденное состояние 2 (рис. 16). Из теории фотонного эха следует, что в этом состоянии фаза колебаний атомов среды в течение времени поперечной релаксации остается скоррелированной с фазой, которую имели в этой среде колебания объектной волны при взаимодействии со средой.

Запись голограммы, совпадающая с ее считыванием, осуществляется плоской опорной волной I_R , которая подается на среду в

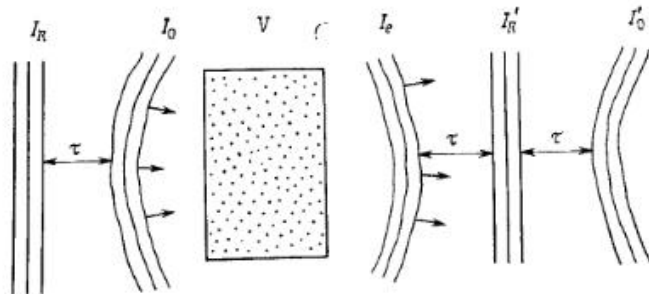


Рис. 16. К процессу записи и считывания резонансной голограммы. V — резонансная среда; I_0 — записываемая объектная волна; I_R — считывающая опорная волна; I_e — восстановленная волна-эхо, обращенная по отношению к объектной волне I_0 ; τ — временной интервал между импульсами волн I_0 и I_R . Волновые фронты волн I'_0 , I_R и I_e изображены в правой части рисунка в момент времени, когда последний из них I_e покинул голограмму.

виде импульса в момент времени $t=\tau$ после окончания воздействия объектной волны ($t=0$). Этот импульс обращает на 180° фазы колебаний всех атомов среды, после чего колебания в среде начинают развиваться во времени в обратном направлении. По прошествии следующего интервала времени τ , т. е. в момент времени 2τ среда испустит импульс эха I_e . Волновой фронт этого импульса будет обращен по отношению к волновому фронту зарегистрированной на голограмме объектной волны I_0 . Временная последовательность объектного (I'_0), опорного (I_R) и восстановленного (I_e) импульсов, а также форма соответствующих им волновых фронтов иллюстрируются в правой части рис. 16, где все три импульса показаны в момент времени, когда последний из них I_e покинул голограмму.

Голография с записью в резонансных средах, в которой пространственная память голограммы органически объединена с временной памятью фотонного эха, открывает принципиально новую возможность запоминать, а затем воспроизводить процессы, связанные с изменением состояний во времени и пространстве.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, согласованные усилия многих исследователей позволили накопить ряд сведений и фактов о свойствах трехмер-

ных голограмм. За этими на первый взгляд разрозненными фактами достаточно отчетливо вырисовывается то единое явление природы, которое лежит в их основе. Оказывается, что материализованная объемная картина волн интенсивности способна воспроизводить волновое поле со всеми его параметрами — амплитудой, фазой, спектральным составом, состоянием поляризации и даже с изменениями этих параметров во времени.

Однако общая картина этого явления пока еще далека от завершения. И дело здесь не только в том, что в ряде случаев мы не знаем полностью набор отображающих свойств некоторых видов голограмм. (Например, мы еще пока не знаем, при каких условиях резонансная голограмма воспроизводит состояние поляризации.) Есть все основания считать, что будут открыты новые неожиданные оптические свойства голограмм. Вполне вероятно, что ряд новых эффектов будет обнаружен при применении светочувствительных материалов, обладающих специфическими свойствами, подобно тому как применение резонансных и поляризационных сред открыло возможность записи временных и поляризационных характеристик волновых полей. И наконец, прецедент объединения голографии и нелинейной оптики в динамическую голографию показывает, что внесение идей голографии в смежные с ней области знаний может привести к появлению совершенно новых направлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gabor D. Microscopy by reconstructed wave fronts.—Proc. Roy. Soc. (London), 1949, v. A197, p. 454.
2. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения.—ДАН СССР, 1962, т. 144, вып. 6, с. 1275.
3. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения.—Опт. и спектр., 1963, т. 15, с. 522.
4. Kogelnik H. Holographic image projection through inhomogeneous media.—Bell. Syst. Techn. J., 1965, v. 44, p. 2451.
5. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения, II.—Опт. и спектр., 1965, т. 18, с. 276.
6. Van Heerden P. J. Theory of optical information storage in solids.—Appl. Opt., 1963, v. 2, № 4, p. 393.
7. Kogelnik H. Coupled wave theory of thick hologram gratings.—Bell Syst. Techn. J., 1969, v. 48, No. 9, p. 2909.
8. П. Эвальд. Кристаллооптика видимого света и рентгеновских лучей.—УФН, 1966, т. 89, вып. 2, с. 287.
9. Saccocio E. J. Application of the dynamic theory of X-ray diffraction to holography.—J. Appl. Phys., 1967, v. 38, No. 10, p. 3994.
10. Аристов В. В., Шехтман В. III. Свойства трехмерных голограмм.—УФН, 1971, т. 104, вып. 1, с. 51.
11. Сидорович В. Г. Расчет дифракционной эффективности трехмерных фазовых голограмм.—Опт. и спектр., 1976, т. 41, с. 507.
12. Сидорович В. Г. О дифракционной эффективности трехмерных фазовых голограмм.—ЖТФ, 1976, т. 46, № 6, с. 1306.

13. Сидорович В. Г. Теория преобразования световых полей амплитудными трехмерными голограммами, зарегистрированными в усиливающих средах.— *Опт. и спектр.*, 1977, т. 42, № 4, с. 693.
14. Лещев А. А., Сидорович В. Г. К теории преобразования световых волн отражательными трехмерными голограммами.— *Опт. и спектр.*, 1978, т. 48, № 2, с. 302.
15. Сидорович В. Г. К теории «бриллианзового зеркала».— 1976, *ЖТФ*, т. 46, № 10, с. 2168.
16. Степанов С. И., Камшилин А. А., Петров М. П. Дифракция света с поворотом плоскости поляризации на объемных голограммах в электрооптических кристаллах.— *Письма в ЖТФ*, 1977, т. 3, № 17, с. 849.
17. Степанов С. И., Камшилин А. А., Петров М. П. Голографическая запись изображения в двулучепреломляющих электрооптических кристаллах.— В сб.: *Оптическая обработка информации*. Под ред. С. Б. Гуревича.— Л.: Наука, 1978, с. 4.
18. Степанов С. И., Камшилин А. А., Петров М. П. Особенности записи объемных голограмм в одноосных кристаллах.— *ФТТ*, 1977, т. 19, № 3, с. 721.
19. Petrov M. P., Stepanov S. I., Kamshilin A. A., Image polarization characteristics storage in birefringent crystals.— *Opt. Commun.*, 1977, v. 21, № 2, p. 297.
20. Степанов С. И., Камшилин А. А., Петров М. П. Электрически управляемая дифракция света на объемных голограммах в электрооптических кристаллах.— *Письма в ЖТФ*, 1977, т. 3, № 2, с. 89.
21. Камшилин А. А., Петров М. П., Степанов С. И., Хоменков А. В. Оптическая запись информации и особенности дифракции света в фоторефрактивных кристаллах.— *Автоматизация*, 1978, № 5, с. 16.
22. Денисюк Ю. Н., Протас Р. Р. Усовершенствованные липпмановские голографические пластинки для регистрации стоячих световых волн.— *Опт. и спектр.*, 1963, т. 14, с. 721.
23. Протас Р. Р., Кракау Ю. А., Михайлова В. И. Фотографические пластинки ЛОИ-1 и ЛОИ-2 для регистрации голограмм.— В кн.: *Регистрирующие среды для голографии*.— Л.: Наука, 1975, с. 41.
24. Кириллов Н. И., Васильева Н. В., Зеликман В. Л. Получение концентрированных фотографических эмульсий путем их последовательного замораживания и оттаивания.— *Журн. научной и приклад. фотогр. и кинематограф.*, 1970, т. 15, № 6, с. 441.
25. Shankoff T. A., Phase Holograms in Dichromated Gelatin.— *Applied Optics*, 1968, v. 7, p. 2101.
26. Папаян С. М., Соболев Г. А. Голограммы с действительным предэкранном изображением.— *Техника кино и телевидения*, 1974, № 8, с. 11.
27. Денисюк Ю. Н., Земцова Э. Г. Голография и ее применение в изобразительной технике.— *Материалы конференции по внедрению в практику работы музеев достижений современной оптики*.— М.: Советское радио, 1975, с. 31.
28. McLaury D. G., Simpson C. B., Murbach W. J. Holographic Optical element for visual display application.— *Appl. Opt.*, 1973, v. 12, No. 2, p. 232.
29. Погорелый О. Н., Соскин М. С., Тараненко В. Б. Перестраиваемый моноимпульсный лазер на неодимовом стекле с голографической решеткой.— *Письма ЖТФ*, 1976, т. 2, № 2, с. 49.
30. Комар В. Г. О возможности создания театрального голографического кинематографа с цветным объемным изображением.— *Техника кино и телевидения*, 1975, № 4, 5, с. 31.
31. Beurler R. J. Properties of a mass of cell capable of regenerating pulses.— *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, 1956, Ser. B240, p. 55.
32. Gaylord T. K., Rabson T. A., Tittel F. K., Quik C. R. Self enhancement of LiNbO₃ holograms.— *J. Appl. Phys.*, 1973, v. 44, No. 2, p. 896—897.
33. Шварц К. К., Готлиб В. И., Кристансон Я. Ж. Оптические регистрирующие среды.— Рига, *Знание*, 1976, с. 45.

34. Chen S. F., La Maccia J. T., Fraser D. B. Holographic storage in Lithium niobate.— *Appl. Phys. Lett.*, 1968, v. 13, No. 7, p. 223.
35. Лаишков Г. И., Суханов В. И. Использование дисперсионной фоторефракции, обусловленной процессами с участием триплетных состояний, для регистрации фазовых трехмерных голограмм.— *Опт. и спектр.*, 1978, т. 44, № 5, с. 1008.
36. Лаишков Г. И., Бодунов Е. Н. Реакции сенсibilизированного фотоокисления в фазовой регистрации оптического изображения.— *Опт. и спектр.*, 1979, т. 47, № 6, с. 1126.
37. Лаишков Г. И., Черкасов А. С., Ермолаев В. А., Попов А. П., Ратнер О. Г., Торбин И. Д., Тимофеева Т. В., Вебер Т. М., Кавтрев А. Ф. Сенсibilизированная фоторефракция в блочном полиметилметакрилате, содержащем легко окисляющееся антраценовое соединение.— В сб.: *Новые регистрирующие среды для голографии*.— Л.: Наука, 1982, с. 1.
38. Суханов В. И., Лаишков Г. И., Петников А. Е., Ащевлов Ю. В., Резникова И. И., Черкасов А. С. Запись фазовых голограмм на органическом полимерном материале с дисперсией, изменяющейся вследствие триплет сенсibilизированных процессов.— В сб.: *Оптическая голография*.— Л.: Наука, 1979, с. 24.
39. Staebler D. L., Amodei J. J. Coupled wave analysis of holographic storage in LiNbO₃.— *J. Appl. Phys.*, 1972, v. 43, No. 3, p. 1043.
40. Соскин М. С. Голографические методы амплитудно-фазового преобразования лазерных пучков.— *Материалы IV Всесоюзной школы по голографии*.— Л.: 1973, с. 231. Запись фазовых голограмм в полупроводниковых кристаллах.— *Материалы VI Всесоюзной школы по голографии*.— Л.: 1974, с. 532.
41. Стаселько Д. И., Сидорович В. Г. Об эффективности преобразования световых пучков с помощью динамических объемных фазовых голограмм.— *ЖТФ*, 1974, т. 44, вып. 3, с. 580.
42. Степанов С. И., Ивакин Г. В., Рубанов А. С. О регистрации плоских и объемных динамических голограмм в просветляющихся средах.— *ДАН СССР*, 1971, т. 196, с. 567.
43. Woerdman J. P. Formation of transient free carrier hologram in Si.— *Opt. Commun.*, 1970, v. 2, p. 212.
44. Зельдович Б. Я., Поповичев В. И., Рагульский В. В., Файзулов В. С. О связи между волновыми фронтами отраженного и возбуждающего света при вынужденном рассеянии Мандельштама — Бриллюэна.— *Письма в ЖЭТФ*, 1972, т. 15, вып. 3, с. 160.
45. Соколовская А. И., Бреховских Г. Л., Кудрявцева А. Д. Восстановление волнового фронта световых пучков при вынужденном рассеянии света.— *ДАН СССР*, 1977, т. 233, с. 356.
46. Пилипецкий Н. Ф., Поповичев В. И., Рагульский В. В. Концентрация света с помощью обращения его волнового фронта.— *Письма в ЖЭТФ*, 1977, т. 27, вып. 11, с. 619.
47. Денисюк Ю. Н. Об отображающих свойствах бегущих волн интенсивности при записи динамических объемных голограмм.— *ЖТФ*, 1974, т. 44, с. 131.
48. Денисюк Ю. Н. Отображающие свойства бегущих волн интенсивности и их возможные применения.— *ЖТФ*, 1979, т. 49, с. 97.
49. Денисюк Ю. Н. Об особенностях процесса обращения волновых фронтов доплеровскими динамическими голограммами.— *Письма в ЖТФ*, 1981, г. 7, вып. 11, с. 641.
50. Abella J. D., Kurnit N. A., Hartman S. R. Observation of a photon echo.— *Phys. Rev. Lett.*, 1964, v. 13, p. 567; *Photon—Echoes*.— *Phys. Rev.* 1966, v. 141, p. 391.
51. Штырков Е. И., Самарцев В. В. Резонансная динамическая голография и оптическое сверхизлучение.— В кн.: *Электромагнитное сверхизлучение*.— Казань: 1975, с. 398. Отображающие свойства динамических эхо-голограмм в резонансных средах.— *Опт. и спектр.*, 1976, т. 40, с. 392.

Аббе условие синусов 65
Абеля преобразование 38, 39
 Аберрации 66, 67, 192, 483, 642
 — голографические 72
 — компенсация 251
 Автокорреляция 28, 84
 Аддитивный шум 90
 Акустическая голография 142, 149, 232, 327
 Акустооптическая голография 328
 Акустооптические корреляторы 573, 574
 Амплитудное пропускание 102
 Амплитудные голограммы 141, 142, 200
 Аналого-цифровое преобразование изображений 614, 616
Безлизовые голограммы *Фурье* 145, 180—184, 273, 666
Бесселя функции 32, 533, 534
 Бихромованная желатина 303—305
 Блестящие голограммы 202
 Бриллюэновское зеркало 720, 721
 Брэгговская дифракция 13, 218, 329
Взаимная интенсивность 53
 Взаимозаместимость 121, 122
 Видеопись 363—368
 Видность полос 55, 560
Винера — Хинчина теорема 88
 Винеровский фильтр 90, 91, 194
 Внеселевая опорная волна 163, 166—169
 Внеселевые голограммы 626
 Внутррезонаторные эталоны 288
 Волновое уравнение 43, 59
 Восстановление изображения 157, 175, 242—256, 407, 483, 484
 — в белом свете 148, 214, 490
 — когерентном свете 62—64
 — некогерентном свете 62—64, 662
 — источники света 496
 — методы 525—518
 — спектра 652
 Временная когерентность 57, 177, 279, 280
 Вычитание изображений 598—600
Габова голограммы 14, 15, 159, 272
 Газовые лазеры 286—294
 — мощность 292
 — срок службы и стоимость 292
 Галогенидосеребряные эмульсии 97, 98, 299—303, 319, 382, 462
Ганкеля преобразование 32
Гельмгольца Уравнение 43, 59
 Геометрия схемы записи 196—199, 202, 203
Гильберта преобразование 34
 — соотношения 35
 Главные лучи 260—264
 — точки 259, 260
 Глубина поля (сцены) 232, 540, 624, 625
 — резкости (фокуса) 249, 457
 Голограммные оптические элементы (ГОЭ) 71, 633—647

— — — изготовление 645
 — — — изображающие свойства 634
 — — — конструктивные решения 641
 — — — отражательные 489, 490
 — — — преимущества 646
 — — — пропускающие 487, 488
 — — — экспериментальные установки 672—674
 — — — эффективность 639
 Голограммы с локальным опорным пучком 146, 235—238
 — — — возможные применения 238, 239
 — сканирующий источник света 209, 210
 — со случайным смещением 274
 — с пятнистым опорным пучком 239, 335, 494
 — — — усреднением во времени 533
 — сфокусированного изображения 152, 241
 272, 459, 516, 526
 Голографическая интерферометрия 504—549
 — — в полевых условиях 522
 — — реальном времени 345, 532, 533
 — — специальные методы 544
 — — сравнение с классической 504
 — — требования к источнику света 509
 — — трехмерных диффузных объектов 525
 Голографические системы 284—286, 316, 361—370
 — — комбинированная мобильная установка 321—327
 — — составные элементы 316—320
 Голографический видеодиск 363, 364
 — контроль линз 359—363
 — портрет 671—678
 Голографические кино 213, 363, 492—494
 Голография движущихся объектов 352—358
 Гранулярность 126
Гюйгенса принцип 60
Гюйгенса — Френеля принцип 173
 Движение изображений 245, 249
 — объекта 227, 237, 352—359, 532, 628
 Двумерная память 420—424
 Двумерные (тонкие) голограммы 140, 211, 218, 410
 — диспен 452—485
 Действительное изображение 70, 243, 408, 409
 — — восстановление 185
 Декодирование изображений 598
Денисюка голограммы, см. также Трехмерные голограммы 21, 203
 Денситометрия 119
 Держатели пластинок 384, 385, 544, 545
 — пленок 320, 386, 546
 Дефлекторы 429—432, 441
 Дефокусировка 189
 Дисперсия поперечная 17
 — продольная 17
 Дифракционная решетка 18, 81, 469, 633

— эффективность 200, 208, 419, 442, 460, 639—641
 Дифракция 40—47
 — в нулевом порядке 479—481
 Дифференцирование изображений 598—602
Доплера эффекты 352, 353, 580
 Затворы 317, 673
 Зеркала 318
 Зернистость 125, 126
 — галогенидосеребряные материалы 382
 — шум 127, 146
 Изменение масштаба изображения 234
 Измерение координат изображения (интерференционных полос) 520, 540
 Изолированный стол 317, 318
 Импульсный отклик 60, 167
 Инверсная томография 232, 233
 Интегральная фотография 148, 229
 Интегральные преобразования 26—39
 Интенсивность 103
 Интерференционная микроскопия 630, 631
 Интерференция 40, 43, 48—50, 401
 Интерферометры голографические 22, 321, 322, 504—508
 — — применение в спектроскопии 648—651
 — классические 22, 281, 504, 505
 — перазирующий контроль 323, 324, 340—342, 517
 Информационная емкость 83, 162, 193
 — плотность 438, 456
 Исправление формы волновых фронтов 718
 Источники, см. Лазеры и Некогерентный свет
 Источники уменьшения корреляции 589
 Кардинальные точки 264—267
 Качество изображения 453
 — — оценки 59—76
 Квазимонохроматический свет 54, 55, 71
Керра ячейка 276
 Киноформы 142
Кирхгофа формула дифракции 48
 Классификация голограмм 150—153
 Когерентная обработка оптического изображения 83, 594—618
 — обратная связь 602—605
 Когерентность 20, 40, 41, 148, 287, 494, 626
 Когерентный свет, формирование изображения 62, 661
 Кодирование пространственной частотой 471
 Кодированная голограмма 146, 471
 Кодированные опорные волны 212, 217
 — сигналы 569—571
 Коллимированный пучок 272
Колера коэффициент 120
 Компенсация хроматической дисперсии 251
 Комплексная амплитуда 41, 44, 600
 — степень когерентности 53, 55
 Конические голограммы 147
 Контактная печать 409
 Контраст 107, 455
 Копирование голограмм 406—413
 Коррелятор, инвариантный к вращению 580, 581
 — пространственно-инвариантный 577
 — скрещенных сигналов 575
 — сложных сигналов 569—571
 — с одновременным преобразованием 562—566
 — со сложными согласованными фильтрами 582—584
 — с переменным масштабом 561, 562
 — с плоскостью изображения 571—573
 — — преобразованием Меллина 576—580

— транспонированный 581
 Корреляционные функции 84—88
 Корреляция 84, 342, 553—555
 Коэффициент контрастности γ 106, 468
 Лазеры, длина волны 276, 289
 — газовые 286—294
 — для восстановления изображений 286—294, 496
 — — записи 275, 316, 317, 429, 486, 671
 — многоимпульсный режим 282, 283
 — продольные моды 280, 287
 — с переключением добротности 275, 671
 — твердотельные 275—286
 — требования 509, 510
Лапласа преобразование 30
 — — некоторые свойства 31
 Линейная запись 109, 110, 181, 468, 652, 656
 — обработка изображения 595
 Линейный фотографический материал 88—90
 Линзы, см. также Голограммные оптические элементы 66, 301, 674
Липпмана фотография 21
 Матрица фотодетекторов 436
Меллина преобразование 36
 — — некоторые теоремы 37
 Меры безопасности 676, 677
 — — максимально допустимая энергия 675
 Метод двойной экспозиции, см. также Мультиплексирование 324, 508, 538, 546
 — наименьших квадратов 91, 92
 — случайной выборки фаз 365—367
 Методы возбуждения исследуемого объекта 528—532
 Микроволновая голограмма 149
 Микроскопия 69, 619—632
 Минное изображение 165, 243, 408
 — — увеличение 70
 Многоканальные корреляторы 566—569
 Модулятор добротности на красителе 277, 278, 672
 Модуляторы света 345, 434, 563
 Мультиплексирование 83
 — пространственное 206
 Мультиплексные голограммы 147, 205—213, 498
 Мультиплицирование изображений 661, 668
 Некогерентные голограммы 148
 — корреляторы 574, 584—586
 Некогерентный свет 41, 254, 490
 Нелинейная обработка изображений 606
 — — полупроводниковые экраны 606, 607, 609, 610
 Нелинейная обработка изображений 606
 — — — тета-модуляция 608—612
 — — — устройства 613—616
 Неразрушающий контроль 323, 324, 340—342, 517
 — — голография стекол 328
 Несимметричные функции 85
 Несущая частота 17, 166, 251, 686
 Облученность 103
 Обработка голограмм 387
 — — механизм проявления 388, 389
 — — проявители 388
 — — — рекомбинация 390—393
 Обратный (инверсный) фильтр 92, 595, 596
 Обращение волнового фронта 721
 Объект 158, 488
 — — приготовление 526—528
 — — точечный 163, 164, 166

- Объемные голограммы, см. Трехмерные голограммы
 Оператор оптического распространения 194, 195
 Опорный пучок 145
 — — поляризация 221
 — — сканирующий 210
 — — формирование 202—205
 Определение размеров частиц 170, 173, 668—671
 Оптимизация согласованного фильтра 586—589
 Орел 124
 Ортоскопическое изображение 229
 Освещенность 103
 Осевые голограммы, см. Габова голограммы
 Отбеливание 119, 394—398, 501
 Отношение сигнал/шум (ОСШ) 75, 76, 94, 588—591
 Отражательные голограммы 141, 196—205, 489, 490, 638
 Оценка качества изображения 59—76
 Параксиальное приближение 63, 68, 258
 Параллакс бинокулярный 234
 Перекрестные искажения 664, 665
 Плоские волны 45, 151
 Поверхностный рельеф 124, 463, 640, 641
 — — голограммы сфокусированного изображения 465
 Поголографическая способность 102
 Поглощение, см. Амплитудные голограммы
 Покелоса ячейка 276, 672
 Поляхроматический свет 55
 Полупроводниковая обработка фотографий 81, 467, 606—608
 Получение контурных карт рельефа 655—661, 682, 683
 Поляризационные голограммы 220—224
 — — поляризация объектной волны 220, 221
 — — опорной волны 221
 — — сигнала при восстановлении 150, 220
 — — — записи 220
 Последующее увеличение 623, 624
 Предварительное увеличение 622, 623
 Преобразование данных 518, 519, 541
 Преобразования в пространственной области 78, 79, 571, 572
 Проекция изображения на экран 251, 252
 Прозрачные объекты 510—524
 Произведение пространства на ширину полосы пропускания 80, 161, 168, 191
 Пропускание 102
 Пропускающие голограммы 141, 487
 Пространственная когерентность 57, 177, 279, 287
 — — инвариантность 190, 576
 — — частота, см. также Несущая частота 160, 252, 471
 Пространственно-инвариантная обработка изображений 190, 576, 616, 617
 Пространственный фильтр 22
 — — маска 91, 216, 340, 550—552
 — — точечная диафрагма 240, 319, 522, 554, 653
 Противоореольные покрытия 124
 Проявители 117, 388
 Проявление 100, 101
 — — время 117
 — — механизмы 386
 — — температура 117
 Псевдоскопическое изображение 229, 489, 724
 Радужные голограммы 147, 491
 — — разрешение 253

- Разрешение изображения 64, 71, 250, 453, 477
 — — среды для записи голограммы 127, 192, 301
 — — требование при записи 160, 238, 559, 564, 565
 Распознавание образов и знаков 550—552, 592
 Рассеиватель 20, 194, 477, 514, 672
 Регистрирующие среды 191, 294, 296
 — — галогенидосеребряные эмульсии 299
 — — задубленная бихромованная желатина 303
 — — требования 435, 436
 — — фотографические материалы 300
 — — фотопластики 310—313
 — — фотополимеры 309
 — — фоторезисты 305—308
 — — фотохромные материалы 314
 — — электрофотографические пленки 314
 Рельефо-фазовые голограммы 412
 Рентгеновские лучи 149, 232
 Реоксан 715, 716
 Рэли критерий 65, 71, 171, 439
 — — рассеяние 302, 429
 — — теорема 28, 166
 Сандвич-голограммы 546, 659, 660
 Свертка 28, 85, 167, 555
 Светоделитель 318, 437, 504
 Связь светотехнических и энергетических единиц 103—105
 Селекция уровней 615
 Симметричные функции 85
 Синтез голограмм на ЭВМ 141, 225, 598, 617
 Синтезированная апертура 18
 Синтезированные голограммы 206, 225—235
 Скрытое изображение 98, 99
 Случайные процессы 83, 402
 Согласование волновых фронтов 513
 Согласованный фильтр 93, 342
 — — оптимизация параметров 586—589
 Сопряженные изображения 154, 158, 243, 270, 271
 — — уравнивания 268, 270, 271
 Составитель страниц 433—435
 Спекл-фотография 93, 32
 Спеклы 83, 250, 401—406
 Спектральная плотность 88
 — — фильтрация 651, 652
 — — чувствительность 114, 301, 464
 Спектр мощности, см. Спектральная плотность
 Спектроскопия 617—655
 Стабильность аппаратуры 489, 494, 513, 514
 — — голограммы 99, 130, 383, 456
 Статистический анализ 83
 Стереомодель 684, 685
 Стробоскопическая интерферометрия 509, 536—539
 Суперсенсibilization 116
 — — и латенсификация 122, 123
 Сушка 399, 400
 Сферическая волна 45
 Теневой метод 518
 Теорема выборки (отсчетов) 78—83
 Теория связи 77—95
 Термопластики 116, 202, 463
 Тета-модуляция 608—612
 Томография 232
 Точечная функция рассеяния, см. Импульсный отклик
 Траектория лучей 260, 644
 Транспонированные корреляторы 581, 582

- Трехмерная система хранения 421—428
 Трехмерные голограммы, см. также Объемные голограммы 141, 199, 211, 212, 218, 243, 692, 693
 — — анизотропные среды 708—710
 — — динамические 716—725
 — — резонансные 725, 726
 — — сдвиговые 718
 — — копирование 411
 — — теория кинематическая 694
 — — — модовая 705—708
 — — связанных волн 703—705
 — — сверхплотная и ассоциативная память 713
 Трехмерный дисплей 485
 — — применения 501
 — — системы 499
 Турбулентность 93, 239, 523
 Увеличение голограммы 258, 620, 621
 — — изображения 68—70, 158, 190, 247—249, 621—624
 Угловое кодирование 474
 Улучшение изображений 595—597
 Уравнение решетки 250, 636
 — — следствия 637
 Уравнения голографической микроскопии 624—627
 Усадка пленки 219, 302, 399
 Условие фокусировки 158, 159, 517, 637
 Фазовая голограмма 142, 143, 419, 420, 461
 Фиксирование 101, 393, 394
 Фоновая засветка 455
 Формирование изображений, см. Восстановление изображений
 Фотограмметрия 678
 — — компактных объектов 679
 Фотографическая плотность 103
 — — чувствительность 110—114
 Фотографические материалы, см. Галогенидосеребряные эмульсии
 Фотонное эхо 725
 Фотопластики 310, 311
 Фотополимеры 308—310
 Фоторезисты 305—307, 411, 463, 483
 Фотохромные голограммы 146
 — — материалы 312, 314
 Фотоэмульсии, напряжения 124, 125, 384
 Фраунгофера голограммы 145, 172—178, 459, 626, 669
 — — дифракция 47, 50, 51
 Френеля голограммы 145, 154—157, 459, 627
 — — дифракция 14, 47—51
 — — зонная пластинка 157

- преобразование 33, 34
 Функция неопределенности 566, 569, 575
 Фурье — Бесселя преобразование 32, 33
 Фурье-голограммы 145, 178—193, 417, 418, 627
 — — безлинзовые 273, 666
 — — мультиплицирование изображений 663—666
 Фурье преобразование 13, 27, 179, 652
 — — свойства 28
 Фурье — Фраунгофера голограммы 186—188, 194
 Характеристическая кривая 105, 106, 467
 Хранение информации 414—451
 Хюртера — Дриффелда кривая, см. Характеристическая кривая
 Цвет 454, 467
 Цветная голография 497
 Цветные голограммы 149, 214
 Цветовая диаграмма МКО 466
 Цветокodирование 469
 Цилиндрические волны 45
 — — голограммы 146, 147
 Цифровая обработка данных 446—451
 Частично-когерентный свет 44, 45, 58, 59
 Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) 160, 161, 167, 168, 192, 474
 Числовая апертура 66, 625
 Чувствительность 102
 — — бихромованная желатина 303
 — — фотоматериалы 300
 — — фотопластики 311
 — — фотополимеры 308
 — — фоторезисты 306
 — — фотохромные материалы 312, 313
 Штампование голограмм 413, 464
 Эквивалентная безлинзовая голограмма
 Фурье 182—184
 Экспозиция 102, 108
 Экраны 476, 477
 Электронная микроскопия 13
 Электрофотографические пленки 314
 Эргодическая гипотеза 84
 Эталонная функция 551
 Эффект прерывистой экспозиции 122
 Эффекты, связанные с длиной волны излучения 202, 489
 Яркость изображения 254, 476

ТОМ 2

Глава 9. Отдельные проблемы голографии	381
9.1. Фотографические материалы и их обработка (С. Бентон)	381
Литература	401
9.2. Спеклы (Г. Колфилд)	401
Литература	406
9.3. Копирование голограмм (У. Рудз)	406
Глава 10. Области применения	414
10.1. Хранение цифровой информации (Т. Гейлорд)	414
Литература	451
10.2. Двумерные дисплеи (Б. Клей)	452
Литература	485
10.3. Трехмерные дисплеи (М. Леман)	485
Литература	503
10.4. Голографическая интерферометрия (Дж. Брандт)	504
Литература	549
10.5. Распознавание образов и знаков (Д. Кейсасент)	550
Литература	594
10.6. Обработка изображений (С. Ли)	594
Литература	618
10.7. Микроскопия (М. Кокс)	619
Литература	633
10.8. Голограммные оптические элементы (Д. Клауз)	633
Литература	647
10.9. Спектроскопия (Г. Колфилд)	647
Литература	655
10.10. Голографические методы получения контуров рельефа (Дж. Варнер)	655
Литература	661
10.11. Мультиплицирование изображений (Г. Колфилд)	661
Литература	668
10.12. Измерение размера частиц (Б. Томпсон)	668
Литература	671
10.13. Голографический портрет (В. Кехнер)	671
Литература	678
10.14. Фотограмметрия (Н. Баласубрамания)	678
Литература	689
Дополнение. Некоторые проблемы и перспективы голографии в трехмерных средах (Ю. Н. Денисюк)	691
1. Введение	691
2. Общая схема записи и восстановления трехмерной голограммы	692

3. Кинематическая теория трехмерной голограммы; приближение геометрической оптики	694
4. Пространственный и частотный варианты кинематической теории трехмерной голограммы	697
5. Теория связанных волн и модовая теория трехмерной голограммы	702
6. Некоторые закономерности трехмерных голограмм, записанных в анизотропных средах	708
7. Применение тонкослойных трехмерных голограмм в избразительной и проекционной технике	710
8. Сверхплотная и ассоциативная память на основе трехмерных голограмм с глубокой записью	713
9. Динамическая регистрация стационарных волновых полей	716
10. Динамическая регистрация волновых полей, параметры которых изменяются во времени	722
11. Заключение	726
Литература	727
Предметный указатель	730