

На правах рукописи

РГБ ОА

1 / АВГ 2000

ЧАУССКИЙ АНАТОЛИЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ
ЧАСТИЧНО-РАЗВИТЫХ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ
В ЗОНЕ ДИФРАКЦИИ
ПРОСТРАНСТВЕННО-МОДУЛИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА
НА СЛУЧАЙНЫХ ФАЗОВЫХ ОБЪЕКТАХ**

01.04.21 – лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Саратов - 2000

Работа выполнена в
Саратовском Государственном университете им. Н.Г.Чернышевского
и в Институте проблем точной механики и управления РАН, Саратов

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор В.П. Рябухо

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Ю.А. Зюрюкин
кандидат физико-математических наук, доцент В.И. Цой

Ведущая организация:

Институт систем обработки изображений РАН, г. Самара

Защита состоится 4 июля 2000 года в 15:30 на заседании диссертационного совета
К063.74.11 в Саратовском Государственном университете (410026, г. Саратов, ул.
Астраханская, 83)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке СГУ

Автореферат разослан «02» июня 2000 года.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
д.ф.-м.н, профессор



В.Л. Дербов

В343.43,03

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая работа тематически относится к лазерной интерферометрии случайно неоднородных объектов, в рамках которой в отличие от классических методов в качестве измерительного сигнала используется не форма интерференционных полос или динамика их изменения, а контраст полос, несущий информацию о статистических параметрах объекта.

В силу того, что лазерная интерферометрия обладает рядом качеств, таких как высокая чувствительность, информативность, быстродействие, точность, дальнейшее развитие методов лазерной интерферометрии представляется важной задачей с научной и практической точек зрения.

Интерференция спекл-модулированных световых полей целенаправленно стала изучаться в голографической интерферометрии, спекл-фотографии и спекл-интерферометрии. Физические особенности этих методов когерентной оптики заключаются в том, что в них приходится иметь дело с интерференцией когерентных световых полей – спекл-полей, образующихся при рассеянии когерентного лазерного излучения статистическими неоднородными объектами.

Развитые спекл-поля, возникающие в голографии, голографической и спекл-интерферометрии, в силу того, что их статистические свойства не зависят от параметров рассеивающего объекта [1,2], возможно использовать только в задачах определения параметров движения, деформаций и формы объектов.

При взаимодействии когерентного лазерного излучения со слабо неоднородными объектами формируются так называемые частично развитые спекл-поля, статистические параметры которых занимают промежуточные значения между характеристиками невозмущенного когерентного поля с гладким волновым фронтом и характеристиками развитого спекл-поля. При интерференции лазерных полей, невозмущенных рассеивающим объектом, формируется интерференционная картина с максимальным контрастом, равным единице при равенстве интенсивностей полей. Интерференция гладкой волны с частично развитым спекл-полем приводит к уменьшению контраста полос, значение которого может служить мерой параметров неоднородностей объекта.

Относительно строгие количественные зависимости параметров интерференционных полос от статистических параметров неоднородностей фазовых объектов установлены в работы О.В.Ангельского и П.П.Максимики, в которых удалось связать количественные характеристики интерференционной картины, в частности, относительное значение минимума интенсивности в интерференционной картине при условии противофазности и полной согласованности интерферирующих полей со статистическими моментами амплитуды и фазы рассеянного поля [3,4]. Методически более эффективный подход реализован в работе [5], в которой установлена связь контраста V интерференционных полос, наблюдаемых при наложении двух идентичных реализаций полей с регулируемым поперечным сдвигом $\Delta\vec{r}$ с корреляционной функцией $\mu_c(\Delta\vec{r})$ рассеянного граничного поля, $V = \mu_c(\Delta\vec{r})$. Недостатком этого метода является техническая и методическая трудность реализации интерференции граничных полей, то есть световых полей в непосредственной близости от поверхности объекта. Выход за пределы этой области требует учета трансформации дифрагировавшего поля и учета влияния этой трансформации на контраст полос средней интенсивности.

Существенно новый подход предложен в [6,7]. В этих работах объект исследования так же, как в интерферометре сдвига находится за пределами интерферометра, а сам интерферометр выполняет роль осветительного устройства. В этом случае объект освещается световым пучком с регулярными интерференционными полосами – пространственно-модулированным лазерным пучком (ПМЛП), а интерференционные полосы средней интенсивности наблюдаются в дифракционном поле. Закономерности формирования полос средней интенсивности такие же, как и в интерферометре сдвига – контраст полос в приграничной области определяется автокорреляционной функцией оптического поля. Такой подход в реализации интерференции частично-развитых спекл-полей позволил авторам разработать очень простой и эффективный с технической точки зрения способ диагностики параметров объекта.

Исследования, касающиеся интерференции частично-развитых спекл-полей и методов их реализации, нельзя считать завершенными, так как ряд вопросов и задач остались открытыми: не получены выражения для контраста полос средней интенсивности в зоне дифракционных трансформаций спекл-полей, некоторые вопросы, касающиеся интерференции частично-идентичных спекл-полей остались не освещенными и до конца не изученными. Кроме того, если говорить о проблеме с технической точки зрения, то использование широкого ПМЛП для диагностики параметров очень тонких и протяженных объектов оказывается неэффективным или практически невозможным. Решением этой задачи может служить применение сфокусированного ПМЛП, использование которого для диагностики объектов требует разработки дополнительной теории. При дифракции широкого ПМЛП на неоднородном объекте происходит интерференция идентичных спекл-полей, в то время как дифракция сфокусированного ПМЛП связана с интерференцией частично идентичных или полностью неидентичных спекл-полей. Более того, при зондировании объекта сфокусированным ПМЛП картина интерференции наблюдается в удаленном дифракционном поле, что приводит к необходимости учета дифракционных трансформаций интерферирующих полей.

В связи с этим дальнейшее развитие теоретических и экспериментальных основ интерференции частично-развитых спекл-полей и методов их реализации представляется актуальной задачей с научной и практической точек зрения.

Цель диссертационной работы – исследование особенностей явления интерференции частично-развитых спекл-полей, несущих информацию о статистических параметрах рассеивающей среды (объекта), развитие теоретических и экспериментальных основ метода измерения параметров объекта, основанного на дифракции пространственно-модулированного лазерного пучка на случайно неоднородных объектах.

Научная новизна исследований:

- впервые рассмотрены закономерности формирования интерференционных картин в поле дифракции *сфокусированного* пространственно-модулированного лазерного пучка на случайно неоднородном объекте и даны качественные объяснения зависимости контраста полос средней интенсивности от статистических параметров объекта;
- впервые получены аналитические выражения для эволюции контраста полос средней интенсивности при дифракции широкого коллимированного ПМЛП на СФЭ в зависимости от статистических параметров объекта и пучка;

- впервые получены аналитические выражения для эволюции контраста полос средней интенсивности при дифракции сфокусированного ПМЛП на СФЭ в зависимости от статистических параметров объекта и пучка;
- впервые установлены три различных режима дифракции сфокусированного ПМЛП на случайно неоднородном объекте, качественно отличающихся зависимостью контраста полос средней интенсивности от статистических параметров объекта;
- впервые показаны возможности формирования интерференционных картин с высоким контрастом при зондировании сильно рассеивающих сред.

Практическая значимость работы

Разработан новый эффективный метод проведения количественного контроля параметров случайно неоднородных объектов, основанный на зондировании объекта сфокусированным ПМЛП. В частности, предложены: способы диагностики параметров для объектов с мелкоструктурными неоднородностями, сильно неоднородных объектов, а так же экспресс-метода диагностики радиуса корреляции фазовых неоднородностей с использованием широкого ПМЛП; метод непосредственного измерения дисперсии фазовых флуктуаций при режиме дефлексии интерференционных полос; методы сканирования неподвижных объектов сфокусированным ПМЛП.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных теоретических результатов обеспечивается достаточной строгостью используемых моделей, соответствием теоретических выводов и экспериментальных данных, полученных с использованием известных экспериментальных методик.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. При освещении случайного фазового объекта сфокусированным лазерным пучком с регулярной интерференционной структурой - сфокусированным пространственно-модулированным лазерным пучком (ПМЛП), в дифракционном поле формируются интерференционные полосы средней интенсивности, контраст которых определяется статистическими параметрами неоднородностей объекта и параметрами зондирующего пучка. Возможны три качественно отличающихся режима дифракции сфокусированного ПМЛП на случайном фазовом объекте: контраст полос средней интенсивности уменьшается с увеличением радиуса корреляции l_c неоднородностей объекта в режиме дифракции на большом числе неоднородностей, принимает минимальное значение в режиме дифракции на малом числе неоднородностей и возрастает с увеличением l_c в режиме дефлексии полос, когда освещающий сфокусированный ПМЛП разрешает неоднородности объекта; в режиме дифракции на большом числе неоднородностей контраст полос определяется соотношением интенсивности нерассеянного компонента и средней интенсивности рассеянного (флуктуационного) компонента дифракционного поля; при значительном превышении радиуса перетяжки освещающего пучка (освещенной области на объекте) над радиусом корреляции фазовых неоднородностей l_c в этом режиме проявляется эффект скачкообразного

изменения контраста полос средней интенсивности при изменении дисперсии фазовых возмущений освещающего пучка;

в режиме дефлекции контраст полос V пропорционален корреляционной функции коэффициента пропускания (или отражения) объекта, $V \sim \mu_c(\Delta\vec{r})$, вне зависимости от статистических свойств фазовых неоднородностей объекта.

2. Аналитические выражения для контраста интерференционных полос средней интенсивности, формирующихся в поле дифракции сфокусированного ПМЛП на неоднородном объекте, в зависимости от статистических параметров объекта и зондирующего пучка.
3. Метод контроля статистических параметров неоднородностей случайных фазовых объектов, включая сильно-неоднородные среды, основанный на зондировании объекта сфокусированным пространственно-модулированным лазерным пучком и определении контраста интерференционных полос средней интенсивности, формирующихся в дифракционном поле.
4. Метод контроля статистических параметров неоднородностей случайных фазовых объектов, основанный на зондировании объекта *рассеянным* пространственно-модулированным лазерным пучком - метод интегрального сканирования, и физическая интерпретация процессов формирования интерференционных картин и зависимости контраста полос средней интенсивности от параметров случайно неоднородного объекта и зондирующего пучка в этом методе.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих Международных конференциях:

- 15 Международная Конференция по Когерентной и Нелинейной Оптике (ICONO), С.-Петербург, 27 июня-1 июля 1995 г;
- Second SPIE International Conference on Holography and Correlation Optics, Chernovtsy, May 15-19, 1995;
- The Intl. Conf. on Nonlinear Dynamics and Chaos. Application in Physics, Biology and Medicine (ICND-96); SPIE Intl. Workshop on Nonlinear Dynamics and Structures in Biology and Medicine: Optical and Laser Technologies, Saratov, Russia, July 8-14, 1996;
- Third SPIE International Conference on Correlation Optics, Chernovtsy, May 15-19, 1997;
- "Coherence Domain Optical Methods in Biomedical Science and Clinical Applications II", BIOS'98 SPIE's International Biomedical Optics Symposium, San Jose, California USA, 24-30 January, 1998;
- 7-th International workshop on laser physics (LPHYS'98), Berlin, Germany, July 6-10, 1998;
- "Методы светорассеяния в механике, биомедицине и материаловедении", Международный междисциплинарный научный семинар и осенняя школа молодых ученых, Россия, Саратов, 6-9 октября, 1998.
- Saratov Fall Meeting (SFM'99), Saratov, Russia, October 5-8, 1999.

Личный вклад автора заключался в проведении теоретического анализа, участии в обсуждении задач, поставленных научным руководителем, проведении экспериментальных работ, некоторые из которых выполнены при содействии А.Е.Гриневича.

Публикации. По результатам исследований, выполненных в рамках диссертационной работы опубликовано 16 статей и сообщений.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации составляет 144 страницы текста, включая 54 рисунка. Список литературы содержит 137 наименований и изложен на 12 страницах.

Краткое содержание работы

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследования и основные положения, выносимые на защиту. Отмечается научная новизна и практическая значимость работы, приводятся данные об апробации материалов диссертации.

В первой главе теоретически исследованы корреляционные свойства спекл-полей, формирующихся при дифракции лазерных пучков на объектах, удовлетворяющих модели «случайный фазовый экран». На основе известных работ показано, что корреляционная функция рассеянного поля описывается интегральными преобразованиями Френеля или Фурье от корреляционной функции граничного поля, которая определяется произведением функции корреляции освещающего поля и функции корреляции комплексного коэффициента пропускания (отражения) объекта $\mu_c(\Delta\vec{r})$. В приближении гауссовой статистики фазы граничного поля $\mu_c(\Delta\vec{r})$ записывается в явном виде $\mu_c(\Delta\vec{r}) = \exp[-\sigma_\phi^2(1 - K_\phi(\Delta\vec{r}))]$, но из-за её достаточно сложного вида взятие интегральных преобразований Френеля и Фурье представляется сложной задачей. Поэтому в известных работах делаются различные упрощающие предположения, приводящие к различным приближениям для $\mu_c(\Delta\vec{r})$. Предложено два новых подхода: разложение $\mu_c(\Delta\vec{r})$ в ряд по гауссовым функциям, приводящее к точным результатам интегрирования, а также удобное для решения обратной задачи оригинальное приближение в виде

$$\mu_c(\Delta\vec{r}) = \exp(-\sigma_\phi^2) + [1 - \exp(-\sigma_\phi^2)] \exp\left(-\frac{\Delta\vec{r}^2}{\rho_1^2}\right), \quad (1)$$

где $\rho_1 = l_\phi \sqrt{-\ln \left\{ \frac{1}{\sigma_\phi^2} \ln \left[\frac{\exp(-\sigma_\phi^2) - 1}{\exp(+1)} + 1 \right] \right\}}$ - радиус корреляции граничного поля.

Исходя из различных приближений для $\mu_c(\Delta\vec{r})$, выводятся аналитические выражения для поперечной автокорреляционной функции дифракционного поля $B(\vec{\zeta}, \Delta\vec{\zeta}, z)$ и средней интенсивности $\langle I(\vec{\zeta}, z) \rangle$ для всех приближений $\mu_c(\Delta\vec{r})$, проводится сравнительный анализ полученных выражений для средней интенсивности.

На основе проведенного количественного анализа выражений для средних интенсивностей (рис.1) установлено, что при оригинальном приближении (1) максимальная относительная ошибка не превышает 17%, которая соответствует случаю дифракции на большом числе неоднородностей, т.е. когда радиус освещающего пучка существенно превышает поперечные размеры неоднородностей,

$w_0 > l_p$. Получено аналитическое выражение для радиуса корреляции флуктуационного компонента.

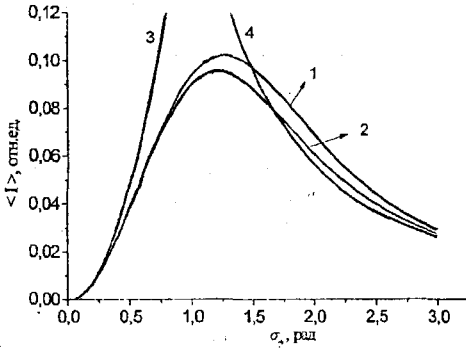


Рис. 1. Графики средней интенсивности флуктуационного компонента рассеянного поля в зависимости от значений среднего квадратичного отклонения пространственных флуктуаций фазы граничного поля при использовании различных приближений для μ ($\Delta \bar{\rho}$):
 1 — точное выражение;
 2 — оригинальное приближение;
 3 и 4 — соответственно, приближения для малых и больших σ_s .
 Графики получены при $w_0 = 70$ мкм, $l_p = 20$ мкм.

Выражения для автокорреляционной функции дифракционного поля и средней интенсивности, полученные в первой главе служат основой для теоретического анализа процессов интерференции, рассматриваемых в главах 2-4.

В главе 2 проанализированы процессы формирования интерференционных полос средней интенсивности, образующихся при суперпозиции спекл-полей в интерферометрах, построенных по классическим схемам. Получены аналитические выражения для контраста полос средней интенсивности в зависимости от параметров оптических неоднородностей объекта.

Рассмотрены различные варианты схем интерферометров Майкельсона и Маха-Цендера в качестве базовых классических схем интерферометров. В общем случае, полученные выражения для контраста полос средней интенсивности имеют достаточно сложный вид для решения обратной задачи - нахождения аналитических выражений для статистических параметров объекта в зависимости от значений контраста полос в различных сечениях интерференционного поля. Однако в ряде случаев, обеспечиваемых особыми схемными решениями для интерферометров, как показано в работе, возможно получение простых зависимостей контраста полос от параметров объекта и, следовательно, возможно решение обратной задачи. Эволюция контраста полос средней интенсивности вдоль продольной координаты z определяется нормированной взаимно корреляционной функцией полей, которая, как показано для случая интерференции идентичных спекл-полей, совпадает с выражением для автокорреляционной функции одиночного гауссового пучка, рассеянного на СФЭ при условии, что $|\Delta \vec{z}| = |\Delta \vec{k}| z / k = \theta z$, в то время как для случая интерференции неидентичных спекл-полей контраст полос определяется соотношением между интенсивностями нерассеянного и флуктуационного компонентов. Для случая интерференции идентичных спекл-полей наличие в классических схемах интерферометров достаточно протяженных опорного и предметного плеч ведет к потере значительной информации, связанной с невозможностью измерения контраста полос в областях пространства,

непосредственно примыкающих к рассеивающей поверхности объекта, где сдвиг спекл-полей не превышает их поперечного радиуса корреляции. В случае интерференции неидентичных спекл-полей, наоборот, наличие плеч интерферометра приводит к потере незначительной информации, соответствующей неприципиальному участку выхода кривой эволюции контраста полос средней интенсивности на стационарный уровень насыщения, определяемый параметрами объекта и пучка. Показывается ограниченность классических интерференционных схем для реализации интерференции частично-идентичных спекл-полей.

В Главе 3 показано, что все выявленные недостатки, связанные с тем, что рассеивающий объект входит составной частью в интерферометр, например, в качестве зеркал, или когда интерферометр сдвига освещается спекл-модулированным объектным полем, легко преодолеваются при использовании нового качественного подхода в изучении интерференции спекл-полей, основанного на пространственном разделении интерферометра, как освещающей части, и рассеивающего объекта, как источника спекл-модулированного поля.

Пространственное разделение интерферометра и рассеивающего объекта приводит к такому новому в данном контексте явлению, как дифракция интерференционного поля, созданного интерферометром, на случайно-неоднородном объекте.

Глава 3 посвящена изучению явления дифракции широкого коллимированного ПМЛП, которое полностью эквивалентно явлению интерференции *идентичных* спекл-полей, например, в интерферометре Майкельсона.

Задача исследований данной части работы заключалась в развитии ранее существовавшего метода [6,7], а именно, в получении *аналитических* зависимостей для контраста полос с использованием теоретических результатов Главы 1 (аналитических выражений для корреляционных функций и средних интенсивностей граничного и дифракционного полей), а также в поиске новых методик извлечения количественной информации о параметрах объекта из интерференционного сигнала. На основе полученных *аналитических* выражений проделан подробный теоретический анализ влияния параметров объекта и пучка на эволюцию контраста полос средней интенсивности и, кроме того, предложены три оригинальных способа диагностики параметров объекта: диагностика объектов с мелкоструктурными неоднородностями, диагностика сильно неоднородных объектов и экспресс-метод диагностики поперечных размеров неоднородностей объекта.

В главе 4 исследуется дифракция сфокусированного ПМЛП на СФЭ. Дифракционная схема для изучения явления интерференции частично-развитых спекл-полей, эквивалентная интерференционным схемам, рассмотренным во второй главе, представлена на рис.2. В этой схеме освещение случайно неоднородного объекта происходит сфокусированным пространственно-модулированным лазерным пучком таким образом, что перетяжки гауссовых пучков совпадают с плоскостью объекта, в результате чего на объекте формируются два световых пятна, являющихся источником спекл-модулированных волн, интерферирующих между собой. Наблюдаемое распределение интенсивности и является результатом интерференции спекл-полей.

Установлено, что для наблюдения полос средней интенсивности и регистрации их контраста необходима процедура, реализующая математический принцип статистического усреднения, которая в простейшем случае осуществляется путем поперечного движения неоднородного объекта.

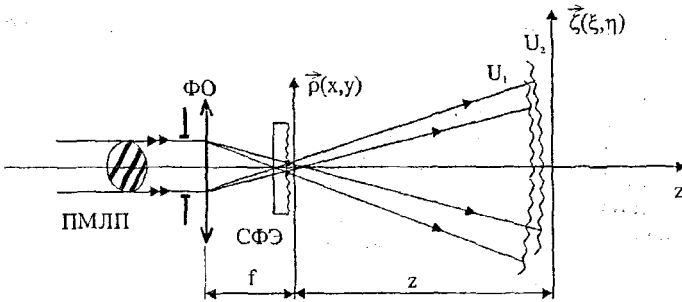


Рис.2. Дифракционная схема для изучения явления интерференции частично-развязанных спекл-полей.

На рис.3.а показана интерференционная картина полос средней интенсивности в плоскости ζ в отсутствие СФЭ (освещающий пучок), распределение интенсивности в плоскости ζ в присутствии СФЭ изображено на рис.3.б, видно, что картина интерференционных полос разрушается при помещении объекта в область фокусировки. Картина полос средней интенсивности, возникающая в результате операции статистического усреднения показана на рис.3.в. Для регистрации контраста полос средней интенсивности, зависящего от параметров объекта σ_p и l_p , используется достаточно инерционный фотоприемник.

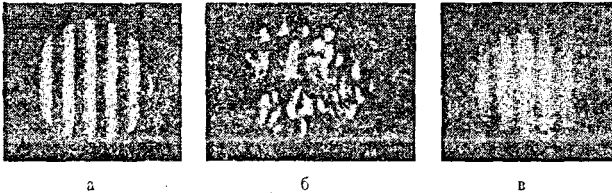


Рис.3. Интерференционные картины, наблюдаемые в дифракционном поле при зондировании СФЭ сфокусированным ПМЛП: а – картина в отсутствие объекта; б – распределение интенсивности при неподвижном объекте, в – картина полос средней интенсивности, наблюдаемая при статистическом усреднении.

Получено аналитическое выражение для эволюции контраста полос в ближней зоне. Показано, что в зависимости от соотношения таких параметров пучка как радиуса перетяжки гауссового пучка w_0 и расстояния ρ_0 между пучками возможны различные режимы дифракции, связанные с интерференцией идентичных и частично идентичных спекл-полей. Если световые пятна на объекте не пересекаются, $\rho_0 \geq 2w_0$, то за объектом происходит интерференция неидентичных спекл-полей (рис.4).

Уменьшение расстояние между пучками относительно размеров освещенных областей, $\rho_0 \leq 2w_0$, приводит к явлению интерференции частично-идентичных спекл-полей, (рис.5).

Подробно рассмотрено влияние фильтрации флуктуационного компонента свободным пространством и корреляционных эффектов на эволюцию контраста полос средней интенсивности, установлено, что при интерференции неидентичных спекл-полей контраст полос определяется наиболее простым выражением и зависит

от соотношения интенсивностей нерассеянного $\bar{I}(\bar{\zeta}, z)$ и флуктуационного $\langle \bar{I}(\bar{\zeta}, z) \rangle$ компонентов рассеянного поля:

$$V(\bar{\zeta}, z) = \frac{\bar{I}(\bar{\zeta}, z)}{\langle \bar{I}(\bar{\zeta}, z) \rangle} = \frac{\bar{I}(\bar{\zeta}, z)}{\bar{I}(\bar{\zeta}, z) + \langle \bar{I}(\bar{\zeta}, z) \rangle}. \quad (2)$$

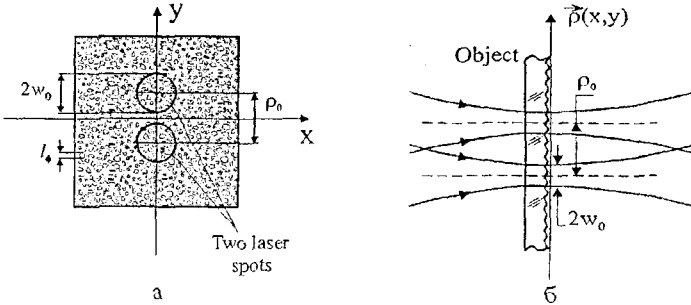


Рис.4. Схемы освещения объекта сфокусированным ПМЛП при реализации режима интерференции неидентичных спекл-полей: а – схематический вид расположения лазерных пятен в плоскости СФЭ с микроструктурными неоднородностями; б – продольное сечение области фокусировки ПМЛП на СФЭ.

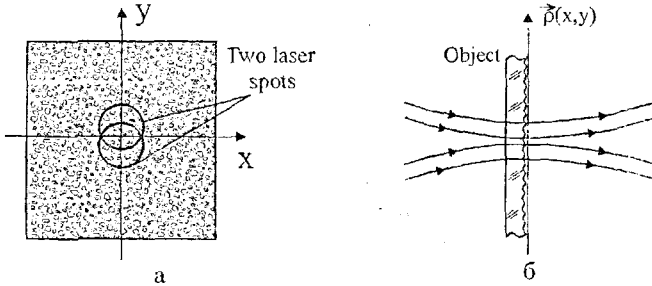


Рис.5. Схемы освещения объекта сфокусированным ПМЛП при реализации режима интерференции частично идентичных спекл-полей: а – схематический вид расположения лазерных пятен в плоскости СФЭ с микроструктурными неоднородностями; б – продольное сечение области фокусировки ПМЛП на СФЭ.

Получены аналитические выражения для эволюции контраста полос средней интенсивности за СФО. На основании теоретического анализа показывается, что контраст полос средней интенсивности в дальней зоне дифракции достигает максимального уровня, зависящего от параметров объекта и пучка.

$$V_{\max} = \frac{\exp(-\sigma_{\#}^2) + [1 - \exp(-\sigma_{\#}^2)] \frac{\rho_1^2}{\rho_1^2 + 2w_0^2} \exp\left(-\frac{\bar{\rho}_0^2}{2w_0^2 + \rho_1^2}\right)}{\exp(-\sigma_{\#}^2) + [1 - \exp(-\sigma_{\#}^2)] \frac{\rho_1^2}{\rho_1^2 + 2w_0^2}}. \quad (3)$$

С теоретической, практической и методологической точек зрения представляет интерес классификация явления дифракции сфокусированного ПМЛП на СФО на основе соотношения параметров пучка и объекта, w_0 и l_s (рис.6).

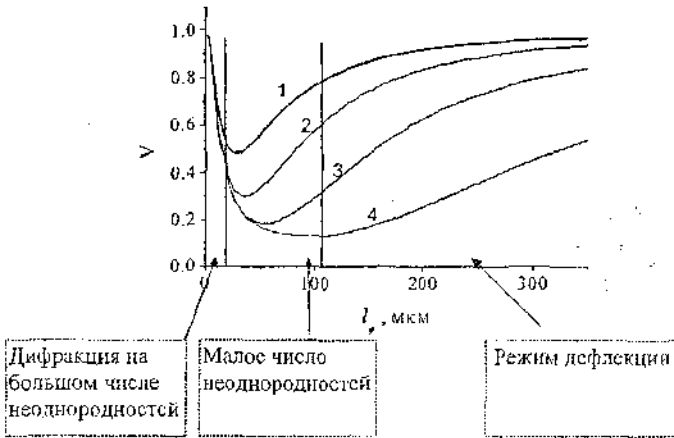


Рис.6. Зависимость максимального уровня контраста V_{\max} от параметра объекта l_s , $\sigma_s = 1.5$, $w_0 = 20$ мкм: 1 - $\rho_0 = 40$ мкм, 2 - $\rho_0 = 60$ мкм, 3 - $\rho_0 = 100$ мкм, 4 - $\rho_0 = 200$ мкм.

Режим дифракции сфокусированного ПМЛП на большом числе неоднородностей объекта возникает при значительном превышении размеров перетяжек гауссовых пучков над размерами рассеивающих центров l_s . Для этого режима удастся сделать упрощения в выражении для контраста полос, которое в случае непересечения перетяжек гауссовых пучков (интерференция неидентичных спекл-полей) принимает относительно простой вид:

$$V_{\max} = \left[1 + \frac{1 - \exp(-\sigma_s^2)}{\exp(-\sigma_s^2)} \frac{\rho_0^2}{2w_0^2} \right]^{-1} \quad (4)$$

На основе полученных аналитических выражений проводится подробный анализ влияния параметров пучка на контраст полос. Рассмотрение зависимости контраста полос от параметра объекта σ_s приводит к двум весьма интересным эффектам. Суть первого эффекта заключается в том, что большие значения радиусов перетяжек гауссовых пучков w_0 поддерживают величину контраста полос средней интенсивности на уровне единицы при изменении σ_s в достаточно широком диапазоне значений ($0 \div \pi$) (рис.7.а). Вторым важным эффектом, возникающим при интерференции частично-идентичных спекл-полей, является отличие контраста полос от нуля при достаточно больших значениях параметра $\sigma_s \approx \pi$ (рис.7.б).

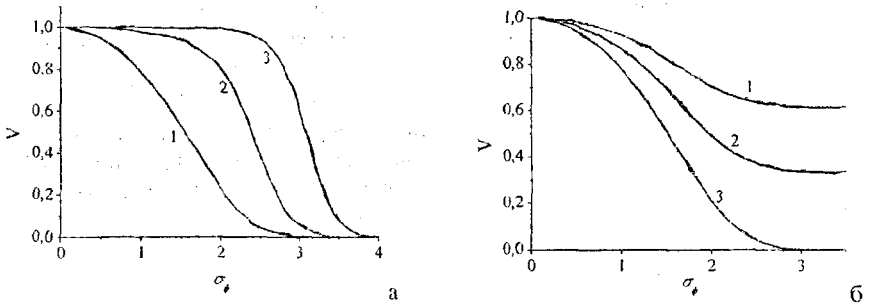


Рис.7. Теоретические зависимости контраста полос средней интенсивности в дальней области дифракции при режиме дифракции сфокусированного ПМЛП на большом числе неоднородностей от параметра объекта σ_p и $l_p = 7.5$ мкм; а) $\rho_0 \gg 2w_0$, 1 - $w_0 = 11$ мкм, 2 - $w_0 = 40$ мкм, 3 - $w_0 = 200$ мкм;

б) $w_0 = 10$ мкм, 1 - $\rho_0 = 10$ мкм, 2 - $\rho_0 = 15$ мкм, 3 - $\rho_0 = 100$ мкм.

Дальнейшие разделы главы 4 посвящены изучению специфического режима дифракции ПМЛП на СФЭ, характеризуемого особой зависимостью контраста полос средней интенсивности от параметра объекта l_p , и возникающего когда размеры неоднородностей намного превышают размеры освещенных областей на объекте (рис.8). В эксперименте такой режим достигается при острой фокусировке ПМЛП на неоднородный объект. На основе простой модели объясняется как параметры объекта влияют на контраст полос средней интенсивности. Делается очень важный вывод о том, что максимальный (в дальней зоне дифракции) контраст полос в случае режима дефлексии определяется выражением для нормированной корреляционной функции граничного поля $V = \mu_c(\bar{\rho}_0)$, причем не важно какой статистике подчиняются фазовые неоднородности объекта.

Этот результат имеет важное самостоятельное значение, позволяющий получать вид корреляционной функции граничного поля для объектов с заранее неизвестной статистикой фазы.

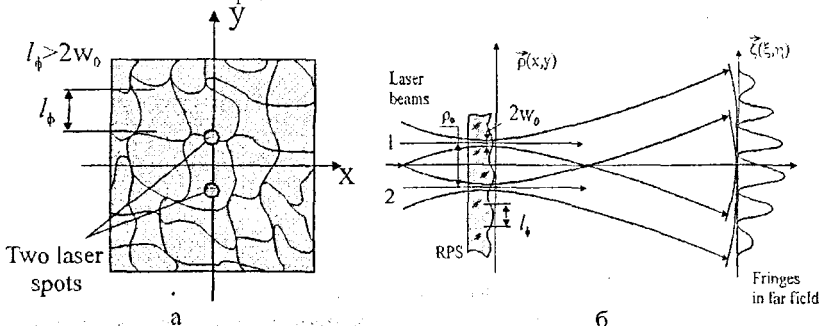


Рис.8. Схемы освещения объекта сфокусированным ПМЛП при режиме дефлексии: а - схематический вид расположения лазерных пятен в плоскости СФЭ с крупноструктурными неоднородностями; б - продольное сечение области фокусировки ПМЛП на СФЭ.

Далее показывается, что существует аналогия эффекта дефлексии пучка и явления интерференции частично-идентичных спекл-полей в случае дифракции на большом числе неоднородностей, а случай дефлексии интерференционных полос соответствует интерференции неидентичных спекл-полей. Предлагается простой метод определения параметра σ_ϕ в режиме дефлексии интерференционных полос.

Экспериментальному подтверждению теоретической зависимости контраста полос от параметров объекта и пучка при дифракции сфокусированного ПМЛП на СФЭ посвящен раздел 4.9 Главы 4, в котором представлены схемы экспериментов, проведен анализ трудностей, возникающих в процессе эксперимента и практического применения метода. Приведены теоретические кривые и экспериментальные данные для режимов дифракции на большом числе неоднородностей и дефлексии полос, показывающие хорошее соответствие теории и эксперимента (рис.9,10,11).

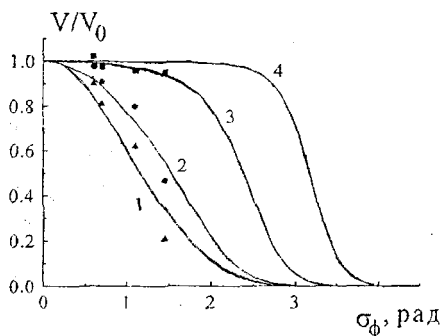


Рис.9. Экспериментальные данные и теоретические графики зависимостей относительного контраста полос средней интенсивности от статистических параметров СФЭ σ_ϕ , l_ϕ и от радиуса перетяжки w_0 освещающего гауссового пучка на поверхности экрана:

- 1 - $w_0 = 6,3$ мкм;
- 2 - $w_0 = 11$ мкм; 3 - $w_0 = 40$ мкм;
- 4 - $w_0 = 200$ мкм; $l_\phi = 7,5$ мкм.

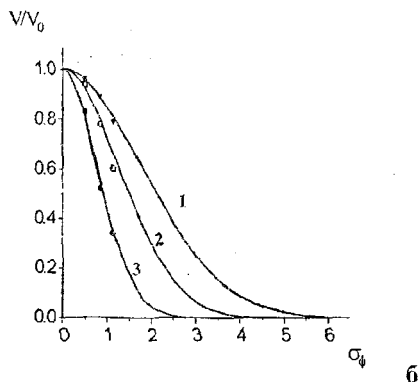
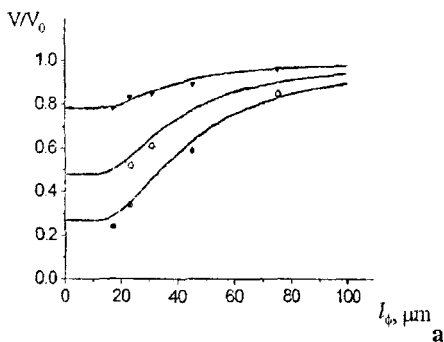


Рис. 10. Режим дефлексии интерференционных полос и пучка. Теоретические кривые и экспериментальные данные, в зависимости от статистических параметров объекта: а) в зависимости от радиуса корреляции l_ϕ неоднородностей СФЭ при $\rho_0 = 29$ мкм: 1 - $\sigma_\phi = 0,5$, 2 - $\sigma_\phi = 0,86$, 3 - $\sigma_\phi = 1,15$; б) в зависимости от параметра σ_ϕ СФЭ при $l_\phi = 23$ мкм: 1 - $\rho_0 = 9,5$ мкм, 2 - $\rho_0 = 14$ мкм, 3 - $\rho_0 = 29$ мкм.

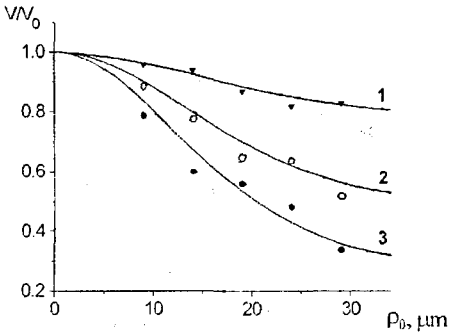


Рис. 11. Режим дефлексии интерференционных полос и пучка. Теоретические кривые и экспериментальные данные, в зависимости от параметра пучка ρ_0 при $l_\phi = 23 \text{ мкм}$: 1 - $\sigma_\phi = 0,5$; 2 - $\sigma_\phi = 0,86$; 3 - $\sigma_\phi = 1,15$.

Последний раздел Главы 4 посвящен различным методам реализации статистического усреднения при зондировании контролируемого объекта сфокусированным ПМЛП. В этом разделе рассмотрены физические принципы, использование которых не требует смещений объекта для реализации статистического усреднения. Самый простой способ это сканирование СФЭ с помощью дефлектора. Для реализации такого сканирования нами разработана оптическая схема, включающая дефлектор лазерного пучка и систему формирования изображения колеблющегося зеркала. Использование дефлектора помогает достигать больших скоростей движения пучка относительно объекта. Эта схема, как показано, может быть использована для диагностики ретиальной остроты зрения глаза человека при замутненности (катаракте) хрусталика.

Другим решением может служить одновременное освещение объекта множеством одинаковых сфокусированных ПМЛП. Применение дифракционной решетки для этих целей не дает необходимого числа пучков для эффективного усреднения распределения интенсивности в плоскости изображения решетки. Достаточное множество одновременно зондирующих ПМЛП, производящих интегральное сканирование объекта, можно получить с помощью рассеивателя, играющего роль нерегулярной дифракционной решетки. Однако в этом случае контролируемый объект, фактически, зондируется спекл-модулированным полем с особыми свойствами, обусловленными освещением рассеивателя интерференционным полем пространственно-модулированного пучка. Оптическая схема измерительной системы представлена на рис. 12.

В отсутствие рассеивателя S_1 контролируемый объект S_2 освещается сфокусированным ПМЛП и для получения полос средней интенсивности необходимо поперечное смещение объекта. Рассеиватель S_1 мультиплицирует ПМЛП - дифракционное поле за ним можно представить в виде суперпозиции множества ПМЛП, распространяющихся по разным направлениям. Соответственно, объект S_2 в этом случае освещается множеством сфокусированных ПМЛП, дифракционные картины от которых в результате когерентного, но некоррелированного, сложения в изображении рассеивателя S_1 , образуют картину полос средней интенсивности.

Процесс формирования интерференционных полос в плоскости изображения S_1 допускает другую интерпретацию, удобную для формального анализа и наглядную с физической точки зрения.

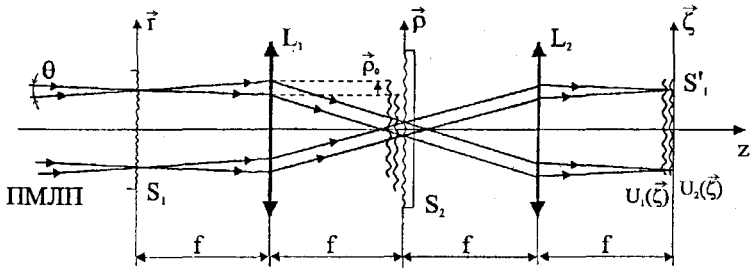


Рис.12. Телескопическая оптическая схема измерительной системы с освещающим пространственно-модулированным лазерным пучком, рассеивателем во входной плоскости и контролируемым объектом в пространственно-частотной плоскости: L_1 , L_2 – собирающие линзы; S_1 – рассеиватель в передней фокальной плоскости линзы L_1 ; S_2 – контролируемый объект в задней фокальной плоскости линзы L_1 ; S_1' – изображение рассеивателя S_1 .

Рассеиватель S_1 освещается одновременно двумя идентичными волнами с отличающимися на угол θ направлениями распространения, и за ним формируются два идентичных спекл-поля, распространяющихся под тем же углом θ друг к другу. В задней фокальной плоскости линзы L_1 поля приобретут взаимный поперечный сдвиг $\rho_0 = \theta f = \lambda f / \Lambda$, где Λ – период полос в освещающем ПМЛП. Из-за этого сдвига спекл-поля за объектом S_2 станут частично декоррелированными и в плоскости изображения, где сдвиг спекл-полей опять станет равным нулю, произойдет уменьшение контраста полос средней интенсивности.

В данном подразделе представлены результаты исследований процесса формирования интерференционных полос в плоскости изображения рассеивателя, направленные на установление качественных и аналитических зависимостей контраста полос от параметров контролируемого объекта, оптической системы и освещающего ПМЛП. На основе проведенного теоретического анализа дано объяснение эффекту повышения контраста полос средней интенсивности при уменьшении апертуры освещающего ПМЛП (рис.13).

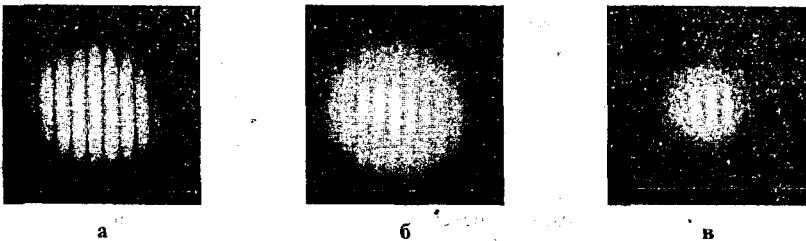


Рис.13. Картина полос средней интенсивности в изображении рассеивателя в отсутствие контролируемого объекта (а) и с рассеивающим объектом в пространственно-частотной плоскости оптической системы при различных диаметрах апертуры освещающего рассеивателя пространственно-модулированного лазерного пучка (б,в).

Показано, что при достаточно большой апертуре освещающего ПМЛП выражение для контраста полос принимает исключительно простой вид:

$$V = V_0 \mu_z(\bar{\rho}_0) \quad (5)$$

Контраст полос определяется только нормированной функцией корреляции граничного поля за объектом в зависимости от величины и направления взаимного сдвига $\bar{\rho}_0$, т.е. от периода и ориентации полос в освещающем ПМЛП. Рассматриваемая схема в данном режиме играет роль интерферометра сдвига. Аналогичное выражение для контраста полос имеет место и при зондировании СФЭ одним сфокусированным ПМЛП в режиме дефлексии интерференционных полос, когда радиус перетяжки лазерного пучка на объекте w_0 существенно меньше поперечных размеров неоднородностей l_ϕ , $w_0 \ll l_\phi$.

На рис.14 и рис.15 приведены теоретические графики и экспериментальные точки для относительного контраста полос V/V_0 в изображении рассеивателя в зависимости от параметров зондирующего объекта светового спекл-модулированного поля Λ , ρ_f и параметров контролируемого объекта l_ϕ и σ_ϕ .

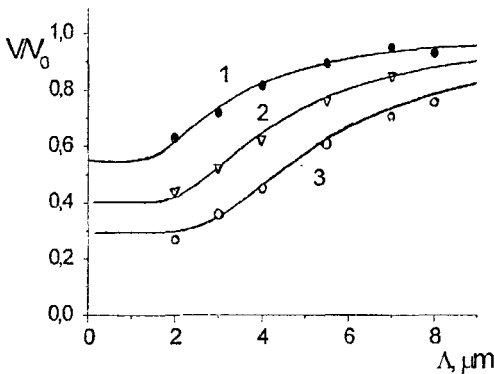


Рис.14. Контраст интерференционных полос средней интенсивности в изображении рассеивателя, $\sigma_\phi = 1.15$ и $l_\phi = 17$ мкм, в зависимости от периода полос Λ в освещающем пучке при различных значениях апертуры $2W$ пучка и, соответственно, различных значениях радиуса корреляции зондирующего объекта поля ρ_f при $f = 110$ мм: 1 - $2W = 3$ мм, $\rho_f = 20,8$ мкм; 2 - $2W = 5$ мм, $\rho_f = 12,5$ мкм; 3 - $2W = 12$ мм, $\rho_f = 5,2$ мкм.

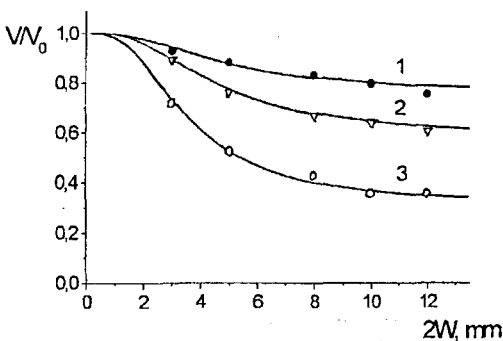


Рис.15. Контраст интерференционных полос средней интенсивности в изображении рассеивателя, $\sigma_\phi = 1.15$ и $l_\phi = 17$ мкм, в зависимости от апертуры пучка при различных значениях периода полос: 1 - $\Lambda = 8$ мм; 2 - $\Lambda = 5,5$ мм; 3 - $\Lambda = 3$ мм.

В конце раздела рассмотрена дифракция расфокусированного ПМЛП на СФЭ. Теоретически и экспериментально установлено, что при расфокусировке контраст

полос остается тем же, что и при фокусировке ПМЛП на рассеивающую поверхность. Этот факт позволяет использовать расфокусировку для диагностики неподвижных объектов.

Заключение

В работе развиты теоретические и экспериментальные основы интерференции частично-развитых спекл-полей, формирующихся в зоне дифракции сфокусированного ПМЛП на СФЗ. Разработан новый метод исследования статистической структуры фазовых микронеоднородностей рассеивающих объектов, основанный на зондировании объекта сфокусированным ПМЛП.

Показано, что при освещении случайно неоднородного объекта сфокусированным ПМЛП в зависимости от параметра пучка, характеризующего расстояние между осями двух гауссовых пучков, составляющих ПМЛП, происходит интерференция частично-идентичных, либо полностью неидентичных лазерных спекл-полей. Проведен подробный качественный анализ интерференции частично-идентичных и неидентичных спекл-полей. В соответствии с соотношением между размером освещенной области на объекте и размером длины корреляции фазовых неоднородностей объекта выявлены важные с методологической и практической точек зрения режимы дифракции: режим дифракции на большом числе неоднородностей, режим дефлексии интерференционных полос и пучка и режим дифракции на малом числе неоднородностей, характеризующие качественно отличающиеся зависимостями контраста полос от радиуса корреляции фазовых неоднородностей.

Новые приближения, полученные для корреляционной функции пропускания объекта, позволили получить аналитические выражения для корреляционной функции дифракционного поля и установить аналитическую зависимость контраста полос средней интенсивности от статистических параметров объекта во всех трех выделенных режимах.

Выявлены основные закономерности процессов формирования интерференционных картин в дифракционном поле. Установлены важные для практики особенности поведения контраста полос средней интенсивности при тех или иных вариациях параметров объекта и пучка, что может быть положено в основу частных методик количественного контроля параметров структуры объекта. Полученные результаты закладывают теоретические и экспериментальные основы в решении задач формирования и передачи интерференционных картин через рассеивающие среды, что может быть перспективным, в частности, в офтальмологии при диагностике региональной остроты зрения в условиях катаракты хрусталика.

Предложенный и теоретически обоснованный в работе метод так называемого интегрального сканирования, имеет самостоятельное научное и практическое значение, так как может быть рассмотрен в терминах задачи передачи интерференционных картин через рассеивающие среды.

Теоретические положения, разработанные в работе, при соответствующей адаптации могут быть применены к описанию процессов интерференции частично-развитых спекл-полей в голографических методах и системах, и тем самым составить теоретические основы голографической интерференции случайно неоднородных объектов, в рамках которых рассматривается связь между контрастом полос голографических интерферограмм с параметрами статистических неоднородностей исследуемых объектов.

Предметом теоретических и экспериментальных исследований в работе были рассеивающие объекты, удовлетворяющие модели СФЭ, дальнейшее развитие метода связано с приложением и разработкой соответствующего теоретического подхода для анализа объемных рассеивающих сред, характеризующихся многократным рассеянием, а также с исследованием объектов с негауссовой статистикой и объектов со сложной формой корреляционной функции фазовой микроструктуры объектов. Кроме того, важной, на наш взгляд, является приложимость результатов работы к случайным амплитудным рассеивающим объектам.

Основные результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях

1. Рябухо В.П., Чаусский А.А. Интерференция спекл-полей в зоне дифракции сфокусированного пространственно-модулированного лазерного лучка на случайном фазовом экране // Письма в ЖТФ. - 1995. - Т. 21, В.16. - С.57-62.
2. Рябухо В.П., Чаусский А.А. Зондирование случайного фазового экрана сфокусированным пространственно-модулированным лазерным пучком. Дифракция на большом числе неоднородностей. // Письма в ЖТФ. - 1997. - Т.23 - В.19. - С.47-53.
3. Рябухо В.П., Чаусский А.А. Зондирование случайного фазового экрана сфокусированным пространственно-модулированным лазерным пучком. Режим дифракции интерференционных полос. // Письма в ЖТФ. 1999. Т.25. В.1. С.56-61.
4. Рябухо В.П., Чаусский А.А., Григевич А.Е. Зондирование случайного фазового экрана сфокусированным пространственно-модулированным лазерным пучком. Метод интегрального сканирования. // Письма в ЖТФ. 1999. Т.25. В.24. С.5-10.
5. Ryabukho V.P., Chaussky A.A., Tuchin V.V. Interferometric testing of the random phase objects by focused spatially-modulated laser beam. // *Photonics and Optoelectronics*, 1995, V.3, N.2, P.77-85.
6. Рябухо В.П., Чаусский А.А., Терентьева И.Ф., Хомутов В.Л., Григевич А.Е. Лазерные измерительные системы с пространственно-модулированными зондирующими пучками для контроля параметров рассеивающих объектов. В сб.: *Оптические методы обработки информации*. - М.: МФТИ, 1998, с.43-51.
7. Ryabukho V.P., Khomutov V.L., Arshuk O.A., Chaussky A.A., Terent'eva I.F. Light interference in diffraction field of spatially modulated laser beam behind random phase object // *Proc. SPIE: Holography and Correlation Optics*. Vol.2647. 1995. P.63-74.
8. Ryabukho V.P., Chaussky A.A., Tuchin V.V. Interferometric testing of the random phase objects by focused spatially-modulated laser beam. *Proc. of Intl. Conf. on Coherent and Nonlinear Optics*, S.Petersburg, 1995.
9. Ryabukho V.P., Chaussky A.A., Khomutov V.L., Tuchin V.V., Terent'eva I.F. Interferometric testing of random phase object (biological tissue models) by a spatially modulated laser beam. *Proc. SPIE: CIS Selected Papers "Coherent-Domain Methods in Biological Optics"*, V.2732, 1996, P.100-117.
10. Ryabukho V.P., Chaussky A.A., Tuchin V.V., Interferometric testing of the random phase objects by focused spatially-modulated laser beam. // *Proc. of 15 Intl. Conference in Coherent and Nonlinear Optics: "Laser Chemistry, Biophysics, and Biomedicine"*, V.2802, June 1996, P.216-222.
11. Ryabukho V.P., Chaussky A.A., Tuchin V.V. Optical testing of random phase objects using focused spatially modulated laser beam. *Proc. SPIE: Nonlinear Dynamics and*

- Structures in Biology and Medicine: Optical and Laser Technologies. V.3053, 1997, P. 114-122
12. Рябухо В.П., Чаусский А.А., Терентьева И.Ф. Лазерная интерферометрия случайно неоднородных объектов. В кн.: Голографические методы исследования в науке и технике. Труды Школы-симпозиума. Ярославль: ЯГПУ, 1997, С.35-53.
 13. Рябухо В.П., Чаусский А.А. Интерференционный контроль шероховатости поверхности методом зондирующего сфокусированного пространственно-модулированного лазерного пучка. Матер. межд. конф.: "Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении. - Саратов, Изд-во Саратовского университета, 1997, с.192-194.
 14. Ryabukho V., Chaussky A., Khomutov V., Minenkova I. Laser interferometry of random phase objects. Proc. SPIE: International Conference on Correlation Optics, 1997, V.3317, P.294-304.
 15. Chaussky A., Ryabukho V., Tuchin V., Akchurin G., Bakutkin V., Radchenko E., Nazaryants V. Laser interferential diagnostics of retinal visual acuity of the human eye with cataract. Proc. SPIE: Coherent Domain Optical Methods in Biomedical Science and Clinical Applications III. 1999. Vol.3598. - pp. 288-293.
 16. Чаусский А.А., Горбатенко В.Б., Рябухо В.П. Дифракция интерференционного поля в изображающей системе со случайными фазовыми экранами в предметной и пространственно-частотной плоскостях. //В сб. Проблемы оптической физики. Материалы школы по оптике, лазерной физике и биофизике. Саратов 2000.

Список цитируемой литературы

1. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. Пер. с англ. - М.: Мир, 1986. - 328с.
2. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. - М.: Наука, 1977. - 336с.
3. Ангельский О.В., Житоряк В.Г., Максимьяк П.П. О возможности корреляционно-оптического исследования фазово-неоднородных статистических поверхностей. //Опт. и спектр. -1986.- Т.60.- В.5.- С.1013-1017.
4. Ангельский О.В., Курек Г.К., Магун И.И., Максимьяк П.П. Исследование статистических моментов амплитуды и фазы поля оптического излучения, рассеянного хаотическим фазовым экраном. //Опт. и спектр. -1989.-Т.66. - В.4.- С.835-838.
5. Angelsky O.V., Maksimyak P.P. Optical diagnostics of random phase objects. // Appl. Opt. - 1990. - V.29. - №19. - P.2894-2898.
6. Рябухо В.П., Автисян Ю.А., Суманова А.Б. Дифракция пространственно-модулированного лазерного пучка на случайном фазовом экране. //Опт. и спектр. - 1995. - Т.79. - В.2. -С.299-306.
7. Рябухо В.П. Диссерт. доктора физ.-мат. наук. -Саратов, СГУ, 1996