

**Национальная академия наук Кыргызской республики  
Институт физики им. академика Ж. Жеенбаева  
Кыргызско-Российский Славянский университет  
им. Б. Ельцина**

Диссертационный совет Д 01.21.633

На правах рукописи  
**УДК 535.41: 778.38**

**Тынышова Толгонай Дайырканкожоевна**

**Цифровая голографическая интерферометрия фазовых сред**

01.04.05 - оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Бишкек – 2021**

**Работа выполнена на кафедре «Обеспечение безопасности информационных систем» Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова**

**Научный руководитель:** Исманов Юсупжан Хакимжанович  
доктор физико-математических наук, доцент,  
и. о. профессора каф. «Физика и прикладная химия», Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова

**Официальные оппоненты:** Чен Борис Борисович  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры физики и микроэлектроники, Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б. Ельцина

Байтереков Алымбек Токоевич  
кандидат физико-математических наук, доцент  
кафедры электроники и теоретической физики  
Кыргызского национального университета  
им. Ж. Баласагына

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технологический институт имени К. А. Валиева Российской академии наук, лаборатория опто- и наноэлектроники, 117218, Россия, Москва, Нахимовский проспект, д.36, к.1

Защита состоится 21 октября 2021 г. в 16-00 часов на заседании Диссертационного Совета Д 01.21.633 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) физико-математических наук при Институте физики им. академика Ж. Жеенбаева Национальной академии наук Кыргызской Республики и Кыргызско-Российском Славянском университете им. Б. Ельцина по адресу: 720071, г. Бишкек, пр. Чуй 265а. Идентификационный код онлайн трансляции защиты диссертации [https://vc.vak.kg/b/d\\_0-pj7-m6b-mev](https://vc.vak.kg/b/d_0-pj7-m6b-mev)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Национальной академии наук Кыргызской Республики и Кыргызско-Российского Славянского университета и на сайте [info@iobjournal.org](mailto:info@iobjournal.org)

Автореферат разослан «20» сентября 2021 г.  
Ученый секретарь  
диссертационного совета,

д. ф.-м. н., профессор



Касмамьтов Н. К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации** Методы современной голографической интерферометрии были разработаны и в дальнейшем развиты такими учеными как Е. Лейт, Ч. Вест, К. Стэтсон, Ю. И. Островский, А. А. Акаев, А. Марипов и др. В своих работах они показали, что голография позволяет восстанавливать волновые фронты с произвольным изменением фазы поперек волнового фронта, что открыло возможности применения в интерферометрии элементов с более низким оптическим качеством. 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. В голографическом интерферометре сравниваемые волновые фронты запоминаются, и это позволяет ввести еще одно измерение, а именно во времени. Все сказанное подчеркивает несомненную *актуальность* развития старых и разработки новых методов голографической интерферометрии

Высокая чувствительность - это основа интерферометрических исследований. В принципе, чувствительность классических методов интерферометрии можно повысить. Надо учитывать, что в классической интерферометрии любое изменение волнового фронта определяется оптическим методом, что позволяет использовать именно оптические методы повышения чувствительности. Однако развитие информационных технологий позволяет добиваться подобных результатов посредством различных трансформаций записанного и оцифрованного изображения интерференционной картины. Современное развитие информационных технологий делает весьма *актуальным* переход к цифровым методам обработки интерферограмм, и это, в первую очередь, касается голографической интерферометрии, так как цифровые методы голографии очень хорошо отработаны, а сами методы голографической интерферометрии оказываются значительно более чувствительными. Т. е. добиться наибольшей эффективности варьирования чувствительности интерференционных методов измерения параметров фазовых сред можно, используя, в первую очередь, методы цифровой голографической интерферометрии, что подчеркивает *актуальность* разработки этих методов.

**Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами, проводимыми образовательными и научными учреждениями.**

Представляемая работа является инициативной.

### **Цель и задачи исследования.**

Разработка методов повышения эффективности цифровых голографических интерферометрических систем.

В ходе выполнения работы решались следующие основные задачи:

1. Разработка способа предварительной обработки сложных интерферограмм, получающихся на выходе голографических интерферометров.
2. Разработка метода повышения чувствительности голографической интерферометрической системы на основе цифровой записи и восстановления голограммы.
3. Определение положения плоскостей самовоспроизведения в выходных каналах многоканального голографического интерферометра для простейших фазовых неоднородностей.

### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Разработан способ предварительной обработки сложных интерферограмм посредством расфокусирования изображений.
2. Разработан метод повышения чувствительности голографической интерферометрической системы с помощью преобразования оцифрованной интерференционной картины, получающейся на выходе голографической системы.
3. Получены соотношения, позволяющие определять положения плоскостей самовоспроизведения в каналах многоканального голографического интерферометра для простейших фазовых неоднородностей.

### **Практическая значимость полученных результатов.**

1. Использование в качестве способа предварительной обработки интерферограмм расфокусировки изображений позволяет значительно ускорить процесс предварительной обработки сложных интерферограмм, получающихся на выходе голографического интерферометра, что приведет к повышению эффективности систем автоматической обработки интерферограмм.
2. Метод повышения чувствительности голографической интерферометрической системы на основе цифровой записи и восстановления голограммы позволяет значительно повысить чувствительность голографических интерферометров без использования дорогостоящей и сложной модернизации оптической схемы.
3. Так как плоскости самовоспроизведения в каналах голографического интерферометра совпадают с плоскостями локализации интерферометрической картины, то определение точного положения плоскостей самовоспроизведения в выходных каналах многоканального голографического интерферометра в присутствии фазовых неоднородностей позволит получать на выходе голографического интерферометра более качественные интерферограммы.

## **Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Способ предварительной обработки сложных интерферограмм, получающихся на выходе голографических интерферометров.
2. Метод повышения чувствительности голографической интерферометрической системы посредством преобразования оцифрованного изображения интерференционной картины.
3. Соотношения, позволяющие определять положения плоскостей самовоспроизведения в выходных каналах многоканального голографического интерферометра в присутствии простейших фазовых неоднородностей.

**Личный вклад соискателя.** Представленные в диссертации результаты являются итогом самостоятельных исследований автора. Личным вкладом являются: участие в постановке задач, разработка математических моделей и их компьютерные реализации, анализ полученных результатов.

Общее направление исследований было предложено научным руководителем.

## **Апробация результатов исследования.**

Основные результаты диссертации докладывались:

1. VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, 2018 г.;
2. VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, 2019 г.;
3. IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, 2020 г.;
4. X Международная конференция по фотонике и информационной оптике, Москва, 2021 г.

## **Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.**

Основные результаты исследований опубликованы в 15 научных статьях.

## **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, содержащего 144 наименования. Общий объем диссертации составляет 123 страницы, 31 рисунок.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** раскрывается и обосновывается актуальность темы диссертации, излагаются цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе, «Методы голографии в интерферометрии»**, проведен обзор основных методов получения интерферограмм в голографической интерферометрии фазовых сред. Большая часть основных положений теории, практических вопросов и потенциальных возможностей интерференционно-

голографического метода была освещена в ранних работах Хормана, Пауэлла и Стетсона, Хефлингера, Вуеркера и Брукса (1965). На сегодняшний день методы голографической интерферометрии, широко используются при исследованиях фазовых сред. Несомненным преимуществом голографической интерферометрии перед классической является возможность сравнивать волны, сформированные в разные моменты времени. Голография – линейный процесс, в том смысле, что она позволяет зарегистрировать последовательно во времени две или более оптические волны, которые впоследствии могут быть восстановлены одновременно. Поэтому с ее помощью можно производить суммирование, вычитание или даже усреднение во времени совокупности волн. В обзоре рассмотрены и проанализированы все существующие на сегодняшний день методы голографической интерферометрии, такие как методы реального времени, двух экспозиций, сдвиговой и др.

Проведен также обзор широко используемых методов цифровой голографической интерферометрии.

Как показал обзор, даже голографическая интерферометрия в ее оптическом варианте имеет важный недостаток, связанный со сложностью, а часто с дороговизной перестройки оптических схем для исследования различных объектов. Особенно это касается возможности увеличения чувствительности голографических интерферометров.

Развитие информационных технологий позволяет добиваться подобных результатов посредством различных трансформаций записанного и оцифрованного изображения интерференционной картины. Переход к цифровым методам обработки интерферограмм особенно эффективен в голографической интерферометрии, так как цифровые методы голографии очень хорошо отработаны, а сами методы голографической интерферометрии оказываются значительно более чувствительными. Т. е. добиться наибольшей эффективности варьирования чувствительности интерференционных методов измерения параметров фазовых сред можно, используя, в первую очередь, методы цифровой голографической интерферометрии.

**Во второй главе, «Методы улучшения характеристик голографических интерферометров и обработки интерферограмм»,** определены **объект исследования** - цифровые голографические интерферометры и интерферограммы, получаемые на выходе этих устройств, и **предмет исследования** - изучение возможности улучшения характеристик голографического интерферометра методами цифровой обработки интерферограмм, получаемых в интерферометрической системе. Глава посвящена рассмотрению методов решения поставленных в исследовании задач, построению теоретических моделей, на основе которых решаются указанные задачи.

**Метод обработки сложных интерферограмм** Рассмотрена общая методология предварительной обработки сложных интерферограмм, получающихся на выходе голографического интерферометра. Сделан вывод об эффективности способа предварительной обработки интерферограмм на основе процесса расфокусирования изображений. Процесс расфокусирования интерферограмм в системах машинной обработки интерферограмм на этапе предварительной подготовки перед вводом в компьютер является достаточно эффективным. Данный способ позволяет посредством выбора степени расфокусирования интерферограммы сложного вида, в которой присутствуют как высокочастотные, так и низкочастотные компоненты, устранять ее высокочастотную составляющую. Показано, что оптическая система, используемая для расфокусирования интерферограмм с целью устранения высокочастотной составляющей, должна использовать некогерентное световое излучение. Анализ подобной системы был проведен для некоторого усредненного по длине волны значения некогерентного излучения, используемого в оптической системе. На рисунке 2.1 показана упрощенная оптическая схема, используемая для получения изображения произвольного объекта в некогерентных лучах света.

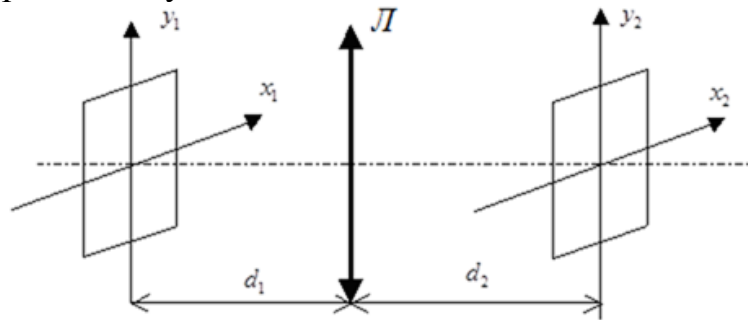


Рисунок 2.1-Схема размещения плоскостей объекта, изображения и линзы в оптической системе.  $d_1$  и  $d_2$  -расстояния от плоскости объекта до линзы и от линзы до плоскости изображения соответственно; Л-линза.

При облучении исследуемого объекта некогерентным светом процесс преобразования оптическим устройством описывается, как линейная функция относительно интенсивности света. Исходя из этого предположения, получено выражение для оптической передаточной функции этой системы в общем виде

$$\Omega(\xi, \eta) = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} Z\left(\mu - \frac{\lambda d_2 \xi}{2}, \tau - \frac{\lambda d_2 \eta}{2}\right) Z\left(\mu + \frac{\lambda d_2 \xi}{2}, \tau + \frac{\lambda d_2 \eta}{2}\right) d\mu d\tau}{\iint_{-\infty}^{\infty} Z(\mu, \tau) d\mu d\tau}. \quad (2.1)$$

$Z(x, y)$  – функция, характеризующая входной зрачок рассматриваемого оптического устройства;  $\lambda$  - усредненное значение длина волны;  $d_2$  –

дистанция между плоскостями, в которых расположены линза и изображение,  $(\xi, \eta)$  - координаты точки в частотной области,  $\mu = \mu' + \frac{\xi}{2}$ ,  $\tau = \tau' + \frac{\eta}{2}$ ,  $\mu'$  и  $\tau'$  - координаты точек входной плоскости.

Для учета возможной аберрации оптической системы, т. е. для характеристики фазовой неточности в произвольной точке, имеющей координаты  $(x, y)$ , в плоскости зрачка на выходе оптического устройства, вводится некоторая функция  $kV(x, y)$ . В данной функции  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  представляет собой волновое число, а  $V$  - это характеристика погрешности пройденного световой волной пути. Указанная форма записи функции погрешности позволяет представить коэффициент пропускания оптического устройства в виде следующего соотношения:

$$Z_j(x, y) = Z(x, y) \exp[ikV(x, y)] \quad (2.2)$$

$Z_j(x, y)$  - общий вид функции, характеризующей выходной зрачок оптического устройства. Введение аберрации, позволяет представить передающую функцию оптического устройства в виде следующего выражения:

$$G(\xi, \eta) = Z(\lambda d_2 \xi, \lambda d_2 \eta) \exp[ikV(\lambda d_2 \xi, \lambda d_2 \eta)]. \quad (2.3)$$

Попытка учета аберраций приводит к следующему соотношению для функции передачи рассматриваемого оптического устройства:

$$\Omega(\xi, \eta) = \frac{\iint_{B(\xi, \eta)} \exp \left\{ ik \left[ V \left( \mu - \frac{\lambda d_2 \xi}{2}, \tau - \frac{\lambda d_2 \eta}{2} \right) - V \left( \mu + \frac{\lambda d_2 \xi}{2}, \tau + \frac{\lambda d_2 \eta}{2} \right) \right] \right\} d\mu d\tau}{\iint_{B(0,0)} d\mu d\tau} \quad (2.4)$$

Соотношение для тонкой линзы при расфокусировке имеет вид

$$\frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_1} - \frac{1}{f} = \delta,$$

здесь  $d_1$  - дистанция между объектной плоскостью и линзой,  $f$  - фокусное расстояние линзы;  $\delta$  - отклонение от плоскости сфокусированного изображения. Функция аберрации при расфокусировке имеет вид:



$$V(x, y) = \frac{\delta(x^2 + y^2)}{2}.$$

Для оптической системы с квадратным входным зрачком функция входного зрачка имеет вид  $Z(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{b}\right)\text{rect}\left(\frac{y}{b}\right)$ , где  $b$  - сторона квадрата.

Оптическая передаточная функция в этом случае имеет вид

$$\Omega(\xi, \eta) = 4 \frac{\sin[km_x \delta(b/2 - m_x)] \sin[km_y \delta(b/2 - m_y)]}{km_x \delta km_y \delta b^2}. \quad (2.5)$$

$$\text{Здесь } m_x = \frac{\lambda d_2 |\xi|}{2}, \quad m_y = \frac{\lambda d_2 |\eta|}{2}.$$

Для оптической системы, имеющей входной зрачок в виде круга диаметром  $b$

$$Z(x, y) = \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{b/2}\right). \quad (2.6)$$

Соотношение для передаточной функции оптического устройства, имеющего входной зрачок круглой формы

$$\Omega^{kp.}(\xi, \eta) = 4 \int_{\theta_2}^{\theta_1} \exp(-ikC\delta x') 2\gamma_1 dx' / (\pi b^2), \quad (2.7)$$

$$\text{где } C = \sqrt{m_x^2 + m_y^2}, \quad m_x = \frac{\lambda d_2 \xi}{2}; \quad m_y = \frac{\lambda d_2 \eta}{2}. \quad \text{Здесь } \theta_1 = -\theta_2 = \sqrt{R^2 - m_x^2 - m_y^2}.$$

**Метод повышения чувствительности голографического интерферометра** Рассмотрен метод улучшения чувствительности голографической интерферометрической системы посредством преобразования оцифрованной интерференционной картины, получаемой на выходе голографического интерферометра.

Для теоретического обоснования возможности улучшения чувствительности голографического интерферометра была рассмотрена классическая схема записи квази-Фурье голограммы. В этой схеме внеосевой точечный опорный источник и объект размещены в одной плоскости, которую можно назвать входной плоскостью системы. В качестве выходной плоскости, в случае цифровой голографии, обычно берут плоскость датчиков фотоматрицы. Обозначим расстояние между входной плоскостью системы и плоскостью

фотоматрицы через  $l$ . Систему координат во входной плоскости обозначим  $(x_0, y_0)$ , в выходной плоскости  $(x, y)$ .

Распределение интенсивности, зафиксированное фотоматрицей и представляющее собой интерференционную картину, можно рассматривать как цифровую голограмму. Если к такой голограмме применить операцию обратного преобразования Френеля, а в нашем случае это действие сводится к обратному преобразованию Фурье, то мы можем получить восстановленные мнимое и действительное изображения исходного объекта и, также, нулевой дифракционный порядок. Аналитически эта процедура может быть описана следующим образом

$$v(x_0, y_0, z_0) = \frac{\exp(ikz_0)}{ikz_0} \exp\left\{-\frac{i\pi(x_0^2 + y_0^2)}{\lambda z_0}\right\} \times \int \int_{\infty} v_z(x, y, z) \exp\left\{-\frac{i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda z}\right\} \exp\left\{\frac{i2\pi(x_0x + y_0y)}{\lambda z}\right\} dx dy. \quad (2.8)$$

Если речь идет о распределении интенсивности в плоскости голограммы или, в нашем случае, в плоскости фотоматрицы, то распределение интенсивности светового поля, которое представляет собой интерференционную картину, фиксируемую фотоматрицей, имеет вид

$$I(x, y) = |v(x, y)|^2. \quad (2.9)$$

Исходя из формулы (2.9), можем записать для интенсивности

$$I(x, y) = I_u(x, y), \text{ где } I_u(x, y) = |u(x, y)|^2. \quad (2.10)$$

Рассмотрим применимость указанных формул в цифровой голографической интерферометрии.

Изменим фазу объектной волны на  $\Delta\theta(x_0, y_0)$ . Тогда объектная волна во входной плоскости имеет вид  $u'(x_0, y_0) = a \exp[i\theta(x_0, y_0) + i\Delta\theta(x_0, y_0)]$ . В этом случае объектная волна в плоскости записи голограммы имеет вид

$$v(x, y, z) = \frac{\exp(ikz)}{ikz} \exp\left\{-\frac{i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda z}\right\} \int \int_{\infty} |u(x_0, y_0)| \exp[i\theta(x_0, y_0) + i\Delta\theta(x_0, y_0)] \times \exp\left\{-\frac{i\pi(x_0^2 + y_0^2)}{\lambda z}\right\} \exp\left\{\frac{i2\pi(x_0x + y_0y)}{\lambda z}\right\} dx_0 dy_0 \quad (2.11)$$

Метод двух экспозиций математически означает восстановление суммы двух волн – исходной  $u(x, y)$  и с измененной фазой  $u'(x, y)$ . Так как интерференционная картина фиксируется в виде распределения интенсивностей, то

$$\begin{aligned} I(x, y) &= [u(x, y) + u'(x, y)][u(x, y) + u'(x, y)]^* = \\ &= 2a^2 + a^2 \{ \exp[i\Delta\theta(x, y)] + \exp[-i\Delta\theta(x, y)] \}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Воспользуемся формулой Эйлера для перехода от комплексной формы записи интенсивности к действительной

$$I(x, y) = 2a^2 + 2a^2 \cos[\Delta\theta]. \quad (2.13)$$

Исходя из соотношений (2.10) выражение (2.13) можно представить в виде

$$I_{\Sigma} = I_u(x, y) B_{\Sigma} \{1 + \cos[\Delta\theta(x, y)]\}, \quad (2.14)$$

где  $B_{\Sigma}$  – некоторый действительный коэффициент, описывающий полную, т. е. суммарную яркость изображения,  $I_{\Sigma}$  – изображение восстановленного объекта, модулированное полосами интерференции, в случае обычной, не улучшенной чувствительности.

Наличие цифровой информации об объектных и опорных волнах, о зафиксированной фотоматрицей интерференционной картине позволяет производить над этими данными различные математические операции, после которых их снова можно вывести на экран, т. е. визуализировать. Указанные операции можно проводить как на участках от объекта до выходной плоскости, так и на выходе системы, непосредственно с распределением интенсивности, которое фиксирует фотоматрица. Это такие операции, как цифровая фильтрация, свертки и др.

Проведем последовательность следующих математических операций над данными, полученными на выходе нашей интерферометрической системы:

1. Произведем операцию вычитания световых полей в выходной плоскости от исходного объекта и объекта с измененной фазой. Полученный результат восстановим, т. е., в нашем случае это операция обратного преобразования Фурье, и, затем, представим результат в виде распределения интенсивности для разности световых полей.

$$\begin{aligned} \Delta v(x_0, y_0, z_0) &= \frac{\exp(ikz_0)}{ikz_0} \exp\left\{-\frac{i\pi(x_0^2 + y_0^2)}{\lambda z_0}\right\} \times \\ &\times \int \int_{-\infty}^{\infty} [v'_z(x, y, z) - v_z(x, y, z)] \exp\left\{-\frac{i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda z}\right\} \exp\left\{\frac{i2\pi(x_0x + y_0y)}{\lambda z}\right\} dx dy \end{aligned} \quad (2.15)$$

Распределение интенсивности найдем в виде соотношения

$$I_1(x_0, y_0) = |\Delta v(x_0, y_0, z_0)|^2 = [\Delta v(x_0, y_0, z_0)][\Delta v(x_0, y_0, z_0)]^*, \quad (2.16)$$

так как в общем случае  $\Delta v(x_0, y_0, z_0)$  комплексное выражение. Для выходной плоскости выражение (2.16) можно представить, по аналогии с выражением (2.14), в следующем виде

$$I_1(x, y) = I_u(x, y) B_\Sigma \{1 - \cos[\Delta\theta(x, y)]\}. \quad (2.17)$$

2. Вычитаем из соотношения (2.14) выражение (2.17). Полученный результат возводим во вторую степень

$$I_2 = [I_\Sigma(x, y) - I_1(x, y)]^2 = I_u^2(x, y) B_2 \{1 + \cos[2\Delta\theta(x, y)]\}. \quad (2.18)$$

Из соотношения (2.18) видно, что последовательность проведенных операций увеличивает сдвиг фаз между исходной и искаженной волнами в два раза, что приводит к увеличению частоты интерференционных полос в выходной плоскости также в два раза. Т. е. чувствительность голографического интерферометра увеличивается в два раза.

Обобщив предложенную для  $I_2$  схему повышения чувствительности голографической интерференционной системы, запишем

$$I_{2^m} = I_u^{2^m} \frac{B_\Sigma^{2^m}}{2} \{1 + \cos[2^m \Delta\theta(x, y)]\}, \text{ где } m = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.19)$$

Из соотношения (2.19) видно, что повышение чувствительности голографического интерферометра ограничивается только возможными спекл-шумами, которые могут ухудшить контраст полос интерференционной картины, а в случае цифровой голограммы разрешением фотоматрицы.

Соотношение (2.19) позволяет получить выражение для оптической разности, которую может зафиксировать голографический интерферометр

$$\Delta L = 2^{-m} \lambda K(x, y). \quad (2.20)$$

Выражение (2.20) представляет собой итерационное соотношение. Это соотношение позволяет при заданных экспериментальных данных рассчитать оптическую разность хода для разных значений параметра  $m$ . Изменяя параметр  $m$ , мы можем изменять значение оптической разности хода, которую может зафиксировать наша голографическая интерференционная система. Для фазовых сред с очень слабой оптической плотностью и с очень небольшими

изменениями оптических неоднородностей, т. е. сред, для которых  $\Delta L(x, y) < \lambda$ , увеличиваем значение  $m$ .

**Определение положения плоскостей саморепродуцирования в присутствии фазовых сред** Интерферометры, основанные на эффекте самовоспроизведения, используют две параллельно расположенные решетки, причем вторая решетка должна быть расположена точно в плоскости самовоспроизведения первой решетки. Однако, исследуемый фазовый объект, размещаемый между решетками, влияет на положение этих плоскостей. В случае многоканального голографического интерферометра, использующего эффект самовоспроизведения, положения плоскостей самовоспроизведения, кроме того, определяют плоскости локализации интерференционной картины. Все это предполагает необходимость точного определения положения плоскостей самовоспроизведения в присутствии фазовых неоднородностей. Общий алгоритм нахождения светового поля в присутствии фазовых сред достаточно трудоемкий и сложный. Задача определения характеристик сложных фазовых сред может быть значительно упрощена, если любую, достаточно сложную фазовую среду представить как совокупность простейших фазовых неоднородностей, таких как тонкая линза, параллельная пластина и тонкий оптический клин. Т. е. для решения задачи о влиянии произвольных фазовых сред на световое поле, прошедшее сквозь решетку, необходимо рассчитать воздействие указанных элементарных фазовых неоднородностей на это поле.

**В третьей главе, «Результаты компьютерного моделирования и оптических экспериментов»,** рассмотрены результаты оптических экспериментов и компьютерного моделирования, позволяющие обосновать выбранные методы решения задач исследования и предложенные для их решения математические модели.

**Метод обработки сложных интерферограмм** Рассмотренная модель оптической системы с наличием aberrаций произвольного вида была использована для предварительной обработки сложных интерферограмм фазовых сред, получаемых на выходе цифрового многоканального голографического интерферометра. Для целей исследования влияния расфокусировки брались интерферограммы, полученные в высокочувствительных каналах интерферометра. В этих каналах формируются интерферограммы, содержащие как высокочастотные составляющие, так и низкочастотные муаровые полосы. Причем информацию об исследуемом фазовом объекте несут обе составляющие. Рисунок 3.1 (присутствует сферическая aberrация) показывает результаты расфокусирования для интерферограмм тонкой линзы. Как видно из рисунка, выбор коэффициента расфокусирования позволяет четко проявить муар, удалив голографическую составляющую из интерферограммы.

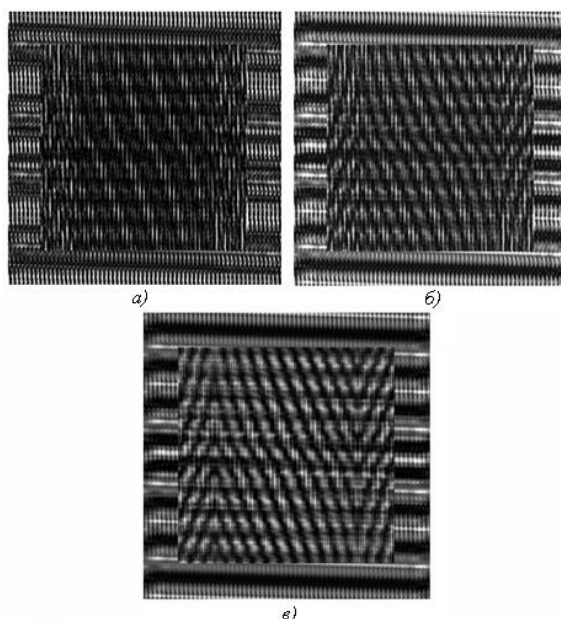


Рисунок 3.1 - Интерферограмма линзы с наличием сферической аберрации.  
 а). Расфокусирования нет,  $\mu = 0$  ; б). Расфокусирующий коэффициент  $\mu = 0,003$  ;  
 в). Расфокусирующий коэффициент  $\mu = 0,005$  .

**Метод повышения чувствительности голографического интерферометра** Предложенный метод улучшения чувствительности голографического интерферометра был проверен экспериментально. В качестве фазового объекта исследования использовалась прозрачная пластиковая линейка.



Рисунок 3.2 - Действительное изображение, полученное при восстановлении голограммы недеформированного объекта

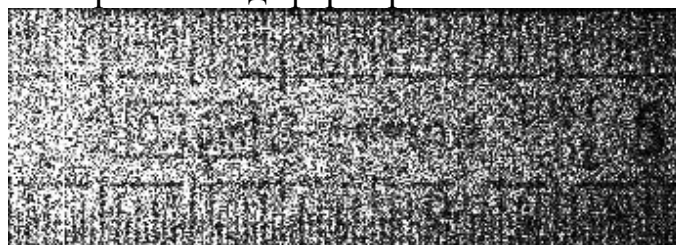


Рисунок 3.3 - Действительное изображение, полученное в результате восстановления цифровой голограммы слабдеформированного фазового объекта



Рисунок 3.4 - Действительное изображение, полученное при двукратном усилении чувствительности голографического интерферометра



Рисунок 3.5 - Действительное изображение исследуемого объекта, восстановленное при четырехкратном усилении чувствительности голографического интерферометра

На рисунке 3.2 показан восстановленный недеформированный фазовый объект (прозрачная пластиковая линейка). Сильная зернистость объясняется, как уже было сказано ранее, в случае восстановления цифровой голограммы, недостаточной разрешающей способностью записывающей фотоматрицы. Однако, закономерности изменения интерференционной картины даже в этом случае проявляются достаточно хорошо. На рисунках 3.3-3.5 представлены результаты восстановления голограммы деформированного объекта при отсутствии усиления, двукратном и четырехкратном усилении чувствительности.

При слабой деформации и отсутствии голографического усиления изображения на рисунках 3.2 и 3.3 практически совпадают. Т. е. интерферометр не улавливает слабые деформации, возникшие в исследуемом объекте. При двукратном усилении участки деформации проявляются (рисунок 3.4), но четырехкратное усиление голографической чувствительности позволяет более детально выявлять участки, подвергшиеся наибольшей деформации (рисунок 3.5).

Полученные экспериментальные результаты подтвердили работоспособность предложенного метода усиления чувствительности голографического интерферометра.

**Определение положения плоскостей саморепродуцирования в присутствии фазовых сред** Аналитически получены соотношения, определяющие положения плоскостей саморепродуцирования в присутствии фазовых сред. Везде далее  $\sigma$ -период решетки,  $a$ -апертура решетки,  $z$  – текущая координата.

**Плоскопараллельная пластина** Фазовое искажение световой волны, прошедшей сквозь линейную решетку и плоскопараллельную пластину рассчитывается для одной,  $k$ -ой гармонической составляющей (рисунок 3.6). Рассматриваемая плоскопараллельная пластина имеет толщину  $d$ , показатель преломления  $n_{nl}$  и образует угол  $\theta$  с осью  $Z$ . Направление распространения  $k$ -й гармонической составляющей, которая образуется в результате разложения светового пучка в спектр после прохождения решетки, определяется величиной угла  $\gamma$  - угла, образованного направлением распространения  $k$ -ой гармонической составляющей и осью оптической системы.

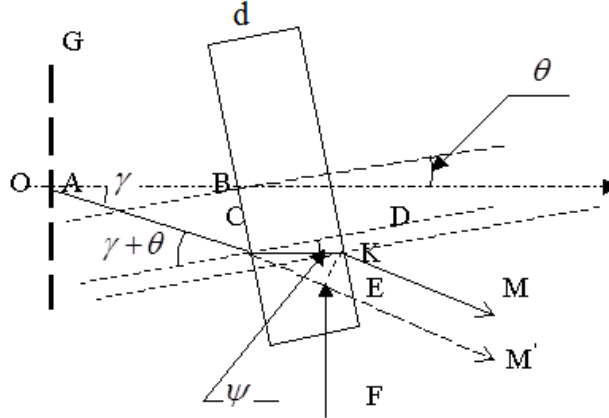


Рисунок 3.6 - Схематичное изображение процесса возникновения изменения фазы световой волны, проходящей сквозь плоскопараллельную пластину.

Световое поле, прошедшее через решетку и плоскопараллельную пластину, имеет следующий вид

$$U_p(x,y,z) = \frac{1}{2\lambda z} \exp\left\{ik\left[z + d\left(n_{nl} - 1\right) + \frac{\theta^2}{2}\left(1 - \frac{1}{n_{nl}}\right)\right]\right\} \sum_{m=-T}^T b_m \exp\left\{2\pi i\left[\frac{m}{\sigma}\left[x + \theta d \times \left(1 - \frac{1}{n_{nl}}\right) - \frac{m^2\lambda}{2\sigma^2}\left[z - d\left(1 - \frac{1}{n_{nl}}\right)\right]\right]\right\} \left\{\Phi\left[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}}(a - y)\right] - \Phi\left[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}}(-a - y)\right]\right\} \left\{\Phi\left[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}} \times \left[a - x + \frac{m\lambda z}{\sigma} + \frac{m}{\sigma}\theta d\left(1 - \frac{1}{n_{nl}}\right)\right] - \Phi\left[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}}\left(-a - x + \frac{m\lambda z}{\sigma} + \frac{m}{\sigma}\theta d\left(1 - \frac{1}{n_{nl}}\right)\right)\right]\right\}. \quad (3.1)$$

Здесь  $\Phi(x) = \int_0^x \exp(i\frac{\pi}{2}\eta^2) d\eta$  - интеграл Френеля,  $m=0, 1, 2, 3, \dots$  - определяет

дифракционный порядок решетки. Соотношение (3.1) показывает, что присутствие фазовой среды в виде пропускающей плоскопараллельной пластины приводит к смещению плоскостей саморепродуцирования на дистанцию равную  $d(1 - \frac{1}{n_{nl}})$  вдоль оптической оси  $Z$ , а вдоль оси  $X$  на



$\theta d(1 - \frac{1}{n_{nl}})$ . Т. е. общее распределение плоскостей самовоспроизведения не деформируется, остается неизменным, однако, вся совокупность плоскостей, как целое, смещается вдоль оптической оси  $Z$  и оси  $X$ .

**Тонкий оптический клин** В случае тонкого оптического клина изменение фазы светового поля можно представить как

$$f_c = k\psi x_2, \text{ где } \psi = (n_{кл} - 1)\text{tg } \alpha. \quad (3.2)$$

Здесь  $\alpha$  - величина угла при вершине клина,  $(x_2, y_2, z_2)$  - плоскость объекта.

Распределение светового поля в присутствии оптического клина имеет вид

$$U_c(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp[i(kz - \frac{\pi}{4})] \exp(-2\pi i \psi^2 \frac{z - z_2}{2\lambda}) \sum_{m=-T}^T b_m \exp\{2\pi i [\frac{m}{\sigma} \times \\ \times [x - \psi(z - z_2)] + \frac{\psi}{\lambda} x - \frac{m^2 \lambda z}{2\sigma^2}] \} \{ \Phi[\sqrt{\frac{k}{\pi z}} [a - x + (z - z_2)\psi + \frac{m\lambda z}{\sigma}] - \\ - \Phi[\sqrt{\frac{k}{\pi z}} [-a - x + (z - z_2)\psi + \frac{m\lambda z}{\sigma}]] \} \{ \Phi[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}} (a - y)] - \Phi[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}} (-a - y)] \} \quad (3.3)$$

Из (3.3) следует, что изменение в распределении светового поля под воздействием оптического клина сводится к смещению этого поля параллельно оси  $X$  и развороту плоскостей самовоспроизведения на угол  $\psi$ . Если систему координат развернуть на угол  $\psi$  относительно исходной оптической оси, то распределение поля соответствует распределению в отсутствии оптического клина.

**Тонкая линза** Тонкую линзу, с точки зрения фазового воздействия на проходящую световую волну, можно представить в следующем виде:

$$\phi_L = k[nd - (x_1^2 + y_1^2)/2F]. \quad (3.4)$$

Здесь  $d$  - толщина линзы вдоль оси,  $F$  - ее фокусное расстояние.

Световое поле за линзой имеет вид

$$U_L(x, y, z) = \frac{F}{4(F - z)} \exp(ikz) \exp(ikn_L d) \exp[-i\frac{\pi}{\lambda}(x^2 + y^2)] \{ \Phi[\sqrt{\frac{\pi}{z1\lambda}} \times \\ \times (a - \frac{\sigma}{d1} y)] - \Phi[\sqrt{\frac{\pi}{z1\lambda}} (-a - \frac{\sigma}{d1} y)] \} \sum_{m=-T}^T b_m \exp[2\pi i (\frac{m}{d1} x - \frac{m^2 \lambda}{2\sigma^2} z1)] \times \\ \times \{ \Phi[\sqrt{\frac{\pi}{z1\lambda}} (a - \frac{\sigma}{d1} x + \frac{mz1\lambda}{\sigma})] - \Phi[\sqrt{\frac{\pi}{z1\lambda}} (-a - \frac{\sigma}{d1} x + \frac{mz1\lambda}{\sigma})] \}. \quad (3.5)$$

$$\text{Здесь } z_1 = \frac{Fz}{F-z}; \quad d_1 = \frac{\sigma(F-z)}{F}. \quad (3.6)$$

Пространственная частота плоскостей самовоспроизведения увеличивается, т. е. расстояние между ними уменьшается при приближении к фокусу линзы, а за фокусом происходит зеркальное отражение картины расположения плоскостей самовоспроизведения. Размеры плоскостей самовоспроизведения уменьшаются при приближении к фокусу, а за фокусом увеличиваются по мере удаления от фокуса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан способ предварительной обработки сложных интерферограмм, получающихся на выходе голографических интерферометров. Создана математическая модель системы, работающей с некогерентным световым излучением, в которую вводятся оптические aberrации различного типа, включая расфокусирование изображений. Показано, что расфокусирование изображений (интерферограмм) позволяет разделить низкочастотную и высокочастотную компоненты в картине интерференции.

Результаты компьютерного моделирования оптической системы показали, что в каждом конкретном случае можно подобрать степень расфокусирования интерферограммы, при которой происходит выделение низкочастотной компоненты в картине интерференции, т. е. расфокусирование можно использовать в качестве низкочастотного фильтра на стадии предварительной обработки интерферограмм.

2. Разработан метод повышения чувствительности голографической интерферометрической системы посредством преобразования оцифрованного изображения интерференционной картины. Проведен теоретический анализ процесса записи и численного восстановления голограммы фазового объекта, полученной методом двух экспозиций. Анализ показал возможность увеличения чувствительности голографического интерферометра посредством преобразования оцифрованной интерференционной картины, получаемой на выходе голографического интерферометра.

Получены обобщенные соотношения, на основе которых можно увеличить чувствительность голографического интерферометра в  $2^m$  раз, где  $m=0, 1, 2, \dots$ . Показано, что повышение чувствительности голографического интерферометра ограничивается только разрешением фотоматрицы.

Получены экспериментальные результаты при двукратном и четырехкратном увеличении чувствительности голографического интерферометра по указанной методике. Результаты показали, что двукратное и, особенно, четырехкратное усиления чувствительности голографического интерферометра выявляют в исследуемом объекте фазовые неоднородности, которые не были видны без усиления.

3. Получены соотношения, определяющие положение плоскостей самовоспроизведения в выходных каналах голографического интерферометра для плоскопараллельной пластины, оптического клина, тонкой линзы.

Сравнение интерферограмм, получаемых в каналах голографического интерферометра с учетом и без учета влияния простейших оптических сред, показало, что, если не принять во внимание влияние оптических сред на положение плоскостей самовоспроизведения, то полученные интерферограммы потеряют качество. В случае сложных интерферограмм это приведет к потере низкочастотной компоненты.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Исманов Ю. Х.** Бесщелевой метод записи радужных голограмм в голографии Денисюка [Текст] /Ю. Х. Исманов, Н. М. Кулмурзаев, Т. Д. Тынышова// Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. (Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе).-2017.-№ 3(39).-С. 25-32. <http://vp-inov.ttu.tj>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=32312291>

2. **Исманов Ю. Х.** Особенности голографической интерферометрии на основе метода бесщелевой радужной голографии [Текст] /Ю. Х. Исманов, Н. М. Кулмурзаев, Т. Д. Тынышова// Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. (Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе).-2017.-№ 3(39).-С. 33-41. <http://vp-inov.ttu.tj>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=32312292>

3. **Исманов Ю. Х.** Многоканальный голографический интерферометр для исследования сложных фазовых и отражающих сред [Текст] / Ю. Х. Исманов, Т. Д. Тынышова, Д. А. Исмаилов, Н. М. Кулмурзаев // Материалы VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов.- М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 264-265. <http://fioconf.mephi.ru>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=32479781>

4. **Исманов Ю. Х.** Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего сквозь решетку [Текст] / Ю. Х. Исманов, Т. Д. Тынышова, С. А. Алымкулов // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова.- 2017.-№3(57).-С. 171-178. <http://www.vestnikksucta.kg>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=32645421>

5. **Исманов Ю. Х.** Голография Денисюка на основе бесщелевого метода [Текст] / Ю.Х. Исманов, Н.М. Кулмурзаев, Т.Д. Тынышова // Вестник КРСУ.- 2018 .- № 4(18).-С.3-6. <http://www.krsu.edu.kg/vestnik/index.html>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=35017300>

6. **Исманов Ю. Х.** Голографическая интерферометрия, использующая два опорных пучка [Текст] / Ю.Х. Исманов, Т.Д. Тынышова, Н.М. Кулмурзаев // Вестник КРСУ.-2018 .- № 4(18).-С.7-9. <http://www.krsu.edu.kg/vestnik/index.html>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=35017301>

7. **Исманов Ю. Х.** Интерферометрия в радужной голографии [Текст] / Ю.Х. Исманов, Т.Д. Тынышова, Н.М. Кулмурзаев // Известия НАН КР.-2018 .- № 1.-С.24-29. <http://naskr.kg/ru/2019/08/15/izvestiya-nan-kr/> , <https://elibrary.ru/item.asp?id=36313925>
8. **Исманов Ю. Х.** Объемная голография в бесщелевом методе [Текст] / Ю.Х. Исманов, Т.Д. Тынышова, Н.М. Кулмурзаев // Известия НАН КР.-2018 .- № 3.-С.53-58. <http://naskr.kg/ru/2019/08/15/izvestiya-nan-kr/>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=39154693>
9. **Ismanov Y. Kh.** Wide-range holographic interferometer [Текст]/ Y. Kh. Ismanov, T. D. Tynyshova, Z. K. Aidaraliev //Optical Engineering.- 2018.- 57(12), 124106. [http://dx.doi.org/10.1117/1.OE.57.12.124106] <https://www.spiedigitallibrary.org/search?term=tynyshova>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=38679874>
10. **Тынышова Т.Д.** Распределение саморепродукций решетки в присутствии прозрачной плоскопараллельной пластины [Текст]/Т. Д. Тынышова // Электронный журнал: наука, техника и образование. - 2019.- № 2 (24).- С. 117-124. <http://nto-journal.ru>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=39175028>
11. **Тынышова Т.Д.** Искажение последовательности саморепродукций прозрачной пластиной [Текст] / Т.Д. Тынышова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 5. – С. 142-146. <https://applied-research.ru>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=38165693>
12. **Исманов Ю. Х.** Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм [Текст] / Ю. Х. Исманов, Тынышова Т. Д. // Материалы VIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов.- М.: НИЯУ МИФИ, 2019. – С. 695-696. <http://fioconf.mephi.ru>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=37316875>
13. **Тынышова Т.Д.** Моделирование оптической системы с входным зрачком круглой формы [Текст] / Т. Д. Тынышова, Ю. Х. Исманов // Материалы IX Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов.- М.: НИЯУ МИФИ, 2020. – С. 615-616. <http://fioconf.mephi.ru>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=42564207>
14. **Исманов Ю.Х.** Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении [Текст] / Ю.Х. Исманов, Т.Д. Тынышова, А.А. Абдулаев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2020. – № 3. – С. 98-102. <https://applied-research.ru>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=42620890>
15. **Исманов Ю. Х.** Улучшение характеристик интерферограмм, получаемых на выходе голографического интерферометра [Текст] / Ю. Х. Исманов, Т. Д. Тынышова // Материалы X Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов.- М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – С. 445-446. <http://fioconf.mephi.ru>, <https://elibrary.ru/item.asp?id=46597766>

**Тынышова Толгонай Дайырманкожоевнанын 01.04.05 - оптика адистиги боюнча «Фазалык чөйрөлөрдүн санариптик голографиялык интерферометриясы» темасындагы физика-математика илимдеринин кандидаты илимий даражасын изденип алуу үчүн жазылган диссертациялык ишинин**

**РЕЗЮМЕСИ**

**Негизги сөздөр:** Санариптик голографиялык интерферометрия, фазалык чөйрө, интерферограмма, когеренттүү эмес оптикалык систем, дефокустоо, интерферометрдин сезгичтиги, өзүн-өзү көбөйтүү, көп каналдуу голографиялык интерферометр.

**Изилдөөнүн объектиси:** Приборлордун чыгуусунда алынган санариптик голографиялык интерферометрлер жана интерферограммалар.

**Изилдөөнүн предмети:** Голографиялык интерферометрдин мүнөздөмөлөрүн, интерферометриялык системде алынган интерферограммаларды санариптик иштетүү ыкмалары менен өркүндөтүү мүмкүнчүлүгүн изилдөө.

**Иштин максаты:** Санариптик голографиялык интерферометриялык системдердин эффективдүүлүгүн жогорулатуу ыкмаларын иштеп чыгуу.

**Изилдөө ыкмалары:** Каралган оптикалык процесстердин жана системдердин математикалык моделдерин иштеп чыгуу, аларды компьютердик моделдөө жана оптикалык тажрыйбалар аркылуу негиздөө.

**Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңылыктуулугу:** Интерферограммаларды аларды дефокустоо менен алдын ала иштеп чыгуусунун жаңы ыкмасы сунушталды; интерферометрдин чыгууларында алынган интерферограммаларды иштеп чыгуунун санариптик ыкмаларын колдонуу аркылуу голографиялык интерферометрлердин сезгичтигин жогорулатуу ыкмасы биринчи жолу иштелип чыкты; эң жөнөкөй оптикалык бир тектүүлүк бар учурунда голографиялык интерферометрлердеги интерферометриялык сүрөттү локалдаштыруу тегиздигинин ордун так аныктоого мүмкүндүк берген катнаштар алынды.

**Колдонуу чөйрөсү:** иштелип чыккан ыкмаларды голографиялык интерферометриялык системдердин жардамы менен фазалык чөйрөлөрдү изилдөөдө колдонууга болот.

## РЕЗЮМЕ

**диссертации Тынышовой Толгонай Дайырканджоевны на тему:  
«Цифровая голографическая интерферометрия фазовых сред» на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности 01.04.05 – оптика**

**Ключевые слова:** цифровая голографическая интерферометрия, фазовая среда, интерферограмма, некогерентная оптическая система, расфокусирование, чувствительность интерферометра, самовоспроизведение, многоканальный голографический интерферометр.

**Объектами исследования** являются цифровые голографические интерферометры и интерферограммы, получаемые на выходе этих устройств.

**Предметом исследования** является изучение возможности улучшения характеристик голографического интерферометра методами цифровой обработки интерферограмм, получаемых в интерферометрической системе.

**Целью работы** является разработка методов повышения эффективности цифровых голографических интерферометрических систем.

**Методы исследования:** разработка математических моделей рассматриваемых оптических процессов и систем, и их обоснование посредством компьютерного моделирования и оптических экспериментов.

**Полученные результаты и их новизна:** предложен новый метод предварительной обработки интерферограмм посредством их расфокусирования; впервые разработан метод увеличения чувствительности голографических интерферометров посредством цифровых методов обработки интерферограмм, получаемых на выходе интерферометра; получены соотношения, позволяющие определять положения плоскостей локализации интерферометрической картины в голографических интерферометрах в присутствии простейших оптических неоднородностей.

**Область применения:** разработанные методы могут быть использованы при исследованиях фазовых сред с помощью голографических интерферометрических систем.

## SUMMARY

**of the thesis of Tynyshova Tolgonai Daiyrkankozhoevna on the topic: "Digital holographic interferometry of phase media" for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.05 – optics**

**Keywords:** digital holographic interferometry, phase medium, interferogram, incoherent optical system, defocusing, interferometer sensitivity, self-imaging, multichannel holographic interferometer.

**The objects of research** are digital holographic interferometers and interferograms obtained at the output of these devices.

**The subject of this research** is to study the possibility of improving the characteristics of a holographic interferometer by digital processing of interferograms obtained in an interferometric system.

**The aim of the work** is to develop methods for increasing the efficiency of digital holographic interferometric systems.

**Research methods:** development of mathematical models of the considered optical processes and systems, and their substantiation by means of computer modeling and optical experiments.

**The results obtained and their novelty:** a new method of preliminary processing of interferograms by means of their defocusing is proposed; for the first time a method was developed for increasing the sensitivity of holographic interferometers by means of digital methods for processing interferograms obtained at the output of the interferometer; relations are obtained that make it possible to accurately determine the positions of the localization planes of the interferometric pattern in holographic interferometers in the presence of the simplest optical inhomogeneities.

**Application area:** the developed methods can be used in studies of phase media using holographic interferometric systems.

