

КОМПЬЮТЕРНАЯ ФОТОНИКА: ПРИНЦИПЫ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

И.П. Гуров

Рассматриваются методы и системы компьютерной фотоники, активно развивающегося направления науки и техники, которое объединяет современную физическую и квантовую оптику, математику и компьютерные технологии. Перспективы развития компьютерной фотоники определяются фундаментальными и прикладными исследованиями и разработками приборов и систем, широко востребованных в области биомедицины, высоких технологий и инженерных приложениях

Введение

В течение последних десятилетий достигнуты значительные успехи в области оптики, которую по праву называют наукой XXI века. На современном этапе развития оптической науки и технологий созданы принципиально новые поколения источников излучения, оптических материалов и элементов, приемников излучения, оптических систем передачи и обработки информации. Созданы новые направления в оптике – интегральная, волоконная, градиентная и нелинейная оптика, микро- и нанооптика, волноводная оптоэлектроника и т. д. Термин «оптика» начал постепенно дополняться новым, но также обобщенным названием - «фотоника». Этот термин стал охватывать область науки и техники, связанную с использованием светового излучения (или потока фотонов) в оптических элементах, устройствах и системах, в которых генерируются, преобразуются, распространяются и детектируются оптические сигналы, а также производится их запись или отображение.

Характерной чертой развития современной оптики становится активное внедрение достижений фундаментальной науки в практические разработки. Ярким примером являются информационные технологии, перспективы развития которых основываются на оптических принципах представления, передачи, обработки и хранения информации. Активно возрастающие функциональные и вычислительные возможности компьютерных технологий создали необходимые предпосылки развития компьютерной фотоники, базирующейся на принципиальной интеграции фотоники и компьютерных технологий. Компьютерная фотоника объединяет современную физическую и квантовую оптику, математику и компьютерные технологии и находится на этапе активного развития, когда становится возможным реализовать новые идеи, методы и технологии.

В статье представлены примеры современных методов компьютерной фотоники, рассматриваются особенности их практической реализации и перспективы развития. Рассматриваемые методы, разумеется, далеко не исчерпывают возможности и перспективы компьютерной фотоники, они наглядно характеризуют последние достижения в этой области.

Важно подчеркнуть, что методы оптической томографии, цифровой голографии и трехмерной фотографии, представленные в статье, в весьма короткие сроки прошли путь от фундаментальных исследований до создания приборов и систем, широко востребованных в области биомедицины, в высоких технологиях и инженерных приложениях [1].

Рассматриваемые методы недостаточно представлены в отечественной научно-технической литературе, и целью статьи является попытка восполнить пробел в дополнение к другим публикациям [2-4].

Оптическая когерентная томография

Методы томографии, как известно, позволяют исследовать трехмерную внутреннюю структуру объектов на основе использования различных физических принципов (см. список литературы в публикации [3]). Оптическая томография основывается на реконструкции трехмерного распределения физических свойств объекта при решении

обратной задачи распространения и рассеяния оптического излучения в среде, при этом наибольшие успехи достигнуты в оптической когерентной томографии (ОКТ), обеспечивающей разрешающую способность от единиц до долей микрометра, недостижимую другими методами томографии. Поэтому ОКТ является по существу «микротомографией», которая, применительно к области биомедицины, позволяет проводить исследования на клеточном микроуровне, что исключительно важно для медицинской диагностики.

Принцип ОКТ состоит в освещении объекта оптическим излучением с определением степени отражения излучения по глубине среды (рис. 1). При освещении объекта оптическое излучение проникает в среду на глубину до нескольких миллиметров, и для получения информации о внутренней микроструктуре среды необходимо определить степень отражения от каждого отдельного слоя.

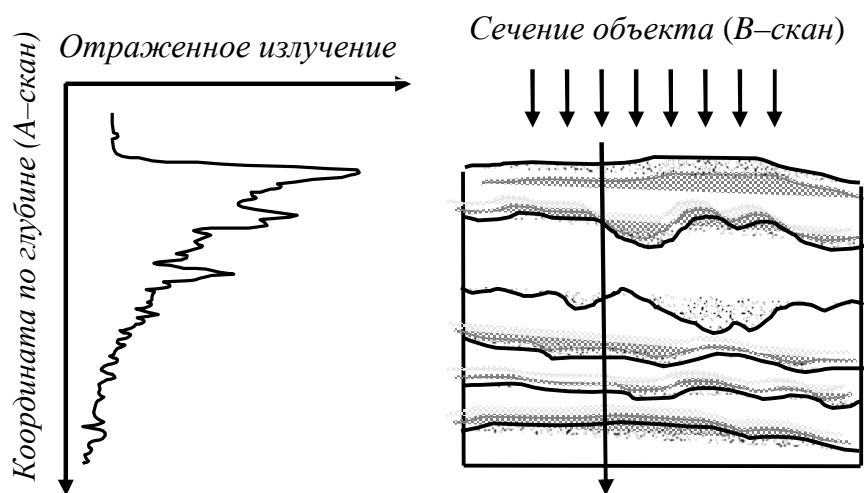


Рис. 1. Принцип формирования изображений в ОКТ

Определить степень отражения от отдельных слоев возможно при освещении среды коротким световым импульсом и измерении интенсивности отраженного излучения в зависимости от времени прохождения импульса до каждого слоя внутри среды. Очевидно, что более глубоким слоям соответствует большее время задержки отраженного импульса. Однако ввиду высокой скорости распространения, полное время прохождения импульса на интервале в несколько миллиметров составляет несколько пикосекунд, и для обеспечения разрешающей способности в 1 мкм погрешность измерения времени задержки не должна превышать единиц фемтосекунд, что является технически сложной задачей.

Другим подходом к решению проблемы является использование источников непрерывного излучения с широким спектром и малой степенью когерентности. В отличие от монохроматического излучения с постоянной амплитудой и частотой, излучение малой когерентности формируется в форме суперпозиции большого числа «волновых цугов», каждый из которых излучается отдельным атомом, и поэтому имеет случайную начальную фазу (см. рис. 2). Частота волновых цугов также варьируется в определенных пределах $\Delta\nu$ вследствие взаимодействия атомов.

При освещении объекта излучением малой когерентности можно определить степень отражения от отдельных слоев за счет селекции по времени прохождения последовательности волновых цугов до каждого слоя. Для этого, аналогично принципу радиолокационного радара, достаточно иметь «эталонную» копию зондирующего сигнала

и варьировать задержку этого сигнала так, чтобы он точно совпал с отраженным сигналом. При этом время задержки равно времени прохождения зондирующего сигнала.

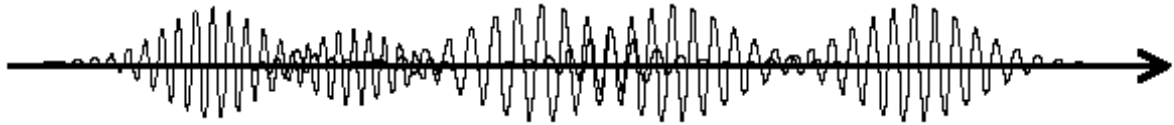


Рис. 2. Волновые цуги

В ОКТ в качестве радара используется двухлучевой интерферометр (см. рис. 3), в котором «эталонная» копия формируется с помощью светоделителя, и время задержки варьируется за счет перемещения опорного отражателя.

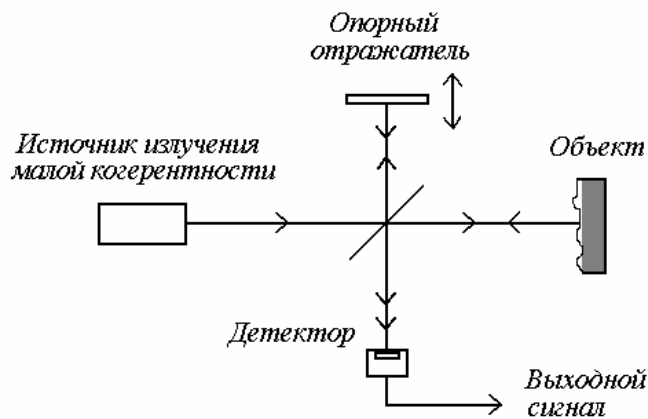


Рис. 3. Схема интерферометра малой когерентности

Значения комплексных составляющих электрического поля измерительной и опорной волн в фиксированной точке наблюдения можно выразить в форме

$$E_{1i}(t) = ra_i(t)\exp[j2\pi\nu_i(t)], \quad (1)$$

$$E_{2i}(t) = a_i(t+\tau)\exp[-j2\pi\nu_i(t+\tau)], \quad (2)$$

где индекс i обозначает различные волновые цуги с амплитудами $a_i(t)$ и частотами ν_i , $\tau = \Delta/c$ – интервал времени запаздывания измерительной волны при оптической разности хода Δ , r – амплитудный коэффициент отражения измерительной волны ($r \leq 1$), c – скорость света.

Интенсивность света на выходе интерферометра определяется выражением

$$I(\tau) = \left\langle |E_{1i}(t) + E_{2i}(t + \tau)|^2 \right\rangle_i = I_0 + 2\sqrt{I_1 I_2} \operatorname{Re} V(\tau), \quad (3)$$

где угловые скобки обозначают операцию усреднения по ансамблю волновых цугов, $I_0 = I_1 + I_2$ – некогерентная фоновая составляющая, не зависящая от τ , I_1 и I_2 – интенсивности излучения измерительной и опорной волн, $V(\tau)$ – нормированная функция взаимной когерентности интерферирующих волн,

$$V(\tau) = \left\langle E_1(t)E_2^*(t + \tau) \right\rangle / (I_1 I_2)^{1/2}, \quad (4)$$

звездочкой обозначена комплексно сопряженная величина.

При отсутствии дисперсии в среде функция (4) совпадает с функцией когерентности исходного излучения источника

$$V(\tau) = \langle E(t)E^*(t+\tau) \rangle / \langle E(t)E^*(t) \rangle, \quad (5)$$

т.е. с нормированной автокорреляционной функцией случайного процесса излучения волновых цугов.

Известно, что автокорреляционная функция максимальна при $\tau = 0$, т.е. при совпадении сомножителей в (5). Часть измерительной волны, отраженная от слоя на глубине z (отсчитываемой от поверхности объекта), имеет задержку $\tau = 2nz/c$, где n – показатель преломления (который для простоты полагаем постоянным). При перемещении опорного отражателя на величину $2z/c$ ($n \cong 1$) достигается максимум корреляции для данного слоя, что позволяет селективировать отражение от каждого слоя в отдельности.

Интересно отметить, что в случае «абсолютно случайной» функции $E(t)$, ее автокорреляционная функция представляет собой бесконечно узкую дельта-функцию при $\tau = 0$, которая совпадает с автокорреляционной функцией дельта-импульса. Поэтому использование в интерферометре (рис. 3) источника с широким спектром вместо источника свехкоротких импульсов позволяет получить те же результаты более простыми техническими средствами.

Реальные источники излучения имеют ограниченный спектр, и корреляционная функция имеет конечную протяженность (см. рис. 4), которая определяет разрешающую способность метода ОКТ.

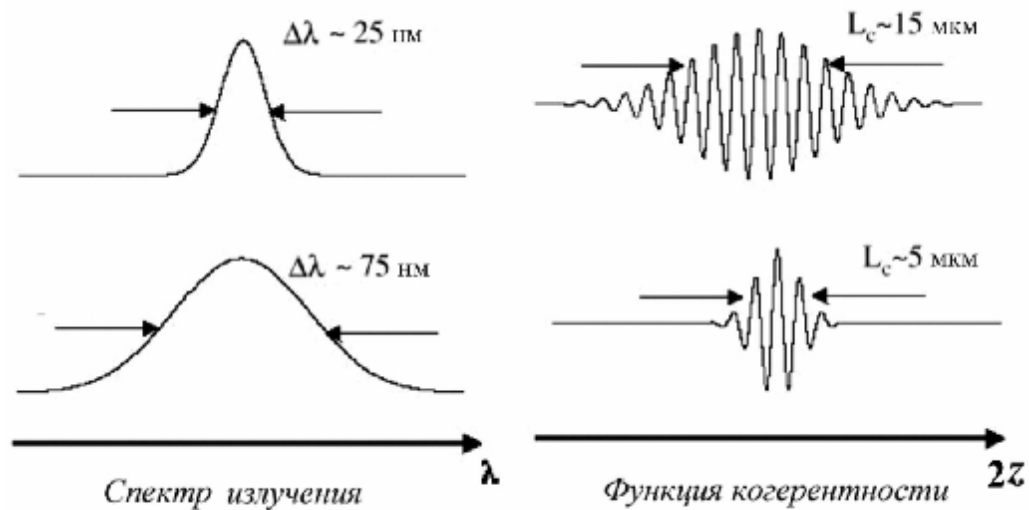


Рис. 6. Примеры соотношения между шириной спектра излучения и длиной когерентности

Длина когерентности L_c (ширина корреляционной функции) для распределения спектра гауссовой формы определяется выражением (см., например, [5])

$$L_c = (4\sqrt{\ln 2} / \pi) / (\langle \lambda \rangle^2 / \Delta \lambda) \approx 0,44 \langle \lambda \rangle^2 / \Delta \lambda, \quad (6)$$

где $\langle \lambda \rangle$ – среднее значение длины волны, $\Delta \lambda$ – ширина спектра.

Несмотря на внешнюю простоту принципа ОКТ, создание и совершенствование систем ОКТ требует решения ряда сложных научно-технических проблем, особенно при обеспечении высокой разрешающей способности и достоверности получаемых результатов.

Проблематику ОКТ можно отнести к классу обратных задач. С позиций теории систем, при известном воздействии на систему и определении отклика необходимо получить оценку характеристик системы. Известно, что решение обратных задач является однозначным, устойчивым и точным при наличии достаточной априорной информации о системе. Иными словами, исследование свойств неоднородных сред требует знания

особенностей взаимодействия излучения со средой, таких как процессы отражения, рассеяния, поглощения, степень анизотропии среды, распределение показателя преломления, влияние поляризации излучения и т. д.

Другой проблемой является создание источников излучения в виде сверхкоротких (фемтосекундных) импульсов или источников с широким равномерным спектром в диапазоне до сотен нанометров, имеющих достаточную мощность и пространственную когерентность при приемлемой стоимости.

Вследствие использования свойства когерентности излучения, необходимо снижать влияние шума «пятнистой структуры» (спеклов), возникающего при дифракции когерентного излучения на микронеоднородностях среды, что приводит к потере деталей в изображении.

На рис. 7 представлен пример томограммы, полученной методом ОКТ, на которой заметно существенное влияние шума спеклов.

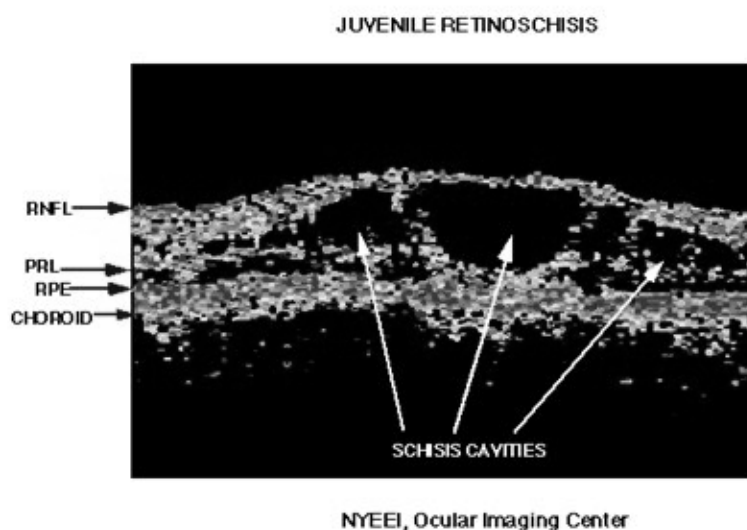


Рис. 7. Пример томограммы сетчатки глаза (*B*-скан), полученной методом ОКТ

На рисунке ясно видны полости между слоями ткани, что свидетельствует о клинических нарушениях. Метод ОКТ является в настоящее время единственным клиническим методом неразрушающей диагностики состояния глазного дна в офтальмологии.

В настоящее время ведутся активные исследования и разработки в области создания волоконно-оптических систем ОКТ для эндоскопии и диагностики внутренних органов, разработаны различные методы и схемы ОКТ, получившие широкое распространение, сведения о которых приведены в публикациях списка литературы работы [3].

На рис. 8 представлены примеры эндоскопических ОКТ-изображений [6].

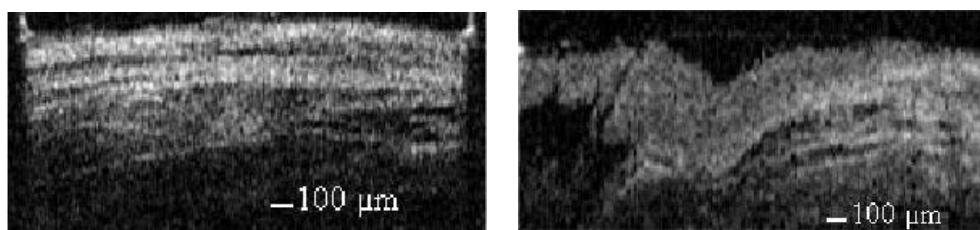


Рис. 8. Томограммы биоткани в состоянии нормы (слева) и с клиническими нарушениями (справа)

Для наблюдения живых биотканей требуются быстродействующие системы ОКТ, обеспечивающие трехмерную реконструкцию с высоким разрешением в реальном времени. Для этой цели разработаны различные технические решения (см., например, [5]).

Важно подчеркнуть, что реализация методов ОКТ в значительной мере основывается на возможностях компьютерных технологий, обеспечивающих регистрацию изображений, преобразование, анализ и визуализацию томограмм, управление системой. При этом повышенное разрешение достигается компьютерными методами решения обратной задачи с использованием методов цифровой обработки трехмерных изображений.

Цифровая голография

Идея применения компьютерной обработки для восстановления голографически записанного изображения была впервые предложена Дж. Гудменом и Р. Лоуренсом [7], а также Р.В. Кронродом и др. [8, 9]. Развитие компьютерных технологий и твердотельных приемников излучения позволило записывать голограммы с помощью светочувствительных матриц на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-камер) в цифровой форме. При этом процесс записи и обработки голограмм является полностью цифровым и получил название *цифровой голографии*.

Применение цифровой голографии открывает широкие возможности для точного количественного анализа свойств объекта, таких как смещение точек поверхности при анализе деформаций, определение формы объекта, измерение коэффициента преломления в прозрачных средах, изучение траекторий частиц, микроскопия. В упомянутых случаях изменение состояния изучаемого объекта приводит к изменению объектной волны и получаемой интерференционной картины, которая записывается цифровым образом.

Принцип цифровой голографии можно проиллюстрировать с помощью схемы установки для записи голограмм (рис. 9).

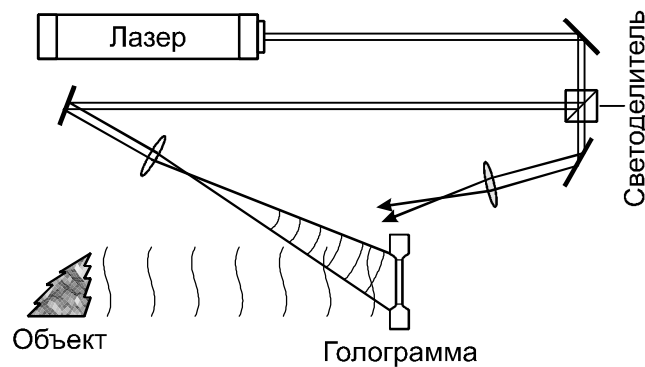


Рис. 9. Схема процесса записи голограммы

Распределение интенсивности $I(x, y)$ в плоскости записи голограммы (x, y) определяется квадратом модуля суммы комплексных амплитуд объектной $O(x, y)$ и опорной $R(x, y)$ волн, а именно

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 = \\
 &= |R(x, y)|^2 + |O(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + R(x, y)O^*(x, y),
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$O(x, y) = |O(x, y)| \exp[i\phi_o(x, y)]$ — комплексная амплитуда объектной волны с вещественной амплитудой $|O(x, y)|$ и фазой $\phi_o(x, y)$, $R(x, y) = |R(x, y)| \exp[i\phi_r(x, y)]$ обозначает аналогичным образом комплексную амплитуду опорной волны. В традиционной

голографии голограмма (7) записывается на фотопленку. Изображение объекта восстанавливается путем освещения голограммы опорной волной.

В цифровой голографии не требуется использование промежуточного носителя (фотопленки), поскольку голограмма $I(x, y)$ записывается непосредственно на видеокамеру, и осуществляется компьютерная реконструкция записанного изображения.

Для пояснения математического принципа, лежащего в основе голографической реконструкции изображения, умножим записанную голограмму, т. е. интенсивность интерференционной картины $I(x, y)$, на значения поля опорной волны $R(x, y)$:

$$R(x, y)I(x, y) = R(x, y)|R(x, y)|^2 + R(x, y)|O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 O(x, y) + R^2(x, y) O^*(x, y). \quad (8)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (8) пропорционально значению $R(x, y)$ опорной волны, второе слагаемое описывает пространственно изменяющееся «облако» вокруг первого порядка дифракции. Вместе они составляют нулевой порядок дифракции, или фоновую составляющую. Третье слагаемое с точностью до известного множителя $|R(x, y)|^2$ представляет собой точную копию исходного поля $O(x, y) = |O(x, y)| \exp(i\phi_o(x, y))$ и поэтому называется мнимым изображением (или просто изображением) объекта. Четвертое слагаемое относится к еще одному изображению объекта, «изображению-двойнику», которое называется действительным изображением.

В процессе записи цифровой голограммы исследуемый трехмерный объект с рассеивающей свет поверхностью располагается на расстоянии d от ПЗС-камеры. Записанная голограмма может рассматриваться как пропускающий транспарант, на котором дифрагирует опорная волна. Для получения исследуемой объектной волны в цифровой голографии применяется численный расчет распространения оптического поля в форме произведения $R(x, y)I(x, y)$ от плоскости голограммы до плоскости объекта (ξ, η) .

Численное восстановление записанной цифровым образом голограммы производится в соответствии со скалярной теорией дифракции в приближении Френеля для интеграла дифракции Рэлея-Зоммерфельда [10, 11]. Восстановленное дифрагированное поле $Q(\xi, \eta)$ в плоскости изображения (ξ, η) на расстоянии d от плоскости голограммы может быть представлено в параксиальном приближении следующим образом:

$$Q(\xi, \eta) = \frac{1}{i\lambda d} \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}d\right) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y)I(x, y) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda d}\left[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2\right]\right] dx dy. \quad (9)$$

Уравнение (9) служит отправной точкой для численного восстановления изображений в цифровой голографии в параксиальном приближении, при котором значения координат x и y , как и соответствующих им ξ и η , малы по сравнению с расстоянием d .

Из уравнения (9) видно, что результирующее поле определяется двумерным Фурье-преобразованием произведения распределения интенсивности в голограмме $I(x, y)$, комплексной амплитуды опорной волны $R(x, y)$ и квадратичной фазовой функции пространственного распространения волны

$$w(x, y) = \exp\left[i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)\right]. \quad (10)$$

Отметим, что интеграл (9) является интегралом свертки первых двух сомножителей и функции (10).

Интенсивность $I(x, y; d)$ и фаза $\phi(x, y; d)$ восстановленного изображения могут быть получены из рассчитанного на расстоянии d комплексного поля $Q(\xi, \eta)$ с помощью следующих соотношений:

$$I(x, y; d) = |Q(x, y)|^2,$$

$$\phi(x, y; d) = \arctg\left(\frac{\text{Im}(Q(x, y))}{\text{Re}(Q(x, y))}\right) = \arg(Q(x, y)).$$

Значения фазы $\phi(x, y; d)$, полученные по этой формуле, соответствуют разрывной функции с областью изменения в пределах интервала $[-\pi, \pi]$. Для восстановления непрерывной развернутой картины значений фазы может быть применен один из известных алгоритмов развертывания фазы.

Особенности алгоритмов восстановления изображений в цифровой голографии подробно рассмотрены в работе [4].

Приведем пример использования метода цифровой голографии в целях исследования характеристик элементов микроэлектромеханических систем, которые активно разрабатываются в последние годы [12].

На рис. 10 показаны изображения микроэлектромеханического элемента, восстановленные методом цифровой голографии.

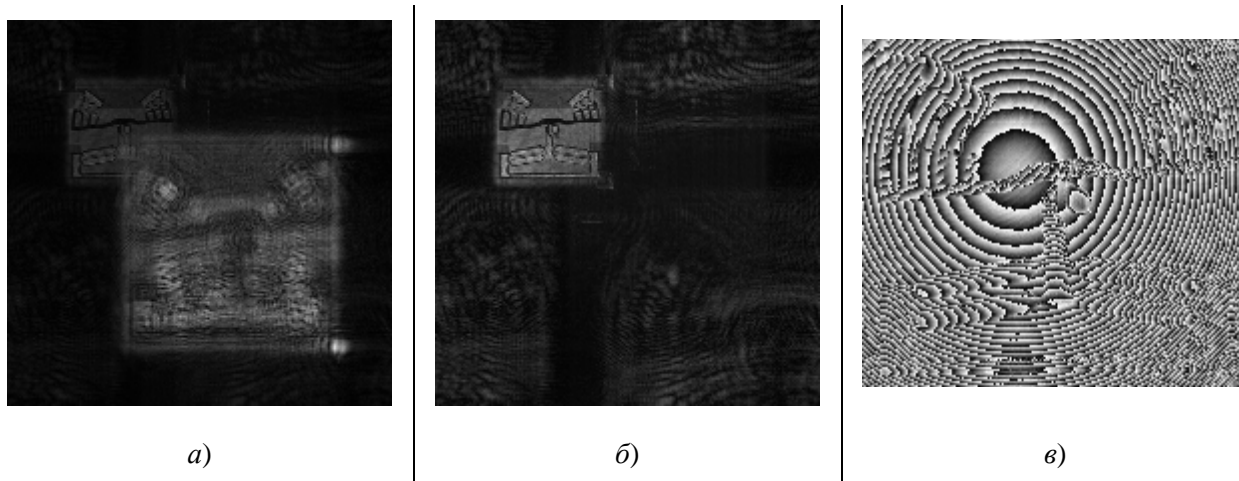


Рис. 10. Восстановленное распределение амплитуд (а), распределение амплитуд при устранении нулевого порядка дифракции (б) и распределение фаз в условиях aberrаций объектива (в)

Изображение в нулевом порядке дифракции (яркий прямоугольник в центральной части рис. 10, а) устраняется методом цифровой фильтрации, в результате чего выделено изображение объекта (рис. 10, б). Восстановленное распределение фаз изображения (рис. 10, в) искажено влиянием aberrаций объектива. Для устранения фазовых aberrаций записывалась дополнительная цифровая голограмма на соседнем плоском участке поверхности, и при восстановлении распределения фаз получена оценка aberrаций (см. рис. 11).

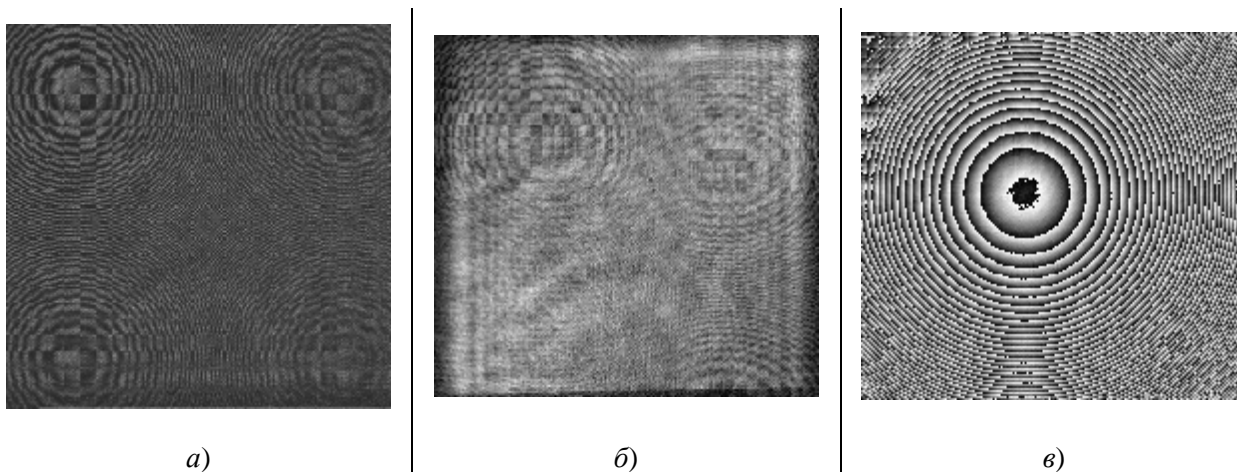


Рис. 11. Цифровая голограмма плоской поверхности вблизи контролируемого микроэлектромеханического элемента (а), реконструированное распределение амплитуд (б) и фаз (в) изображения

После вычитания распределения фаз (рис. 11, в) из распределения фаз в изображении объекта (рис. 10, в) обеспечивается компенсация фазовых аберраций (см. рис. 12, б).

Для восстановления рельефа необходимо выполнить развертывание значений фазы (рис. 12, б) вне пределов $[-\pi, \pi]$. Ввиду неоднозначности разрывов функции изменения значений фазы и влияния шумов, задача развертывания фазы может быть однозначно решена при условии наличия априорной информации о рельефе поверхности. В частности, необходимо предварительное знание о том, является ли рельеф непрерывным, а его области – связанными друг с другом. Кроме этого, диапазон однозначности значений фазы равен 2π , поэтому при резких скачках рельефа на границах исследуемого элемента положение этого элемента относительно подложки определяется только заранее известной конструкцией микросистемы.

В результате развертывания фазы восстановлен рельеф поверхности (рис. 12, в).

Технология компьютерной записи голограмм и восстановления изображений позволяет провести полноценную цифровую обработку и предоставляет широкие возможности для анализа по сравнению с традиционным оптическим процессом, причем для исследования доступны как амплитудные, так и фазовые характеристики поля.

Методы цифровой голографии основаны на количественном расчете распространения волн, что позволяет восстанавливать амплитуду и фазу оптического поля, причем как в плоскости объекта, так и на любом промежуточном расстоянии между объектом и плоскостью голограммы.

Цифровая обработка позволяет отфильтровать фоновые шумы изображения и устранить нулевой порядок дифракции. Пространственное разрешение восстановленного объектного поля может быть улучшено путем настройки параметров алгоритма восстановления голограммы, компенсируя тем самым более низкое по сравнению с фотопластинкой пространственное разрешение ПЗС-камеры.

В последние годы проведены исследования, направленные на совершенствование методов и техники цифровой голографии. Перспективными направлениями исследований в области цифровой голографии являются многоволновая (цветная) голография, цифровая голография с использованием источников излучения малой когерентности, помехоустойчивые методы развертывания полной фазы объектной волны, быстродействующие алгоритмы компьютерной обработки цифровых голограмм в реальном времени для исследования динамических объектов.

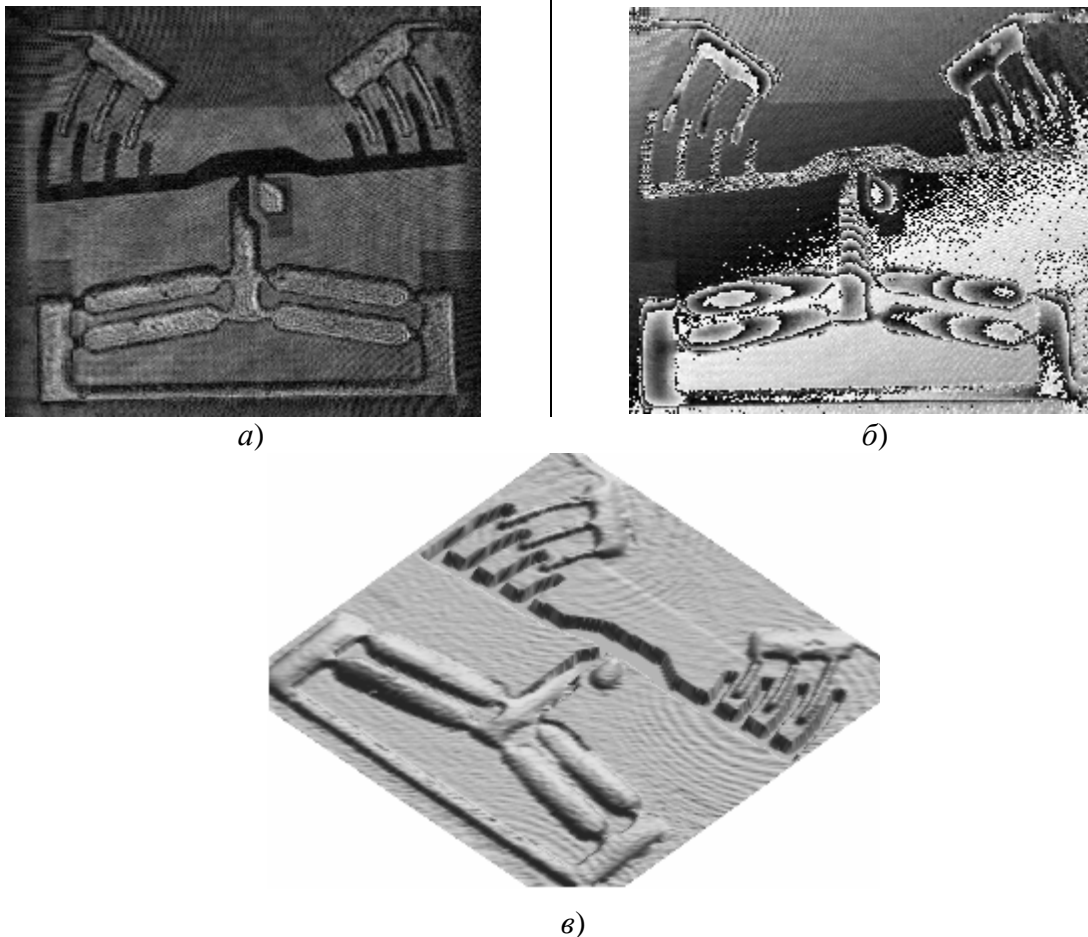


Рис. 12. Изображение микроэлектромеханического элемента (а), восстановленное распределение фаз (б) и восстановленный рельеф поверхности (в)

Трехмерная фотография

Известно, что традиционная фотография обеспечивает получение двумерных изображений трехмерных объектов, при этом утрачивается информация об объекте вдоль третьей координаты. В ряде случаев возможно восстановить утраченную информацию, например, используя закономерности распределения яркости в картинах полутонов [13], однако в общем случае это не обеспечивает однозначности получаемых результатов.

Известны методы определения формы трехмерных поверхностей на основе оптических стереосистем [13], которые можно отнести к классу систем «пассивного» наблюдения. Наряду с достоинствами (простота и относительно невысокая стоимость), такие системы обладают существенными недостатками – зависимостью результатов от характера объекта и условий освещения, чувствительность к влиянию фоновых засветок, сложность математических методов и компьютерных алгоритмов обработки и др.

В последние годы получили широкое распространение системы «активного» типа, в которых объект освещается источником излучения с известными свойствами, что позволяет преодолеть указанные выше недостатки традиционных методов. В качестве источника излучения может использоваться лазер, пучок которого сканирует объект. Использование различных методов модуляции излучения, чаще всего по амплитуде или частоте, позволяет реализовать режим лазерного дальномера для восстановления трехмерного рельефа поверхности [14, 15].

Активное развитие компьютерных технологий и совершенствование технологии многоэлементных приемников излучения (видеокамер) позволило заменить электромеханическое сканирование электронным и создало предпосылки разработки

методов восстановления трехмерной формы объектов более простыми техническими средствами на основе использования принципа «проекции полос», сформированных в когерентном или некогерентном свете (см., например, [16-18]) и «структурированного освещения» [19-21] - освещения объектов некогерентным излучением с заданным пространственным распределением яркости.

На рис. 13 - 14 иллюстрируется принцип формирования изображений при структурированном освещении [22].

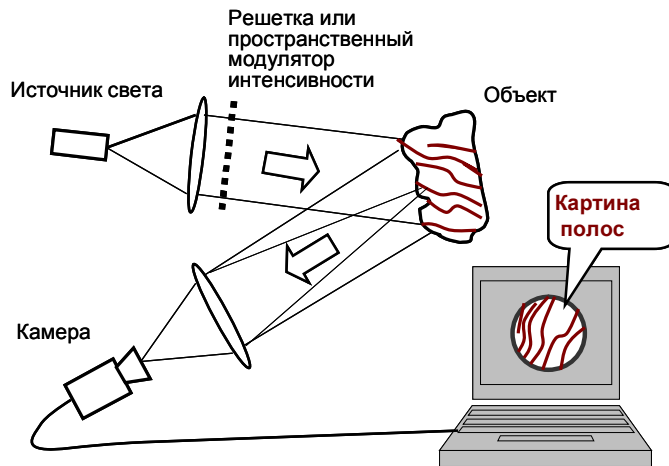


Рис. 13 Принцип структурированного освещения

Восстановление трехмерной формы объектов при структурированном освещении основывается на принципе триангуляции: при известном взаимном угловом расположении осей источника (проектора) и видеокамеры обеспечивается однозначное соответствие элементов проецируемого распределения яркости (так называемого «паттерна») и элементов видеокамеры в области наблюдения.

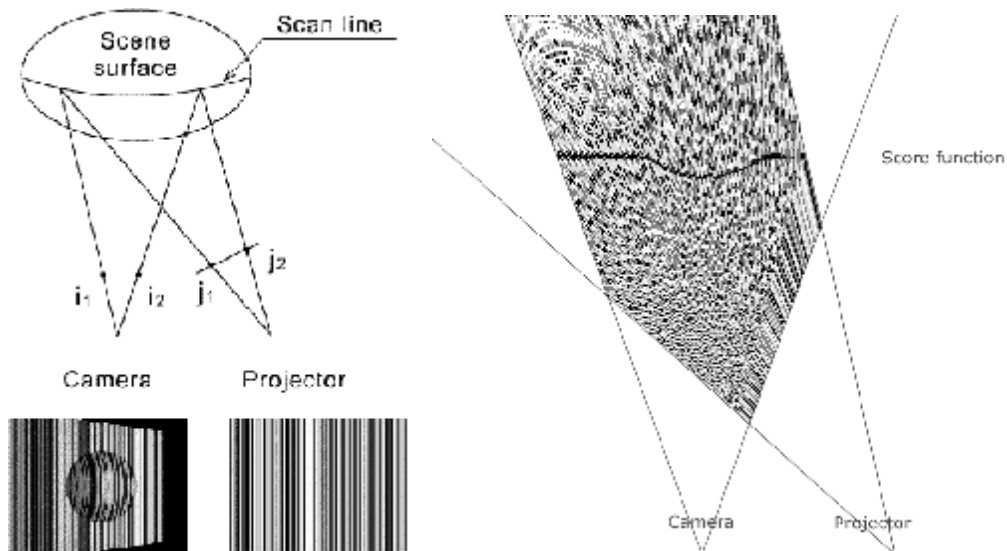


Рис. 14. Пример функции соответствия

При освещении объекта набором «паттернов» с известным распределением яркости, каждый «паттерн» деформируется в соответствии с рельефом поверхности, и расстояние до каждой точки поверхности представляется бинарным кодом [21]. Операция декодирования позволяет получить оценку расстояния до каждой точки поверхности. При проекции параллельных полос картина полос видоизменяется в соответствии с формой

освещаемой поверхности. В правой части рис. 14 показан пример функции соответствия для одной горизонтальной линии. Немонотонность рельефа реальных объектов, обусловленная, например, резкими скачками или затенением отдельных участков, может приводить к разрывам функции соответствия. Для преодоления этой проблемы функция соответствия анализируется на отдельных ее сегментах [22].

Использование бинарных паттернов (рис. 13) ограничивает быстродействие системы, поскольку для получения данных о рельефе в широком диапазоне однозначности требуется формирование и регистрация нескольких паттернов с различным шагом полос. Этот недостаток устраняется при использовании цветных паттернов, которые содержат суперпозицию нескольких паттернов, разделяемых по принципу спектральной селекции [22, 23]. Формирование оптимальных цветных паттернов с устранением избыточности в повторяемости цветов и обеспечением наибольшего различия цветов в соседних полосах паттерна является важной задачей, одно из возможных решений которой дано в работе [22]. Пример оптимизированного паттерна показан на рис. 15 (в полутоновом представлении).

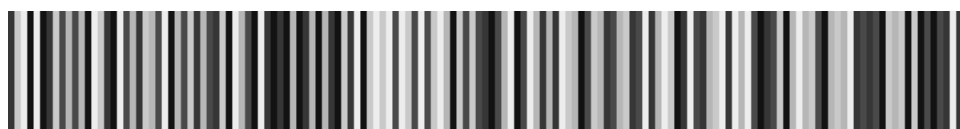


Рис. 15. Синтезированный паттерн для метода структурированного освещения

Методы структурированного освещения позволяют восстанавливать форму трехмерных объектов сложного вида. Один из примеров восстановления [22] иллюстрируется на рис. 16.

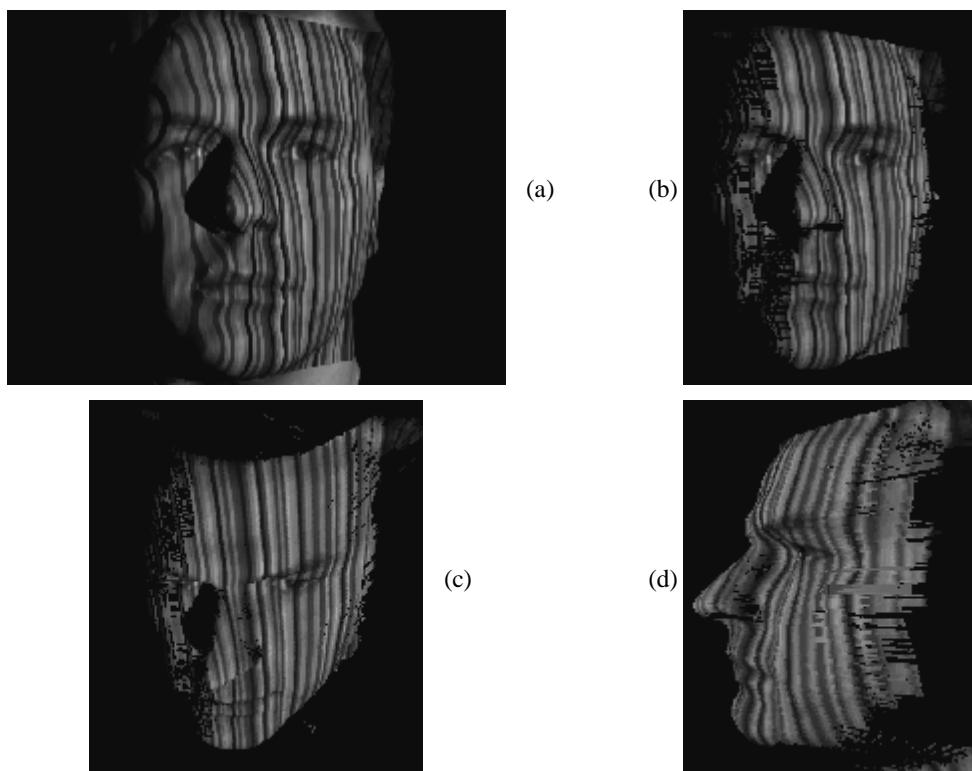


Рис. 16. Пример восстановления трехмерной формы поверхности при использовании метода структурированного освещения с цветным паттерном: исходный объект (a) и реконструкция формы (вид с различных ракурсов)

На рис. 16 заметны дефекты реконструкции формы при наблюдении объекта с одного направления под ограниченным углом, вследствие чего возникают искажения на затененных участках. Этот недостаток преодолевается при расширении угла наблюдения видеокамеры или при регистрации изображений с нескольких ракурсов.

Системы структурированного освещения находят широкое применение при реконструкции формы различных объектов в расширенном диапазоне геометрических размеров – от биологических объектов (см., например, [16]) до ценных предметов искусства [15, 24]. Перспективной областью применения являются методы реинжиниринга в технологиях проектирования, когда информация о форме поверхности объектов позволяет оптимизировать технологии создания объектов аналогичного назначения.

Заключение

Рассмотренные методы, относящиеся к области компьютерной фотоники, отражают современные направления научных исследований и разработок, проводимых в ведущих университетах, международных научных центрах и лабораториях. Представленные примеры относятся к ряду научно-технических задач, получивших развитие в последние годы [1], в решении которых приняли активное участие сотрудники, аспиранты и студенты Санкт-Петербургского государственного университета ИТМО.

Компьютерная фотоника включает перспективные методы и технологии компьютерной обработки когерентных и некогерентных изображений, в том числе сформированных в гиперспектральной области – от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов. Методы компьютерной обработки изображений рассмотрены в ряде книг (см., например, [25-27]).

Важно отметить, что компьютерная фотоника является областью информационных технологий и обеспечивает решение проблем формирования, преобразования, передачи, обработки и визуализации изображений. В последние годы эффективность информационных технологий рассматривается с позиций соотношения качества обслуживания и стоимости создаваемых систем [28], что является важнейшим критерием развития информационных технологий. Системы компьютерной фотоники основываются на достижениях фундаментальной науки и ориентированы на актуальные потребности современного информационного общества.

Благодарности

Автор выражает благодарность аспирантам и студентам, принявшим активное участие в исследованиях по тематике настоящей работы, и, прежде всего, А. Захарову, в течение ряда лет выполнившему исследования и разработки методов и компьютерных программ в области оптической когерентной томографии, М. Волкову, разработавшему эффективные методы и алгоритмы двумерной локально-адаптивной фильтрации когерентных изображений с реконструкцией фазы, С. Балтийскому, выполнившему работы по компьютерной реконструкции изображений в цифровой голографии, А. Шучкину, создавшему новые компьютерные алгоритмы восстановления формы трехмерных объектов на основе структурированного освещения и динамического программирования.

Литература

1. Proc. Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision (OSAV'2004, St. Petersburg, Russia, 19-21 October 2004). Saint Petersburg State University ITMO, 2004.

2. В.Н. Васильев, И.П. Гуров. Технология бесконтактного контроля объектов на основе когерентного и спектрального радаров в биомедицинских исследованиях и промышленности /В кн.: Оптические и лазерные технологии. Сборник статей /Под ред. В.Н. Васильева. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2001. С. 160-176.
3. Гуров И.П. Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы. /В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики /Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб :СПбГУ ИТМО, 2004. С. 6-30.
4. Балтийский С.А., Гуров И.П., Де Никола С., Коппола Д., Ферраро П. Современные методы цифровой голографии. /В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики /Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 91-117.
5. Schmitt J.M. Optical coherence tomography: a review //IEEE J. Select Topics Quant. Electron. 1999. V.5. P. 1205-1215.
6. Danilchenko D., Sachs M., Lankenau E., Koenig F., Huettmann G., Schnorr D., Al-Shukri S. Optical coherence tomography (OCT) of bladder. Potential of a new high-resolution imaging technique by endoscopic diagnosis //Proc. OSAV'2004 (St. Petersburg, Russia, 19-21 October 2004). Saint Petersburg State University ITMO, 2004. P. 367-368.
7. Goodman J.W., Lawrence R.W. Digital image formation from electronically detected holograms //Appl. Phys. Lett. 1967. V.11. P. 77-79.
8. Kronrod R.W., Merzlyakov N.S., Yaroslavskii L.P. Reconstruction of a hologram with a computer //Sov. J. Tech. Phys. 1972. V.17. P. 333-334.
9. Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. М.: Радио и связь, 1987. С. 243-286.
10. Schanrs U, Jüptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction //Appl. Opt. 1994. V.33. P. 179-181.
11. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970.
12. Baltiysky S., Gurov I., De Nicola S., Ferraro P., Finizio A., Coppola G. Characterization of microelectromechanical systems by the digital holography method //The Imaging Science Journal, submitted for publication.
13. Хорн Б.К.П. Зрение роботов. М.: Мир, 1989.
14. Carlsson T.E., Wei A. Three-dimensional measurement using light-in-flight speckle interferometry /In: Proc. 3rd Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, W. Jueptner and W. Osten, eds. Akademie Verlag, Berlin, 1997. P. 164-170.
15. Schirripa Spagnolo G., Guattari G., Sapia C., Ambrosini D., Paoletti D., Accardo G. Three-dimensional optical profilometry for artwork inspection //J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2000. V.2. P. 353-361.
16. Surrel J., Surrel Y. The fringe projection technique for shape acquisition of live biological objects", J. Opt. 1998. V.29. P. 6-13.
17. Notni G., 360-deg shape measurement with fringe projection: calibration and application /In: FRINGE'01, 4th Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, W. Osten and W. Jueptner, eds. ELSEVIER, 2001. P. 311-323.
18. Gurov I., Vozniuk J. Rough surface shape retrieval in a fringe projection technique by the image enhancement and fringe tracing method /In: Proc. QCAV'2001, Int. Conf. on Quality Control by Artificial Vision (Le Creusot, France, May, 21-23, 2001), Toulouse, CÉPADUÈS-ÉDITIONS, 2001. V.1. P. 79-84.
19. Posdamer J.L., Altschuler M.D. Surface measurement by space-encoded projected beam systems //Computer Graphics and Image Processing. 1982. V.18, N.1. P. 1-17.
20. Kujawinska M., Wegiel M., Sitnik R. Real-time 3D shape measurement based on color structure light projection /In: FRINGE'01, 4th Int. Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, W. Osten and W. Jueptner, eds. ELSEVIER, 2001. P. 324-331.
21. Salvi J., Pagès J., Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems //Pattern Recognition. 2004. V.37, N.4. P. 827-849.

22. Shtuchkin A., Gurov I. Structured light range sensing using color patterns and two stage dynamic programming /In: Proc. OSAV'2004, Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision (St. Petersburg, Russia, 19-21 October 2004). Saint Petersburg State University ITMO, 2004. P. 40-47.
23. Zhang Li, Curless B., Seitz S. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming /Int. Symp. on 3D Data Processing, Visualization and Transmission. Padova, Italy, 2002. P. 24-36.
24. Sansoni G., Docchio F. From the Vittoria Alata to the Mille Miglia Ferrari racing car: 3D optical acquisition, CAD and rapid prototyping of unique examples of cultural heritage /In: Proc. ODIMAP IV, 4th Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements and Applications (University of Oulu, Finland, 16-18 June 2004), pp. 292-303.
25. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. В 2-х томах. М.: Мир, 1982.
26. Хромов Л.И., Цицулин А.К., Куликов А.Н. Видеоинформатика. Передача и компьютерная обработка видеоинформации. М.: Радио и связь, 1991.
27. Реконструкция изображений /Под ред. Г. Старка. М.: Мир, 1992.
28. Häusler G. Low cost high performance 3D-sensors by information theoretical optimization /In: Proc. ODIMAP IV, 4th Topical Meeting on Optoelectronic Distance/Displacement Measurements and Applications (University of Oulu, Finland, 16-18 June 2004), pp. 260-261.