

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РСФСР ПО ДЕЛАМ НАУКИ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ  
НОВОСИБИРСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи  
УДК 539.375+621.378.9 : 778.4

ИЛЬИНЫХ СЕРГЕЙ ПЕТРОВИЧ

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ, ОСНОВАННЫХ НА МЕТОДЕ ФАЗОВЫХ  
ПСЕВДОСДВИГОВ

Специальность : 05.11.16 – Информационно-измерительные системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 1991 г.

Работа выполнена в Новосибирском электротехническом институте.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
Козачок А.Г.

Научный консультант - кандидат технических наук Хандогин В.А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
член-корреспондент АН РСФСР  
Гибин И.С.

кандидат технических наук Гужов В.И.


Ведущая организация указана в материалах Совета.

Защита состоится 19 сентября 1991 года в 10-00 часов  
на заседании специализированного совета Д.063.34.03 в Ново-  
сибирском электротехническом институте по адресу:  
630092, г. Новосибирск, 92, пр. К.Маркса, 20, НЭТИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1991г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
кандидат технических наук

  
Б.Ю. Лемешко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена проблеме создания голографических измерительных систем (ГИС) с количественной расшифровкой голографических интерферограмм.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** За последние годы достигнут значительный прогресс в области развития когерентно-оптических методов измерений, продемонстрировавших перспективность и целесообразность создания автоматизированных голографических измерительных систем для решения широкого круга задач экспериментальной механики.

Поиск исследователей в этом направлении определяется тем, что голографическая интерферограмма содержит большой объем измерительной информации об исследуемом объекте. Это, с одной стороны, является несомненным преимуществом голографических методов измерений, а с другой стороны - сдерживает их широкое применение для решения практических задач экспериментальной механики из-за относительно высокой сложности количественной расшифровки голографических интерферограмм.

Анализ современного состояния и перспектив голографических систем и методов количественного анализа интерферограмм показывает, что в настоящее время известные подходы к решению задачи расшифровки существенно ориентированы на использование вычислительной техники. Причем наиболее успешными из них оказались те, которые допускают естественную переформулировку на языке дискретной математики. Развитие сложившихся тенденций в автоматизации голографических исследований привело к резкому возрастанию функциональной нагрузки на вычислительный комплекс, который постепенно превратился в главный элемент интерферометрических систем.

Конструкции современных голографических измерительных систем имеют две отличительные особенности: во-первых, общность составных элементов (лазер, интерферометр, устройство ввода оптической информации в ЭВМ и вычислительный комплекс), которая отражает глубокое физическое единство основополагающих принципов интерференционных измерений; во-вторых, почти однозначную зависимость структурных отличий и функциональных возможностей систем от принятой концепции восстановления поля фазы и его программно-алгоритмического воплощения.

Указанные обстоятельства делают актуальной задачу разработки и исследования новых методов и алгоритмов расшифровки интерферо-

грамм и создание на их основе голографических измерительных систем отвечающих современным требованиям.

РАБОТА ВЫПОЛНЕНА с 1986 по 1991 гг. в лаборатории голографических систем Новосибирского электротехнического института в соответствии с "Координационным планом АН СССР проведения научно-технических работ на 1986 - 1990 гг." по проблеме 1.4., "Оптика. Квантовая электроника" (п. 1.4.6.1 "Оптическая голография"), утвержденный Президиумом АН СССР и Единой целевой комплексной научно-технической программой ГКНТ О.Ц.047 (задание 06.21) на 1984 - 1985 гг. и на период до 1990 г., утвержденной ГКНТ СССР, Президиумом АН СССР и Госпланом СССР.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: разработка голографических измерительных систем с количественной расшифровкой интерферограмм на основе метода фазового псевдосдвига и их применение в приложениях экспериментальной механики.

#### ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.

1. Анализ современного состояния и перспектив голографических измерительных систем и методов количественного анализа голографических интерферограмм.

2. Разработка и исследование метода расшифровки на основе гомоморфной фильтрации поля яркости статических интерферограмм (метод фазовых псевдосдвигов).

3. Разработка алгоритмов и методик на основе метода фазовых псевдосдвигов, реализующих расшифровку статических голографических интерферограмм полученных различными способами регистрации.

4. Разработка программно-алгоритмического обеспечения голографических систем с количественной расшифровкой голографических интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов.

5. Формулирование требований, которым должны удовлетворять голографические системы с количественной расшифровкой на основе методов фазовых псевдосдвигов.

6. Разработка и исследование указанных голографических измерительных систем.

7. Применение голографических измерительных систем для голографического неразрушающего контроля цилиндрических оболочек давления, экспериментальных исследований остаточных напряжений в алюминиевых сплавах и анализа амплитуд вибрации пластин из стеклопластика.



**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.** Проводимые исследования основаны на методах когерентной оптики, общих принципах разработки и исследования измерительных систем (в том числе голографических), теории линейных цифровых фильтров, механики деформируемого твердого тела.

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА:**

- разработан новый класс гомоморфных анизотропных фильтров, которые переводят поле яркости интерферограммы в поле фазы интерференционных полос, подавляя при этом, низкочастотные аддитивные и мультипликативные шумы;

- предложена дифференциальная форма фильтра и ее конечно-разностные аппроксимации. Показано, что на его основе могут быть реализованы эффективные алгоритмы расшифровки статических интерферограмм. Разрешающие соотношения для простейших видов конечно-разностных аппроксимаций фильтра формально воспроизводят закономерности расшифровки интерферограмм методом управляемого фазового сдвига. Однако, в отличие от данного метода расшифровка производится всего по одной интерферограмме;

- на основе гомоморфных фильтров разработаны способы голографического определения фазовых искажений волнового фронта, защищенных авторскими свидетельствами /1,2/;

- предложены тестовые интерферограммы для экспериментальной оценки метрологических характеристик методов расшифровки интерферограмм и голографических измерительных систем;

- сформулированы требования, которым должны удовлетворять голографические измерительные системы с количественным анализом интерферограмм на основе метода фазовых псевдосдвигов. Предложены их структурно-функциональные схемы.

**ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ:**

- разработаны алгоритмы расшифровки голографических интерферограмм на основе оригинального метода фазовых псевдосдвигов;

- получены оценки предельных значений метода фазовых псевдосдвигов и определены условия для их достижения;

- с помощью синтезированных на ЭВМ интерферограмм исследованы точностные характеристики голографических измерительных систем на основе фазового псевдосдвига. Установлено, что разработанные голографические измерительные системы обеспечивают определение полей фазы волнового фронта и ее первой и второй производных с приведенной погрешностью не превышающей 5, 10 и 15%, соответ-

ственно;

- разработан программно-алгоритмический комплекс для количественной расшифровки голографических интерферограмм в различных приложениях экспериментальной механики;

- реализованы голографические системы для голографического неразрушающего контроля, экспериментальных исследований остаточных напряжений, анализа амплитуд вибраций, обладающие высокой точностью измерений, что подтверждено в последующем при исследовании конкретных образцов и изделий;

- решены практически важные задачи голографического неразрушающего контроля цилиндрических оболочек давления, экспериментальных исследований остаточных напряжений в алюминиевых сплавах, анализа амплитуд вибраций панелей из стеклопластика;

- разработанные способы измерений и контроля использованы при выполнении НИР по договору ЛГС-1-87/А (N гос. рег. У43820) и внедрены на соответствующих предприятиях (материалы подтверждающие внедрение и использование представлены в Приложении 2).

НА ЗАЩИТУ ВНОСЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

- принципы расшифровки путем гомоморфной анизотропной фильтрации поля яркости интерферограмм и ее реализация;

- методики расшифровки интерферограмм, основанные на методе фазовых псевдосдвигов;

- программно-алгоритмический комплекс расшифровки интерферограмм на основе метода фазовых псевдосдвигов;

- результаты исследования основных метрологических характеристик систем и методов расшифровки с использованием машинных моделей;

- теоретический анализ и экспериментальная проверка основных метрологических характеристик алгоритмов количественной расшифровки голографических интерферограмм на основе метода фазовых псевдосдвигов;

- структурно-функциональная схема и конкретная реализация голографических измерительных систем с количественной расшифровкой голографических интерферограмм;

- результаты применения разработанных голографических измерительных систем в различных приложениях экспериментальной механики.

АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах..:

- на совместном научном семинаре отдела голографических методов и автоматизации научных исследований и кафедры информационно-измерительной техники Новосибирского электротехнического института;

- на научном семинаре кафедры теоретической механики Новосибирского института инженеров железнодорожного транспорта;

- на Сибирской школе по современным проблемам механики деформируемого твердого тела, СО АН СССР, 29 февраля - 4 марта 1988 г., Новосибирск;

- на зональной научно-технической конференции "Применение лазеров в промышленности и научных исследованиях", 13-16 сентября 1988 г., Миасс;

- на всесоюзном симпозиуме "Методы и применение голографической интерферометрии", 23 мая - 1 июня 1990 г., Куйбышев.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе: тезисы докладов на конференции (симпозиуме) - 2, заключительный отчет по хозяйственной НИР ЛГС - 1 - 87/А (N гос. рег. У43320), описания а.с. - 2, статей в центральных журналах - 5.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 81 наименования и двух приложений. Общий объем основной части 152 стр., 41 илл., 5 табл. Объем приложений 26 стр.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ рассмотрены известные методы количественного анализа голографических интерферограмм и голографические измерительные системы реализующие их. На основании этих данных сформулированы основные задачи теоретических и экспериментальных исследований, направленные на разработку метода фазовых псевдосдвигов для количественной расшифровки голографических интерферограмм и создание голографических измерительных систем на его основе.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ разрабатывается и исследуется метод расшифровки голографических интерферограмм на основе метода фазовых псевдосдвигов. Для восстановления фазы интерференционной картины

используется гомоморфный цифровой фильтр дифференциальная форма которого имеет вид

$$\Phi = \text{Arctg} \left\{ \frac{I''}{I' \varphi'} - \frac{\varphi''}{\varphi'^2} \right\} \quad (1)$$

где  $(\cdot)' = d/ds$ ,  $(\cdot)'' = d^2/ds^2$ ,  $I$  - поле яркости интерферограммы, которое описывается выражением

$$I(x, y) = A(x, y) [1 + V(x, y) \cos \varphi(x, y)] \quad (2)$$

где  $A(x, y)$  - средняя яркость,  $V(x, y)$ ,  $\varphi(x, y)$  - контраст и фаза интерференционных полос соответственно;

В общем виде конечно-разностная аппроксимация фильтра (1) для произвольных точек оцифровки поля яркости имеет вид

$$\Phi = \text{Arctg} \frac{C}{S}$$

$$C = (I_{i+n_2} - I_{i+m_2})(\cos n_1 \Delta \Phi_i - \cos m_1 \Delta \Phi_i) - (I_{i+n_1} - I_{i+m_1})(\cos n_2 \Delta \Phi_i - \cos m_2 \Delta \Phi_i) \quad (3)$$

$$S = (I_{i+n_2} - I_{i+m_2})(\sin \Delta \Phi_i - \sin m_1 \Delta \Phi_i) - (I_{i+n_1} - I_{i+m_1})(\sin n_2 \Delta \Phi_i - \sin m_2 \Delta \Phi_i)$$

где  $n_1$ ,  $m_1$  и  $n_2$ ,  $m_2$  - расстояния от точек оцифровки яркости

$I_{i+n_1}$ ,  $I_{i+m_1}$ ,  $I_{i+n_2}$ ,  $I_{i+m_2}$  до  $i$ -той точки соответственно; значение фазового псевдосдвига  $\Delta \Phi_i$  рассчитывается по формуле

$$\Delta \Phi_i = \text{Arccos} \left( \frac{I_{i+2n} - I_{i-2n}}{2(I_{i+n} - I_{i-n})} \right) \quad (4)$$

где база фильтра  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;

Значения шумовых полей  $A_i$  и  $V_i$  восстанавливаются по следующим правилам

$$A_i = \frac{I_i (2I_{i-2n} - I_{i+2n})}{2 \sin^2 n \Delta \Phi_i} \quad (5)$$

$$V_i = \frac{I_i - A_i}{A_i \cos \Phi_i} \quad (6)$$

Большое внимание уделяется исследованию метрологических ха-



рактических методов фазовых псевдосдвигов. Рассмотрено влияние нелинейности регистрации поля яркости голографических измерительных интерферограмм на точность расшифровки по серединам интерференционных полос. Анализ дифференциальной формы фильтра показал, что при нелинейной регистрации поля яркости (1) гомоморфная фильтрация воспроизводит изофазные линии, соответствующие серединам интерференционных полос, без искажений. Все другие изофазные линии деформируются. Получено выражение для оценки абсолютной погрешности реконструкции фазы при нелинейном процессе регистрации интерферограммы.

$$\Delta \phi_n = \frac{I'}{\phi'} (\ln D')' + o(D'^3) \quad (7)$$

где  $D'$  - коэффициент контрастности фотоматериала (при регистрации интерферограммы на промежуточный фотоноситель).

Разработана методика расшифровки интерферограмм с сильной нелинейностью поля яркости на основе гомоморфной фильтрации. Исследовано влияние параметров гомоморфного фильтра на точность расшифровки. Показано, что базу фильтрации необходимо согласовывать с шагом интерференционных полос. Точность задания начальных параметров фильтрации 50% для шага полос и  $\pm 35^\circ$  для направления монотонности изменения фазы. Разработаны методики расшифровки для интерферограмм с различным числом интерференционных полос. В общем случае, расшифровка интерферограмм содержит следующие этапы:

1. Ввод интерферограммы в ЭВМ;
2. Выделение на интерферограмме относительно однородных по шагу полос и монотонности изменения фазы, и задание в них начальных значений указанных параметров. Данный этап допускает полную автоматизацию;
3. Выделение середин интерференционных полос;
4. Реконструкция кусочно-постоянной составляющей полной фазы;
5. Реконструкция полной фазы;
6. Оптимизация локальной базы фильтра путем задания ограниченных на допустимые значения фазового псевдосдвига;
7. Расчет массива  $\cos \Delta \phi_i$  по формуле (4) и его сглаживание устранением выбросов, обусловленных погрешностью квантования уровня яркости интерферограммы;
8. Расчет массивов  $\phi_i$ ,  $A_i$ ,  $V_i$  по формулам (3), (5), (6).



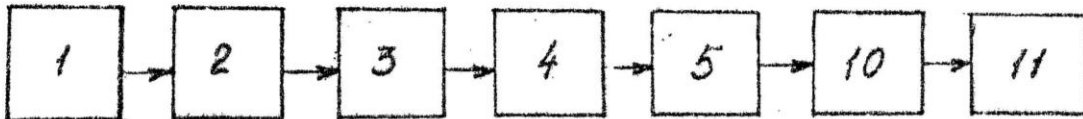
9. Расчет массивов первой и (или) второй производной поля фазы по формулам

$$\frac{\partial}{\partial x} \phi(x, y) = \frac{\pi}{h_x} \quad (8)$$

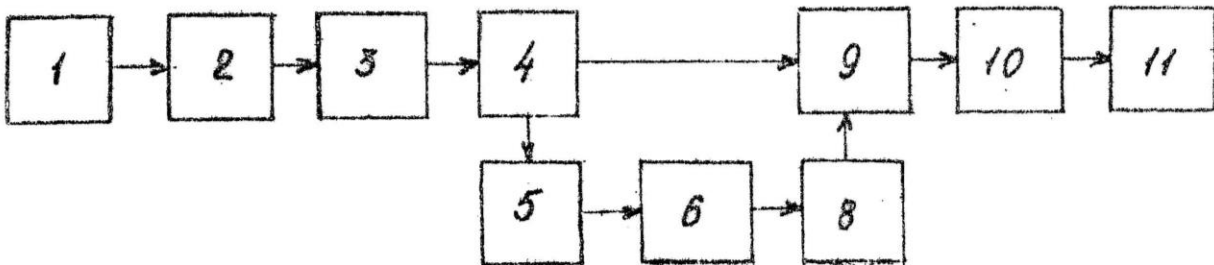
$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \phi(x, y) = \frac{\pi (k_{1,x} - k_{2,x})}{k_{1,x} k_{2,x} (k_{1,x} + k_{2,x})} \quad (9)$$

11. Интерпретация и представление результатов расшифровки в виде эквивалентных полутоновых картин или графиков на экранах телемониторов.

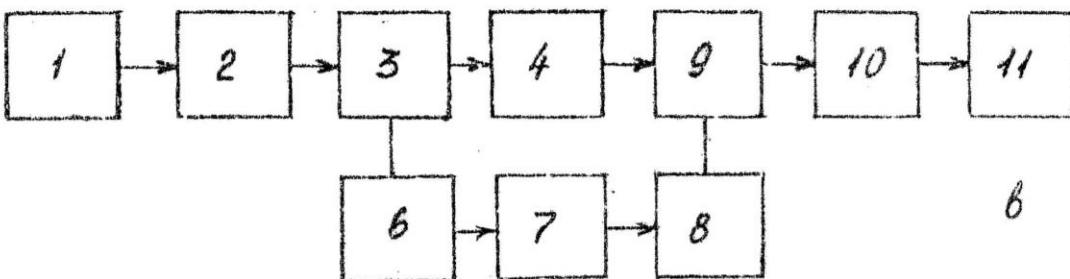
Последовательности выполнения этапов расшифровки для интерференционных картин, содержащих различное количество интерференционных полос, показаны на рис. 1.



a



б



в

Рис. 1. Последовательности этапов расшифровки при числе интерференционных полос 20-25 (а), более 20 (б), (в)

Типичное время выполнения этапов приведено в таблице 1.

п/п	Содержание этапа	Время
1	Фильтрация низких частот	47 с
2	Ввод начальных данных для гомоморфного фильтра	2 мин 45 с
3	Реконструкция середин полос и поля фазы	3 мин 12 с
4	Реконструкция поля первой производной фазы	16 - 20 с
5	Реконструкция поля второй производной фазы	30 - 60 с
6	Цикл построения двух одномерных графиков в любых сечениях	9 с
7	Ввод-вывод изображения из памяти базового ВК	7 с

Таблица 1.

Исследованы причины возникновения случайных и систематических погрешностей, в частности, влияние спекл-шума голографических изображений на основные метрологические характеристики метода фазовых псевдосдвигов. Предложены способы снижения влияния дестабилизирующих факторов. Рассмотрены особенности расшифровки интерферограмм, получаемых при различных способах регистрации (муар интерференционных полос, усреднение во времени и т.д.).

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ с учетом анализа результатов полученных при разработке метода фазовых сдвигов и исследовании его метрологических характеристик, формулируются требования, которым должны удовлетворять разрабатываемые голографические системы для решения практических задач в различных приложениях экспериментальной механики. Получено выражение связывающее технические и метрологические характеристики ГИС

$$|\delta h| \leq \ell; \min N \geq \frac{\max A}{\min A} \frac{\max V}{\min V} \frac{2}{1 - \cos\left(\frac{2\pi \ell}{h}\right)} \quad (12)$$

где  $\lambda$ ,  $\delta\lambda$  - шаг полос (определяемый как локальный период (полупериод) поля яркости и его относительная погрешность соответственно;  $\ell$  - шаг дескритизации;  $N$  - количество разрешимых градаций яркости.

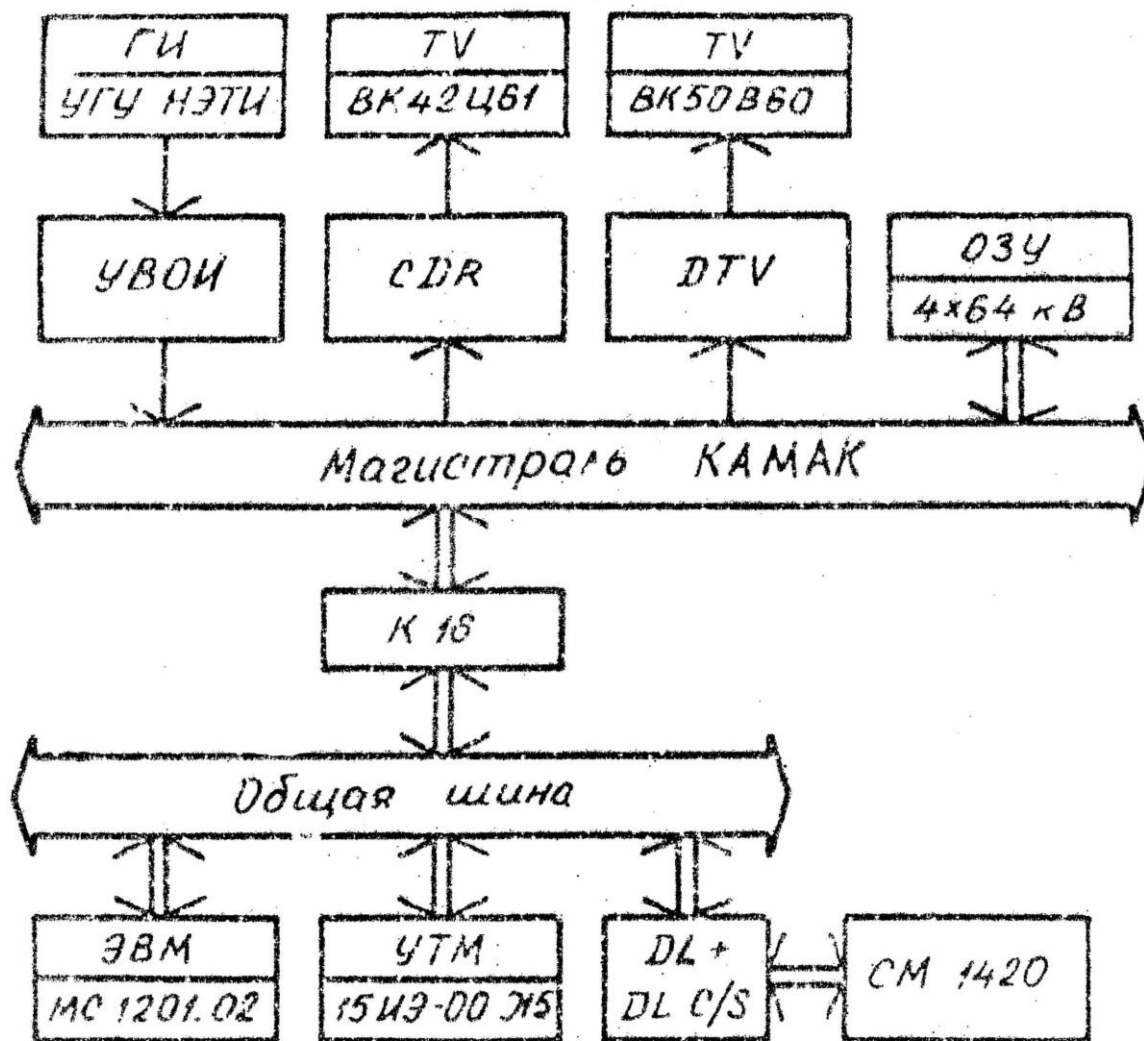


Рис.2. Структурно-функциональная схема базовой ГИС

Списана структурно-функциональная схема базовой ГИС (рис.2) и особенности конкретных вариантов измерительных систем, реализованных на практике. Для последующего проведения высокоточных измерений перемещений и деформаций проанализированы метрологические

характеристики базовой измерительной системы. При этом основное внимание уделено алгоритмическим погрешностям расшифровки, для чего методом статистических испытаний исследована синтезируемая на ЭВМ интерферограмма (рис. 3а, б) размером 256x256 элементов. Синтезированная тестовая интерферограмма содержит основные особенности присущие реальным интерферограммам, например, параболическую и гиперболическую особенности

$$\Phi(x,y) = k_1 \left[ \sqrt{\left(\frac{y - \delta/2}{a/3}\right)^2 + \left(\frac{x - a/4}{a/4}\right)^2} - \left(\frac{x - a/4}{170\delta/256}\right)^3 \right] + k_0 \quad (13)$$

где  $k_0$ ,  $k_1$  - весовые коэффициенты, а  $a$ ,  $\delta$  - масштабные коэффициенты соответственно.

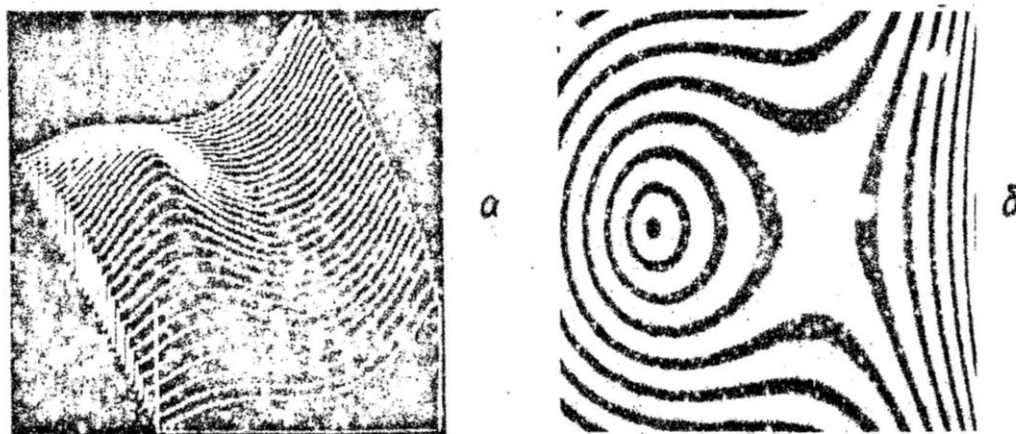


Рис. 3. Поле фазы (а) и поле яркости (б) синтезированной тестовой интерферограммы.

Сравнением результатов расшифровки по формулам (3), (8), (9) и точных значений тестовых полей установлено, что погрешность определения фазы находится в пределах 1-5%, а погрешности определения первой и второй производных фазы не превышают соответственно 10% и 15%. Графики распределения полей фазы и ее первой и второй производных в отдельных сечениях показаны на рис. 4.

Программное обеспечение ГИС (ПО) реализовано в операционной среде RT-11A (версии 5.0 и выше) и представляет собой двухуровне-

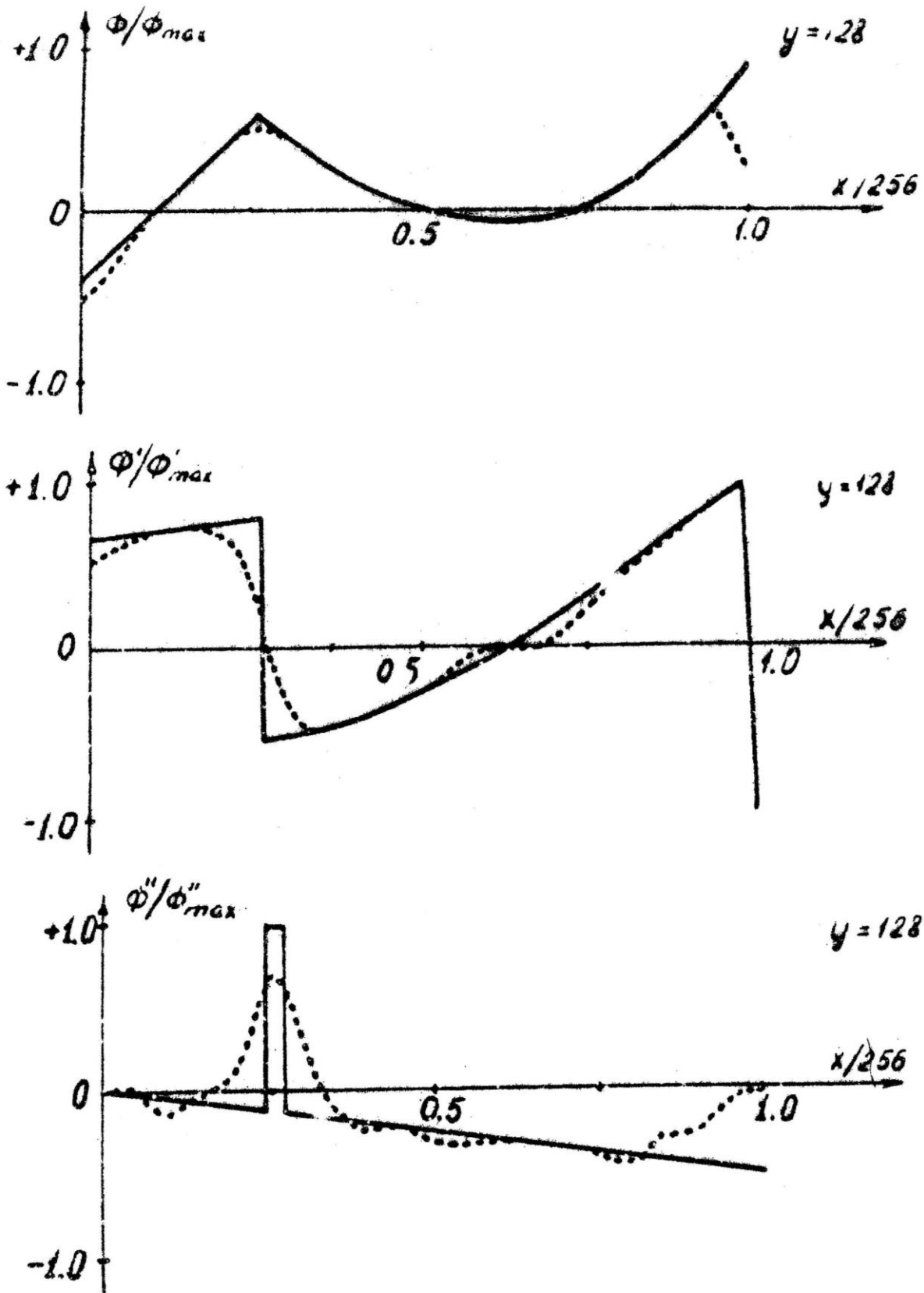


Рис.4. Графики распределения поля фазы и ее первой и второй производных в отдельных сечениях.



вый пакет программ (ПП). Первый уровень ПП осуществляет программный интерфейс физических устройств (написан на языке MACRO - ассемблер), второй уровень обеспечивает обслуживание системы (написан на алгоритмическом языке высокого уровня FORTRAN-IV). ПП позволяет выполнять следующие функции:

- ввод, вывод и хранение входной информации;
- воспроизведение массивов информации на экране в виде эквивалентных 16-ти градационных полей яркости для полутонного черно-белого монитора, либо в виде 8-цветного изображения для цветного монитора;
- построение графиков полей в произвольных сечениях с выводом на печать или экраны телемониторов;
- обработку интерферограмм на основе гомоморфной фильтрации;
- линейные преобразования полей типа: масштабирования, транспонирования, поворотов, свертки и т.д.

Разработанный ПП представляет собой законченный по архитектуре и достаточно универсальный каркас ПО для автоматизированной расшифровки интерферограмм и может служить основой для разработки ПО различных специализированных ГИС.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ рассмотрены результаты применения разработанных измерительных систем для решения ряда практических задач в приложениях экспериментальной механики:

- голографический неразрушающий контроль структурных аномалий цилиндрических оболочек давления. Последние нагружались перепадом давлений, в трехголограммном интерферометре одновременно регистрировались 3 голограммы оболочки с разворотом на  $120^\circ$ , т.е. одновременно наблюдалась вся поверхность. Восстановленные фрагменты интерферограмм размером около  $100 \times 100$  мм вводились в ЭВМ с шагом  $100 \times 100$  мкм и обрабатывались независимо. Задача контроля структурных аномалий оболочек полностью решена путем восстановления коэффициента концентрации изгибных деформаций с погрешностью не более 15%. Косвенным подтверждением достоверности контроля служит качественная и количественная согласованность полей полученных расшифровкой разных интерферограмм.

- анализ остаточных технологических напряжений в сварном соединении из алюминиевого сплава 1201. Оценка остаточных напряжений вдоль сварного шва производилась методом освобождения. В двухголограммном интерферометре регистрировались нормальная и боковая

компоненты полей перемещений в зоне шва и вне его. Сканирование интерферограмм осуществлялось с шагами 50x100 мкм и 30x50 мкм. Далее производилась реконструкция полей перемещений для каждой интерферограммы и их совместная расшифровка. Погрешность измерения величины остаточных напряжений не превышала 10%. Оценка остаточных напряжений производилась по формуле

$$\sigma^o = - \frac{\epsilon E}{1 - \mu^2} \quad (14)$$

где  $\epsilon$  - деформации вызванные освобождением материала,  $E$ ,  $\mu$  - модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно.

Результаты расшифровки показали, что распределение остаточных напряжений в сварном соединении имеет сложную структуру. Для оценки достоверности результатов расшифровки измерение остаточным напряжений было произведено дополнительно тензометрическим и оптическим методами (рис. 5). Показано, что голографический способ позволяет получить наиболее полную информацию о распределении остаточных напряжений.

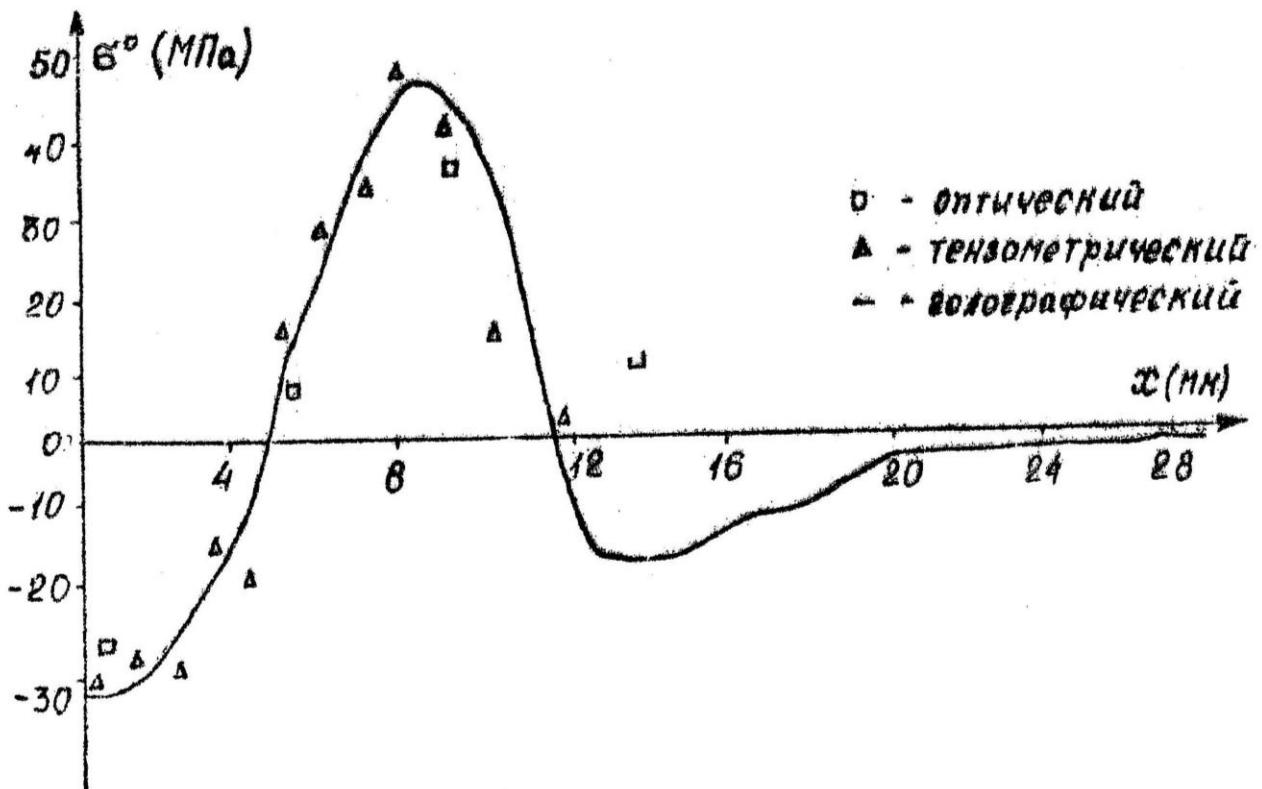


Рис. 5. Экспериментальные значения остаточных напряжений

- анализ амплитуд вибраций в панелях из стеклопластика. В качестве образцов использовались печатные платы для изделий вычислительной техники. Исследовались амплитуды вибраций при различных способах крепления печатных плат и собственные формы колебаний печатных плат с радиоэлементами и без них. Регистрация интерферограмм производилась методом усреднения во времени. Ввод интерферограмм в ЭВМ производился телекамерой КТП-64 при 256x256 элементах разрешения. Получены количественные значения амплитуд вибраций при 4-х и 6-ти точечном закреплении печатных плат. Разработанная измерительная система позволяет оперативно измерять амплитуды вибраций.

В ВЫВОДАХ резюмируются основные результаты диссертации, отвечающие поставленным задачам.

В ПРИЛОЖЕНИЯХ представлены программы и алгоритмы расшифровки голографических интерферограмм, а также материалы, подтверждающие внедрение и использование результатов диссертации.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Разработан, исследован и применен многофункциональный высокопроизводительный программно-аппаратный комплекс автоматизированной расшифровки статических интерферограмм для голографических измерительных систем, ориентированных на прикладные исследования в экспериментальной механике. При этом решены следующие задачи:

1. Разработан метод расшифровки статических интерферограмм, получаемых различными способами регистрации (двух экспозиций, муара интерференционных полос и усреднения во времени). Метод основан на принципах гомоморфной фильтрации и интерпретирован в виде фазовых псевдосдвигов, которые образуются путем пространственных сдвигов поля яркости интерферограммы. Метод защищен а.с. N1431523 и а.с. N1543954.

2. Выполнен теоретический и экспериментальный анализ метрологических характеристик метода расшифровки. Основное внимание уделено исследованию источников алгоритмических погрешностей метода, влияющих на точность восстановления фазы. В частности, показано, что при изменении шага полос в 2 раза, погрешность восстановления фазы может достигать 1,5-2%. Предложен способ расшифровки, учитывающий указанный фактор.

3. При нелинейной регистрации поля яркости погрешность восстановления фазы, обусловленная нелинейной регистрацией поля яркости, может существенно искажать результаты расшифровки. Анализ свойств гомоморфного фильтра, реализующего расшифровку, показал, что изофазные линии, соответствующие серединам интерференционных полос, воспроизводятся без искажений. Предложен способ расшифровки по серединам интерференционных полос, который не требует их отслеживания.

4. На основе выполненных исследований сформулированы требования к голографическим измерительным системам с гарантированно низким уровнем погрешности восстановления фазы, в которых может быть реализован метод фазовых псевдосдвигов. В частности, показано, что для восстановления поля фазы с приведенной погрешностью не более 5%, требуется осуществить ввод интерферограммы с шагом пространственной дискретизации  $1/10$  интерференционной полосы при 256 уровнях квантования поля яркости.

5. На базе существующей голографической системы неразрушающего контроля реализован конкретный вариант голографической измерительной системы с количественной расшифровкой на основе метода фазовых псевдосдвигов, отвечающей сформулированным требованиям. Измерительная система включает голографический интерферометр, электромеханическое устройство ввода оптической информации в ЭВМ и вычислительный комплекс на основе микро-ЭВМ "Электроника-30" со средствами визуализации оптической информации.

6. Разработан аппаратно независимый пакет программ, реализующий конкретные методики расшифровки. Пакет программ позволяет осуществить обработку, редактирование, отображение и документирование данных эксперимента в виде таблиц, графиков или полутонных изображений.

7. Точностные характеристики измерительной системы и их программного обеспечения исследованы с применением специальных численных моделей интерферограмм. Предложено три типа интерферограмм, которые содержат все типичные особенности присущие реальным интерферограммам (эллиптическую и гиперболическую особенности, вырожденную точку). Установлено, что при расшифровке указанных интерферограмм, реконструкция поля фазы и ее первых и вторых производным производится с приведенной погрешностью не хуже 5, 10 и 15% соответственно.



Эффективность разработанных программно-аппаратных средств показана на примере решения практически важных задач экспериментальной механики:

1. Измерены поля радиальных деформаций в стеклотекстолитовых оболочках давления с погрешностью не более 15%.

2. Выполнен анализ амплитуд вибраций печатных плат при различных способах закрепления с погрешностью не более 10%.

3. Исследованы остаточные технологические напряжения в сварном соединении пластин из алюминиевого сплава 1201. Получены эпюры осевых остаточных напряжений в сварном шве и его окрестностях с погрешностью не более 10%. Сравнение результатов, полученных различными способами (голографическим, оптическим и тензOMETРИЧЕСКИМ), показало их удовлетворительное совпадение.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. А.с. N1481528 СССР МКИ 021/G Способ определения фазовых искажений волнового фронта /Гришанов А.Н., Де С.Т., Ильиных С.П., Хандогин В.А. (не подлежит опубликованию).

2. А.с. N1543954 СССР МКИ 021/G Способ определения фазовых искажений волнового фронта /Гришанов А.Н., Де С.Т., Ильиных С.П., Хандогин В.А. (не подлежит опубликованию).

3. Гришанов А.Н., Де С.Т., Ильиных С.П., Хандогин В.А. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч. I. Анализ и алгоритмы //Автометрия, 1989.-N.1.-с.3-11.

4. Де С.Т., Денежкин Е.Н., Ильиных С.П., Хандогин В.А. Универсальная система расшифровки интерферограмм //Тезисы докладов зонального научно-технического семинара "Применение лазеров в промышленности и научных исследованиях". г. Челябинск, 1988.-с.54.

5. Де С.Т., Ильиных С.П., Хандогин В.А. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч. II. Реализация алгоритмов //Автометрия, 1989.-N.1.-с.11-19.

6. Денежкин Е.Н., Ильиных С.П., Хандогин В.А. Голографический неразрушающий контроль композитных цилиндрических оболочек //Дефектоскопия, 1989.-N3.-с.58-63.

7. Денежкин Е.Н., Ильиных С.П., Хандогин В.А. Количественная расшифровка интерферограмм на основе фазовых псевдосдвигов. Ч. III. Родственные алгоритмы //Автометрия, 1989.-N.2.-с.51-56.

8. Ильиных С.П., Хандогин В.А. Программно-алгоритмический комплекс расшифровки интерферограмм //Тезисы докладов Всесоюзного



симпозиума "Методы и применение голографической интерферометрии".  
28 мая - 1 июня 1990г., Куйбышев.-с.82.

9. Разработка и создание комплекса алгоритмических, программных и аппаратных средств для прикладных исследований с помощью систем на основе матричных фотоприемников. Заключительный отчет по НИР ЛГС-1/87А (номер гос. рег. У43320).

10. Хандогин В.А., Де С.Т., Ильичих С.П. Программно-алгоритмический комплекс для расшифровки интерферограмм. //Оптика и спектроскопия, 1989.-т.66.-вып.3.-с.642-647.



---

Подписано в печать

1991г.

Формат 84x60x16

Бумага сберточная, Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 1,0

Заказ 564

Бесплатно

---

Отпечатано на участке оперативной полиграфии  
Новосибирского электротехнического института  
630092, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.