

На правах рукописи

Ланцов Алексей Дмитриевич

**ПРЯМАЯ КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА
СПЕКЛ-МОДУЛИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Владивосток

2008

Работа выполнена в **Дальневосточном государственном техническом университете (ДВПИ им. В.В. Куйбышева).**

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Витрик Олег Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Букин Олег Алексеевич

кандидат физико-математических наук
Стародуб Александр Николаевич

Ведущая организация:

Дальневосточный государственный университет путей сообщения.

Защита диссертации состоится «29» декабря 2008 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 005.007.02 при Институте автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской Академии Наук по адресу: г. Владивосток, ул. Радио, 5, ауд. 510.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН и на сайте ИАПУ ДВО РАН.

Автореферат разослан “25” ноября 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



Гамаюнов Е.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Прецизионные оптические методы измерений широко применяются практически во всех областях науки и техники, что объясняется тем, что данные методы являются неконтактными, дистанционными, высокочувствительными, они устойчивы к электромагнитной помехе, обеспечивают регистрацию параметров быстропротекающих процессов и позволяют проводить измерения в широком диапазоне изменения температуры, давления и других параметров окружающей среды.

Однако большинство прозрачных и непрозрачных объектов, параметры которых требуется измерить, а зачастую и оптические детали измерительных систем являются в той или иной степени случайно-неоднородными в масштабе длин волн оптического диапазона. Поэтому когерентные световые пучки на выходе оптических измерительных систем часто становятся пространственно неоднородным и, будучи направлены на экран, формируют картину со множеством хаотически расположенных темных и светлых пятен, которые называются спеклами. Физическая причина формирования таких структур состоит в том, что каждый из элементов изображения в плоскости наблюдения представляет результат когерентного сложения возмущений световой волны, сформированных множеством различных рассеивающих центров.

Исследования формирования спекл-структуры привели к формированию в 60-70 гг. XX века нового направления в метрологии - спекл-интерферометрии.

Начиная с 80-х годов XX века классические методы спекл-интерферометрии получили дальнейшее развитие, что позволило значительно расширить диапазон применения данного подхода в задачах метрологии. Новым применением таких методов стала обработка сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров (ОМИ), которые формируют спекл-структуры на выходе многомодового волоконного световода (ВС) в результате когерентного сложения полей большого числа собственных волн с очень сложным пространственным распределением амплитуды по поперечному сечению световода и практически произвольными фазами.

Изменение картины спеклового поля при внешнем воздействии на формирующий спекл-структуру объект может иметь характер трансляции либо кипения. Трансляция представляет собой смещение спекл-структуры в плоскости наблюдения без ее изменения. Кипение характеризуется хаотичным перестроением отдельных спеклов, составляющих спекл-структуру.

Для извлечения информации о параметрах деформации объектов, формирующих спекл-структуру, обычно используют методы лазерной спекл-интерферометрии, такие как двухэкспозиционную спекл-фотографию, корреляционную спекл-интерферометрию и их модификации. Методы спекл-фотографии и корреляционной спекл-интерферометрии обладают высокой чувствительностью к деформационным смещениям исследуемых объектов, однако их важной особенностью является то, что они могут быть применены только при трансляции спеклов.

Однако такой режим преобразований спекл-структур практически никогда не реализуется при деформационных воздействиях на многомодовые волоконные световоды, которые в настоящее время все шире используются в качестве чувствительных элементов в составе различных волоконно-оптических измерительных преобразователей, использующихся для измерения широкого ряда физических величин.

В случае кипения спеклов для извлечения количественной информации о параметрах деформации объектов предпочтительнее оказывается применение методов

прямого измерения корреляции между заранее записанным изображением исходного распределения интенсивности в спекл-картине и текущим распределением интенсивности без формирования картины интерференционных полос или полос корреляции.

Обработка, связанная с прямыми измерениями корреляционной функции спекловых полей, оптимальна для случая «кипящих» спекловых полей. Однако она может быть использована и в случае трансляции спеклов. Это обуславливает универсальность такого подхода, который может быть использован для изучения параметров деформации не только многомодовых волоконных световодов в составе одноволоконных многомодовых интерферометров, но и диффузных объектов. Прямое вычисление корреляционной функции не требует формирования интерференционных полос или полос корреляции, поэтому от приборов с зарядовой связью (ПЗС), используемых для регистрации спекл-структур, не требуется сверхвысокой разрешающей способности, что является дополнительным преимуществом.

Использование ПЗС в схеме прямой корреляционной обработки спекл-сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров дает возможность создания не только точечных измерительных преобразователей, но и многоканальных волоконно-оптических измерительных систем за счет регистрации излучения на выходе множества ОМИ единой матрицей с синхронной обработкой информации при помощи ЭВМ, сопряженной с измерительной системой. Такой подход открывает перспективу создания мультиплексированных лазерных измерительных систем, а также волоконно-оптических измерительных систем томографического типа.

Волоконно-оптические системы томографического типа способны обеспечить решение широкого класса фундаментальных и прикладных задач, требующих проведения мониторинга параметров физических полей на контролируемых поверхностях технических и природных объектов большой площади. Решение достигается за счет использования протяженных измерительных линий с интегральной чувствительностью, в качестве которых наиболее перспективно применение одноволоконных многомодовых интерферометров, формирующих спекл-сигналы.

Однако реальные ПЗС устройства имеют ограниченные апертуру, пространственное разрешение и динамический диапазон. Существенное значение так же приобретают временные характеристики процессов записи и считывания оптических изображений с матриц ПЗС. Эти особенности могут исказить статистические и, как следствие, корреляционные свойства сигналов о пространственном распределении спекловых полей. Данное обстоятельство обуславливает необходимость исследования статистических и корреляционных свойств сигналов ПЗС о пространственном распределении интенсивности спекловых полей, формируемых при прохождении лазерного излучения через многомодовый ВС в составе одноволоконного многомодового интерферометра, и при рассеянии лазерного излучения диффузными объектами и выяснения оптимальных условий регистрации спекл-сигналов приборами с зарядовой связью, обеспечивающих соответствие корреляционных свойств исходных и регистрируемых сигналов.

Необходимо связать однозначной функциональной зависимостью величину коэффициента корреляции спекловых полей, измеряемую оптоэлектронными ПЗС системами с параметрами деформации ОМИ и диффузных объектов, определить погрешность, динамический и частотный диапазон измерений параметров деформации объектов корреляционным способом. На основе этих данных необходимо разработать метод обработки сигналов ПЗС, обеспечивающий измерения параметров деформации ОМИ и диффузных объектов. Требуется разработать макеты конструкций волоконно-

оптических измерительных преобразователей и систем для измерения параметров деформации объектов в статическом и динамическом режимах, определить их рабочие характеристики и выяснить особенности их применения при проведении измерений параметров деформации техногенных и природных объектов различного назначения.

Для реализации многоканальных лазерных волоконно-оптических измерительных систем на основе одноволоконных многомодовых интерферометров требуется выяснить условия регистрации излучения большого числа волоконных световодов приборами с зарядовой связью, изучить влияние перекрестной помехи между каналами на результат измерений и установить максимальное количество измерительных каналов в составе системы.

Остаются неизученными особенности реализации томографических систем на основе корреляционной обработки спекл-сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров с использованием ПЗС. Для данного случая необходимо разработать специальные математические алгоритмы для обработки массивов получаемой системой информации. Требуются модификации топологии установки волоконно-оптических измерительных линий применительно к особенностям геометрии и физическим свойствам исследуемого объекта.

Цель работы

Разработка прямого корреляционного метода обработки сигналов ПЗС о пространственном распределении случайно-неоднородных оптических полей, формируемых при прохождении лазерного излучения через многомодовые волоконные световоды в составе одноволоконных многомодовых интерферометров и при рассеянии лазерного излучения диффузными объектами, а также создание на его основе принципов построения лазерных систем для измерения параметров деформации объектов различного назначения. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи.

Необходимо исследовать статистические и корреляционные свойства сигналов ПЗС о пространственном распределении интенсивности случайно-неоднородных оптических полей, формируемых при прохождении лазерного излучения через многомодовые волоконные световоды и при рассеянии лазерного излучения диффузными объектами.

Необходимо разработать метод обработки случайно-неоднородных оптических полей рассеянного лазерного излучения оптоэлектронными ПЗС системами, основанный на прямом измерении корреляционной функции спекл-сигналов и обеспечивающий прецизионные измерения параметров деформации технических и биологических объектов.

Требуется разработать физические принципы построения многоканальной лазерной волоконно-оптической измерительной системы, основанной на использовании одноволоконных многомодовых интерферометров и оптоэлектронной ПЗС системы обработки их спекл-сигналов. Необходимо определить максимальное число измерительных каналов такой системы и разработать алгоритмы и программные пакеты для обработки ее выходных сигналов.

Требуется разработать физические принципы построения и топологию одномерной лазерной волоконно-оптической измерительной системы томографического типа для сбора данных о параметрах деформации объектов. Необходимо разработать математические методы и вычислительные пакеты для обработки массивов получаемых ею интегральных данных.

Научная новизна

1. Впервые исследованы статистические и корреляционные свойства сигналов ПЗС о пространственном распределении интенсивности случайно-неоднородных оптических полей, формируемых при прохождении лазерного излучения через многомодовые волоконные световоды. Сформулированы оптимальные условия регистрации спекл-сигналов приборами с зарядовой связью, при выполнении которых обеспечивается соответствие статистических и корреляционных свойств исходных и регистрируемых спекл-сигналов.
2. Впервые разработан метод обработки случайно-неоднородных оптических полей рассеянного лазерного излучения оптоэлектронными ПЗС системами, основанный на прямом измерении корреляционной функции спекловых полей, и обеспечивающий прецизионные измерения параметров деформации технических и биологических объектов. Определены величина погрешности измерения параметров деформации при помощи указанного метода, динамический и частотный диапазоны измерений.
3. Впервые разработаны физические принципы построения многоканальной лазерной волоконно-оптической измерительной системы, основанной на использовании одноволоконных многомодовых интерферометров и оптоэлектронной ПЗС системы обработки их спекл-сигналов. Определено максимальное число измерительных каналов такой системы в зависимости от числовой апертуры используемого многомодового волоконного световода, размеров апертуры и разрешения матрицы ПЗС.
4. Впервые разработаны физические принципы построения и топология одномерной лазерной волоконно-оптической измерительной системы томографического типа для сбора данных о параметрах деформации объектов.

Положения, выдвигаемые на защиту:

1. Результаты исследований статистических и корреляционных свойств сигналов ПЗС о пространственном распределении интенсивности случайно-неоднородных оптических полей, формируемых при прохождении лазерного излучения через многомодовые волоконные световоды.
2. Метод прямой корреляционной обработки спекл-модулированного лазерного излучения оптоэлектронными ПЗС системами, обеспечивающий прецизионные измерения параметров деформации технических и биологических объектов.
3. Физические принципы построения лазерных многоканальных волоконно-оптических измерительных систем, в том числе томографического типа, для мониторинга процессов деформации объектов.

Научная и практическая значимость диссертации заключается в том, что проведенные в диссертационной работе исследования позволили сформулировать оптимальные условия регистрации спекл-сигналов приборами с зарядовой связью, при выполнении которых обеспечивается соответствие статистических и корреляционных свойств исходных оптических и регистрируемых ПЗС электрических сигналов.

Разработанный метод регистрации и обработки оптических спекл-сигналов, основанный на выполнении прямых измерений коэффициента корреляции опорного и текущего пространственных распределений интенсивности спекл-модулированных световых волн оптоэлектронными системами с применением приборов с зарядовой связью, предоставляют возможность создания широкого круга измерительных преобразователей для измерения параметров деформации как волоконных световодов в составе одноволоконных многомодовых интерферометров, так и диффузных объектов.

Разработанные физические принципы построения лазерных многоканальных волоконно-оптических измерительных систем, в том числе томографического типа, открывают широкие возможности для построения на их базе большого количества многоканальных измерительных систем, в том числе для мониторинга напряженно-деформированного состояния техногенных объектов, восстановления пространственного распределения полей физических величин вдоль выбранных направлений измерений, а также широкого ряда других практических исследований.

Полученные результаты позволили предложить макеты конструкций волоконно-оптических измерительных преобразователей для измерения параметров продольной и поперечной деформации объектов в статическом и динамическом режимах. Данные результаты могут найти применение при создании систем, предназначенных для отслеживания параметров полей деформации в элементах исследуемых объектов, для контроля их текущего состояния и предупреждения о нарушениях в работе и выходе из строя их элементов.

Апробация работы: основные результаты, полученные в диссертации, были представлены на следующих региональных, всероссийских и международных конференциях:

1. Fifth Asia-pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2005, Vladivostok (Russia), 2005.
2. Sixth Asia-pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2006, Harbin (P.R. of China), 2006,
3. SPIE Optics + Photonics. San-Diego (USA), 2007.
4. 8-th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments ISMTII 2007, Sendai (Japan), 2007.
5. Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2007, Пермь (Россия), 2007.
6. Sixth Asia-pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2007, Vladivostok (Russia), 2007.
7. Seventh Asia-pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics APCOM'2008, Tokyo (Japan), 2008.
8. SPIE Optics + Photonics. San-Diego (USA), 2008.
9. Международная научно - техническая конференция, посвященная 85-летию со дня рождения проф. П. П. Ступаченко – Владивосток (Россия), 2008.

Основные практические результаты, полученные в настоящей работе, экспонировались на 11-й Всероссийской научно-производственной инновационной выставке-ярмарке «ИНТЕГРАЦИЯ – 2006» в рамках 9-го Международного Всесибирского инновационного форума, 2006.

По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 126 страниц, работа включает 42 рисунка и список литературы из 133 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обсуждаются существующие методы регистрации и обработки спекл сигналов, их достоинства и недостатки. Обосновывается актуальность, ставятся задачи проводимого исследования, намечаются возможные пути решения поставленных задач. Формулируется цель диссертационной работы и положения, выдвигаемые на защиту, приводится краткое содержание работы.

В первой главе рассматриваются особенности регистрации и обработки спекл-сигналов, формируемых многомодовыми волоконными световодами, работающими в режимах возбуждения как большого, так и малого числа мод, при помощи оптоэлектронных ПЗС систем, применительно к созданию оптических методов измерений аксиальных деформаций ВС в схеме одноволоконных многомодовых интерферометров.

Метод прямой корреляционной обработки спекл-сигналов многомодовых волоконных световодов состоит в том, что матрица ПЗС регистрирует опорное изображение спекл-картины, соответствующее начальному состоянию волоконного световода в ОМИ. В качестве меры сравнения спекл-сигналов до и после деформационного воздействия на ВС вычисляется парный рядный коэффициент корреляции:

$$\rho_{12} = \frac{\langle I_2^{ОМИ} \cdot I_1^{ОМИ} \rangle - \langle I_1^{ОМИ} \rangle \cdot \langle I_2^{ОМИ} \rangle}{\sqrt{\left(\langle (I_1^{ОМИ})^2 \rangle - \langle I_1^{ОМИ} \rangle^2 \right) \left(\langle (I_2^{ОМИ})^2 \rangle - \langle I_2^{ОМИ} \rangle^2 \right)}} \text{ для опорного } (I_1^{ОМИ}) \text{ и текущего } (I_2^{ОМИ})$$

пространственного распределения интенсивностей спекл-картин, угловые скобки означают процедуру усреднения по апертуре светового поля.

Теоретически и экспериментально установлено, что коэффициент корреляции между текущим и опорным изображениями спекл-картины на выходе многомодового волоконного световода определяется изменением длины ВС, не зависит от других факторов деформации, и описывается выражением

$$\rho_{12} = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi \cdot \Delta l}{\Delta l_0}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot \Delta l}{\Delta l_0}\right)^2}, \quad (1)$$

где Δl - величина удлинения ВС, Δl_0 - характерное удлинение многомодового волоконного световода, по достижении которого наблюдается полная декорреляция сигнала межмодовой интерференции и опорного изображения. Теоретически и экспериментально установлено, что характерная величина Δl_0 определяется в зависимости от длины волны лазерного излучения (λ) и оптических характеристик используемого волоконного световода в ОМИ следующим выражением: $\Delta l_0 = \frac{\lambda}{\Delta n(1 - \mu \tilde{\zeta})}$, где

μ - коэффициент Пуассона, $\tilde{\zeta} = 2 - \frac{\pi}{V}$, $V = kr_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, r_0 - радиус сердцевины световода, $k = 2\pi / \lambda$, $\Delta n = n_1 - n_2$ - разность показателей преломления сердцевины и оболочки ВС соответственно. Экспериментально и теоретически установлено, что по измеренным значениям коэффициента корреляции ρ_{12} можно находить величину удлинения волоконного световода в составе ОМИ даже в том случае, когда удлинение значительно превышает характерную величину Δl_0 . Это достигается за счет последовательной перезаписи опорных сигналов о пространственном распределении

интенсивностей спекл-сигналов. При сравнении текущего изображения с несколькими записанными в памяти ЭВМ опорными сигналами удается устанавливать направление деформации.

Продемонстрировано, что статистические и корреляционные свойства измеренных оптоэлектронными ПЗС системами значений интенсивностей спекл-модулированных световых волн, формируемых при прохождении лазерного излучения через многомодовый световод в составе ОМИ, зависят от режима работы прибора с зарядовой связью, используемого для их регистрации.

Соответствие статистических и корреляционных свойств исходных и регистрируемых спекл-сигналов достигается при обеспечении оптимального режима регистрации спекл-сигналов оптоэлектронными ПЗС системами.

Оптимальные условия регистрации картин многомодовой интерференции приборами с зарядовой связью заключаются в следующем:

а) Статистический параметр распределения интенсивности света в регистрируемой спекл-картине \bar{X} / X_{\max} (где \bar{X} - среднее зарегистрированное значение интенсивности, X_{\max} - максимальное значение зарегистрированной интенсивности) не превышает 0.15.

б) Расстояние L между формирующим спеклы объектом и ПЗС должно удовлетворять условию - $\frac{D}{\lambda} \delta_{nc} \ll L \ll \frac{D}{\lambda} \Delta_{ПЗС}$ (где D - это диаметр светоизлучающей сердцевины световода, L - расстояние от выходного торца ВС до плоскости наблюдения, λ - длина волны излучения, δ_{nc} - поперечные размеры элемента матрицы ПЗС, $\Delta_{ПЗС}$ - размеры светочувствительной площадки ПЗС).

в) Радиус R регистрируемой картины должен находиться в пределах - $R_0 / 3 \div R_0$, (где R_0 - радиус участка спекл-картины, в пределах которого ПЗС матрицей регистрируется 80% световой мощности).

Выполнение условия (а) для параметра \bar{X} / X_{\max} означает, что доля ПЗС ячеек, работающих в нелинейном режиме, настолько мала, что это не приводит к заметной погрешности при измерении значений коэффициента ρ_{12} и в целом ПЗС находится в линейном режиме регистрации спекл-сигналов.

Рис. 1 демонстрирует экспериментальные зависимости для плотности распределения сигнала X_{ij} , полученные при освещении ПЗС спекл-модулированной поляризованной световой волной при различных значениях статистического параметра \bar{X} / X_{\max} . Видно, что экспоненциальный характер кривой 1, характерный для плотности распределения световой интенсивности случайных когерентно-оптических полей, свидетельствует о линейном режиме работы используемого прибора, а изменившийся характер кривых 2-5 о нелинейном режиме.

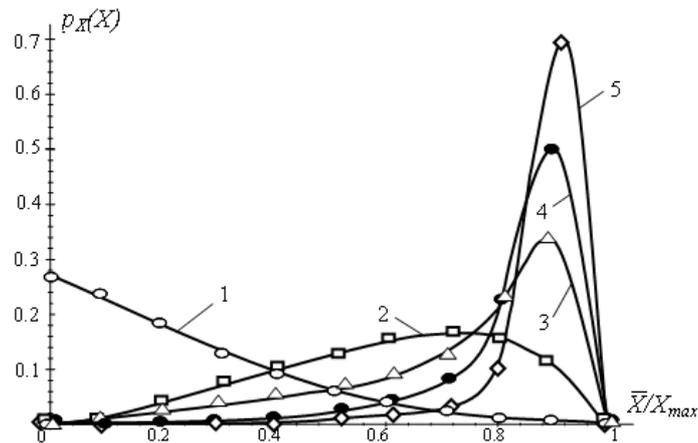


Рис. 1 Результаты измерений плотности распределения для выходного сигнала ПЗС при его освещении спекл-модулированной поляризованной световой волной. Кривая 1 получена при $\bar{X}/X_{\max} = 0.12$; кривая 2 - при $\bar{X}/X_{\max} = 0.18$; кривая 3 - при $\bar{X}/X_{\max} = 0.4$; кривая 4 - при $\bar{X}/X_{\max} = 0.58$; кривая 5 - при $\bar{X}/X_{\max} = 0.84$.

Рис. 2 демонстрирует результаты измерения зависимости коэффициента корреляции интенсивностей спекловых полей от удлинения многомодового световода в ОМИ в линейном режиме регистрации при $\bar{X}/X_{\max} = 0.15$ (кривая 2) и в нелинейном режиме при $\bar{X}/X_{\max} = 0.8$ (кривая 3).

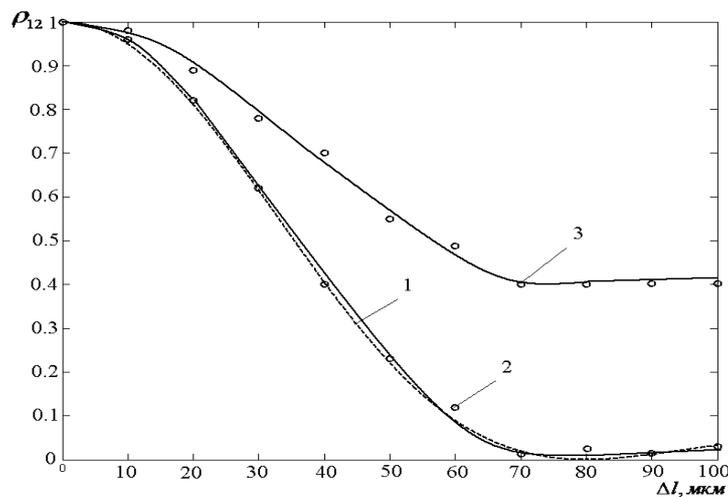


Рис. 2 Зависимость коэффициента корреляции от удлинения световода с параметрами: числовая апертура 0.2, $\Delta n = 0.13$, диаметр сердцевины 50 мкм: 1 – кривая для коэффициента корреляции распределений интенсивности опорного и текущего спекл-сигналов на выходе волоконного световода, 2, 3 – экспериментальные кривые, измеренные для сигналов ПЗС и полученные соответственно при $\bar{X}/X_{\max} = 0.15$, $\bar{X}/X_{\max} = 0.8$.

Видно, что кривая 2, измеренная для сигналов ПЗС, совпадает с рассчитанной согласно выражению 1 кривой для коэффициента корреляции распределений интенсивности опорного и текущего спекл-сигналов на выходе волоконного световода. Из

рисунка 2 видно, что кривая 3, измеренная при нелинейном режиме регистрации, отличается от кривых 1 и 2 наличием постоянной составляющей.

Для выполнения условия (а) следует ограничивать интенсивность лазерного излучения, регистрируемого ПЗС.

Выполнение условия (б) для геометрии взаимного расположения волоконного световода и ПЗС обеспечивает разрешение отдельных спеклов в спекл-картине, регистрацию их числа, достаточного для статистической обработки, а ограничение апертуры спекл-картины согласно условию (в) позволяет избежать регистрации внешних по отношению к спекл-картине участков.

Рис. 3 демонстрирует влияние выполнения этих условий на результаты измерения ПЗС системой коэффициента корреляции интенсивностей спекловых полей. Видно, что из всех экспериментальных кривых к кривой 1 для коэффициента корреляции распределений интенсивности опорного и текущего спекл-сигналов на выходе волоконного световода близка только кривая 2, для которой условия (б) и (в) выполняются.

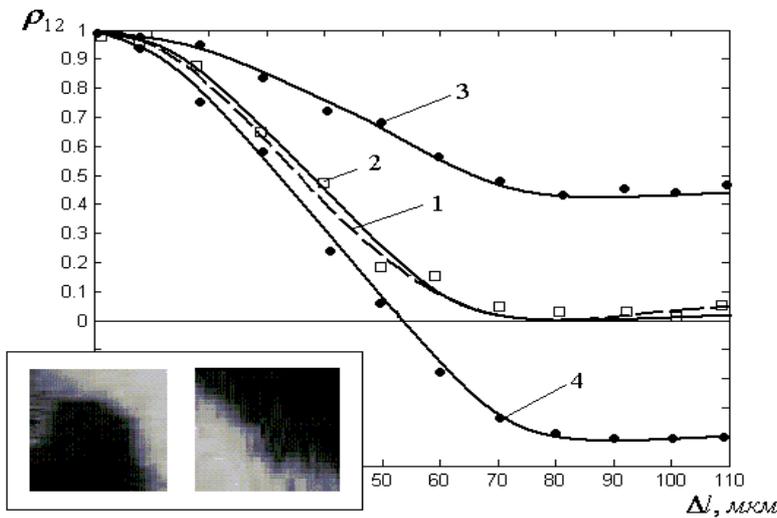


Рис. 3 Зависимость коэффициента корреляции от удлинения световода для световода с параметрами: числовая апертура 0,2, $\Delta n = 0,13$, диаметр сердцевины 50 мкм: 1 – кривая для коэффициента корреляции распределений интенсивности опорного и текущего спекл-сигналов на выходе волоконного световода, 2, 3, 4 – экспериментальные кривые, измеренные для сигналов ПЗС и полученные соответственно при $R = 1,3 R_0$, $R = 0,44 R_0$, $R = 0,11 R_0$. На врезке показан локальный фрагмент интерференционной картины до и после удлинения ВС на характерную величину Δl_0 .

В главе 1 показано, что случайная погрешность измерения величины аксиальной деформации многомодового ВС в составе одноволоконного многомодового интерферометра методом прямого измерения корреляционной функции спекл-сигналов определяется статистическими флуктуациями коэффициента корреляции при обработке данных об интенсивности световых полей ограниченной апертуры, что иллюстрируется приведенными на рис. 4 зависимостями $\rho_{12}(\Delta l)$, полученными при использовании различных опорных изображений. Установлено, что величина указанной погрешности не превышает 6% от характерного удлинения Δl_0 (рис. 4).

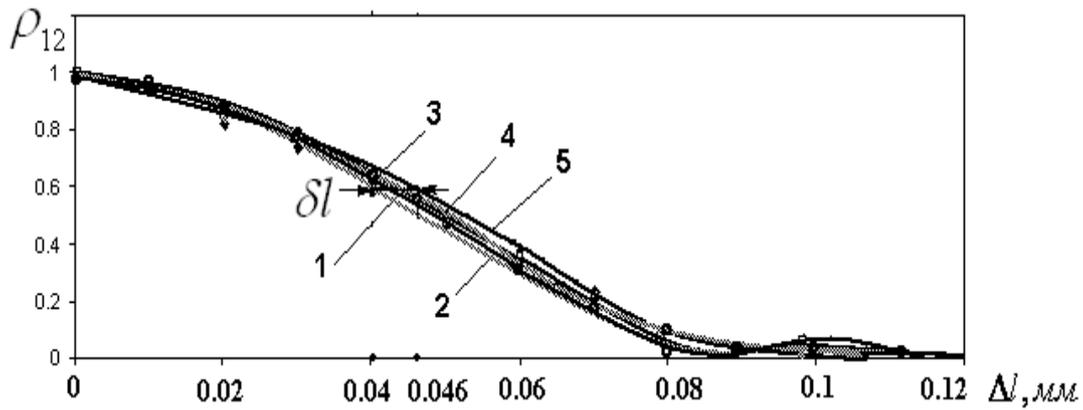


Рис. 4 Зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$, полученные при использовании различных опорных изображений. Из них зависимости 1, 2, 3, 4 получены непосредственно при аксиальном растяжении ВС; 5 – получена при растяжении, вызываемом прогибом натянутого ВС.

Дополнительным условием минимизации погрешности в случае волоконного световода, работающего в режиме возбуждения малого числа мод, является введение в схему ОМИ диффузора для рассеивания лазерного излучения на выходе волоконного световода. В случае прямого измерения корреляционной функции спекл-сигналов на выходе одноволоконного многомодового интерферометра, работающего в режиме возбуждения малого числа мод, без применения диффузного рассеивателя, погрешность значительно возрастает, и зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$ ведут себя как показано на рис. 5 (кривые 3 и 4).

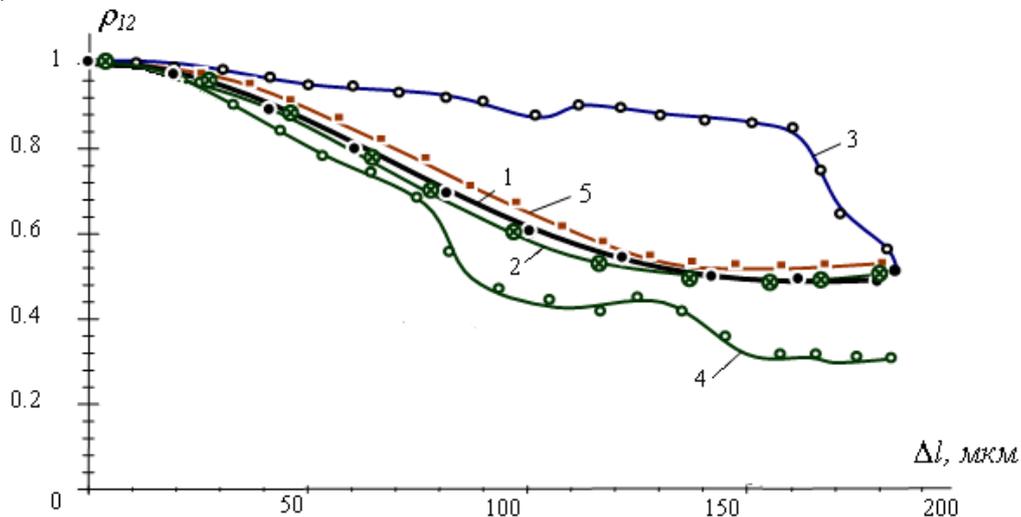


Рис. 5 Зависимость коэффициента корреляции от величины удлинения ВС в ОМИ, работающем в режиме возбуждения малого числа мод: 1, 2 – экспериментальные кривые, полученные при прохождении излучения через диффузный рассеиватель, 3, 4 – экспериментальные кривые, полученные без использования диффузора при непосредственном освещении ПЗС излучением световода, 5 – экспериментальная кривая, полученная при усреднении результатов большого числа измерений, выполненных без использования диффузора.

Заметно, что эти кривые имеют вид случайных функций, значения которых значительно отличаются друг от друга и варьируются в широком диапазоне. Это приводит к очень большой, до $0.5 \Delta l_0$, погрешности при определении величины удлинения ВС в ОМИ по данным корреляционных измерений. Для сравнения на этом же рисунке представлены кривые 1 и 2, полученные при тех же самых условиях, что, соответственно, зависимости 3 и 4, но с использованием диффузора. Видно, что они совпадают в пределах погрешности измерений. Таким образом, использование диффузного рассеивателя в схеме с ОМИ, работающим в режиме возбуждения малого числа мод, позволяет на порядок снизить абсолютную погрешность измерений удлинения волоконного световода в составе ОМИ от $0.5 \Delta l_0$ до $0.06 \Delta l_0$.

На рис. 5 представлена кривая 5, которая является результатом усреднения значений большого числа случайных функций для зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$, получаемых на выходе маломодового ВС без использования диффузора. Видно, что эта кривая очень близка к кривым 1 и 2. Таким образом, корреляционные характеристики рассеянного диффузором светового поля волоконного световода, работающего в режиме возбуждения малого числа мод, могут рассматриваться как результат усреднения соответствующих характеристик для множества неоднородных интерференционных полей, формируемых непосредственно ВС.

Показано, что температурная погрешность измерения относительного удлинения одноволоконного многомодового интерферометра определяется коэффициентом температурного расширения чистого кварца и равна $7.3 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Показано, что малый изгиб волоконного световода, не приводящий к связи между модами, не оказывает влияния на результат измерения удлинения ВС в составе одноволоконного многомодового интерферометра.

Разработан макет волоконно-оптического измерительного преобразователя параметров деформаций, в котором реализуется метод прямого измерения корреляционной функции спекл-сигналов одноволоконного многомодового интерферометра. Характеристики устройства составляют: погрешность измерений удлинения ± 3 мкм, динамический диапазон измерений 80 дБ, рабочая частота – до 25 Гц.

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованию физических принципов построения лазерных многоканальных волоконно-оптических измерительных систем, в том числе томографического типа, основанных на использовании одноволоконных многомодовых интерферометров и оптоэлектронной ПЗС системы обработки их спекл-сигналов, и предназначенных для мониторинга процессов деформации объектов.

Разработаны физические принципы построения многоканальной лазерной волоконно-оптической измерительной системы, основанных на использовании одноволоконных многомодовых интерферометров и оптоэлектронной ПЗС системы обработки их спекл-сигналов.

Установлено, что максимальное число каналов указанной системы ограничивается вследствие перекрестного влияния регистрируемых изображений спекл-картин и определяется величиной числовой апертуры волоконного световода в составе многомодового интерферометра, размером апертуры и разрешением матрицы ПЗС (рис. 6).

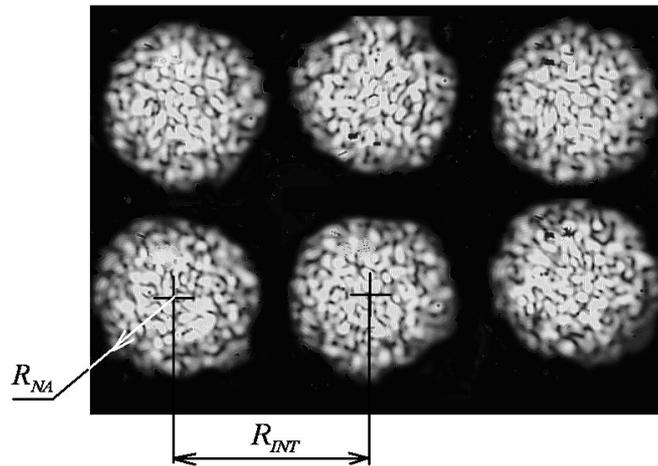


Рис. 6 Изображение спекл-картин, сформированных излучением 6 многомодовых ВС на поверхности ПЗС матрицы, R_{INT} - расстояние между центрами спекл-картин, R_{NA} - радиус спекл-картины.

В качестве числового параметра, характеризующего перекрестную помеху, может быть использован коэффициент взаимовлияния $\Delta\rho$, который уменьшается с ростом расстояния между соседними спекл-картинами как показано на рис. 7.

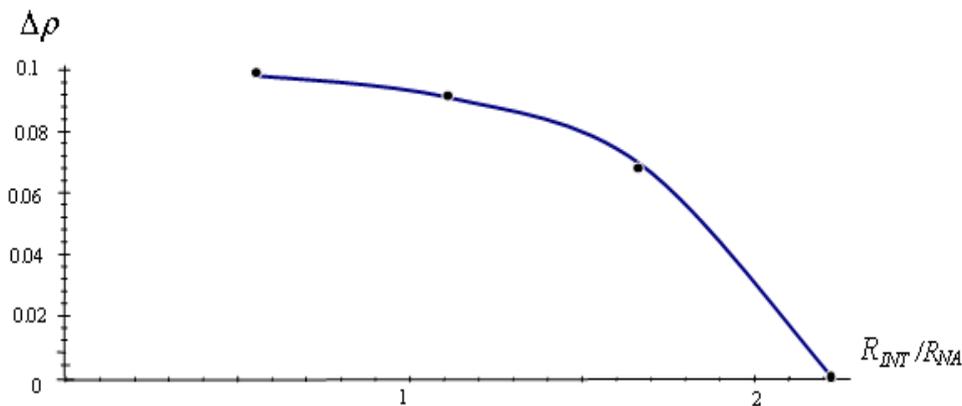


Рис. 7 Зависимость коэффициента взаимовлияния $\Delta\rho$ от расстояния между центрами изображений соседних спекл-картин.

Из представленных на рис. 7 данных видно, что перекрестная помеха становится пренебрежимо малой, когда $R_{INT} \approx 2,2R_{NA}$, где $R_{NA} = NA \cdot L_0$ - размер, определяемый числовой апертурой ВС, L_0 - расстояние от излучающего торца световода до плоскости фоточувствительной поверхности ПЗС. Исходя из этих данных, максимальное количество информационных каналов, одновременно обрабатываемых при помощи матрицы ПЗС с разрешением 640×480 пс, размером пикселя 12 мкм и для волоконного световода с параметрами числовая апертура 0.2, $\Delta l = 0.13$, диаметр сердцевины 50 мкм, оценивается в 12.

Время обработки данных измерительной системы не зависит от числа каналов и составляет 0.04 с, что равно времени обработки изображения спекл-картины одного многомодового волоконного световода.

Разработаны физические принципы построения лазерной многоканальной волоконно-оптической измерительной системы томографического типа для сбора дан-

ных о параметрах деформации объектов. Предложена топология расположения протяженных волоконно-оптических измерительных линий в форме петель различной длины, укладываемых вдоль выделенного направления на поверхности или в объеме исследуемого объекта (рис. 8).

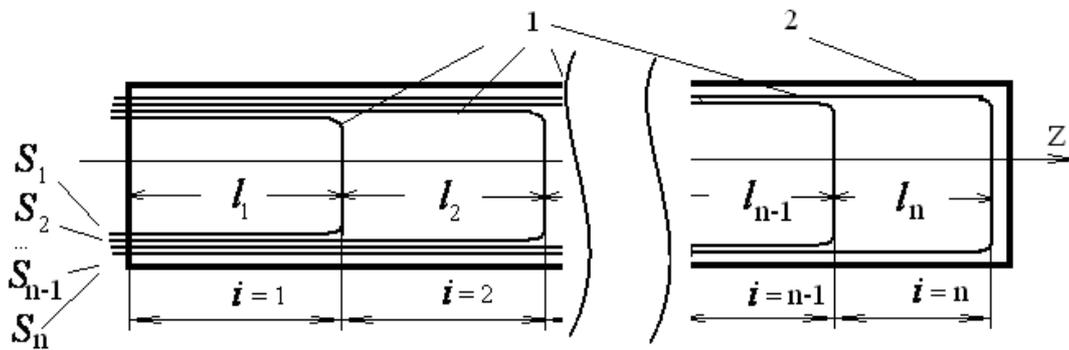


Рис. 8 Топология размещения волоконно-оптических измерительных линий (1) вдоль одной пространственной координаты Z на поверхности исследуемого объекта (2)

Разработаны математические методы и вычислительные пакеты для обработки массивов интегральных данных, получаемых одномерной лазерной волоконно-оптической измерительной системой томографического типа.

Показано, что распределение величины удлинения ОМИ $\Delta l_i(Z)$ вдоль продольной координаты Z (рис. 8) определяется при решении системы n - уравнений $S_n = \sum_{i=1}^n \Delta l_i$, где S_n - удлинение n -го световода в ОМИ, закрепленного на контролируемой поверхности, Δl_i - удлинение световода на i -м участке контролируемой поверхности (рис. 8).

Показано, что решение системы позволяет восстанавливать распределение аксиальной деформации контролируемого объекта вдоль единственной пространственной координаты. На рис. 9 продемонстрированы экспериментальные результаты восстановления пространственного распределения поля поперечных смещений упругой балки одномерной лазерной волоконно-оптической измерительной системой томографического типа.

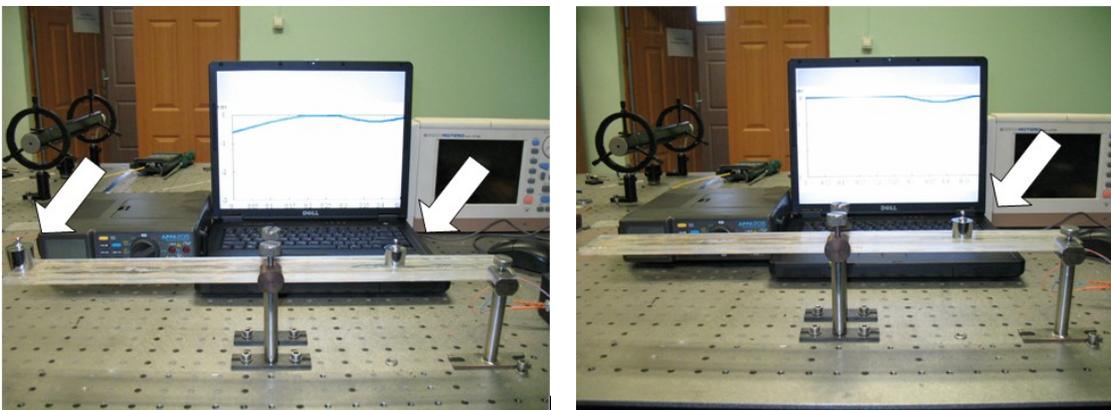


Рис. 9 Восстановление распределения поля деформации упругой балки (положение нагрузки указано стрелками)

В третьей главе настоящей работы изучены особенности измерения деформационных смещений диффузных объектов методом прямого измерения корреляционной функции спекловых сигналов с применением приборов с зарядовой связью, а также проводятся исследования поведения челюстно-лицевой костной ткани человека в режиме действия внешней нагрузки, эквивалентной жевательному процессу.

Показано, что зависимость коэффициента корреляции между текущим и опорным изображениями спеклового поля, формируемого при рассеянии лазерного излучения диффузными объектами, определяется согласно выражению

$$\rho(a) = \exp\left(-\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}} \frac{a}{a_0}\right)^2\right),$$

где a_0 - корреляционный радиус, равный среднему размеру

спекла, a - поперечное смещение диффузного объекта. В случае, когда смещение диффузного объекта меньше корреляционного радиуса, коэффициент корреляции оказывается достаточно высок и по его измеренному значению можно определять величину смещения.

Определены оптимальные условия регистрации ПЗС системами спекл-сигналов, полученных при рассеянии лазерного излучения диффузными объектами и установлено, что указанные условия аналогичны таковым в случае регистрации лазерного излучения, прошедшего через многомодовый волоконный световод в составе одноволоконного многомодового интерферометра.

Экспериментально продемонстрировано, что разработанный метод прямого измерения корреляционной функции спекл-сигналов многомодового ВС в составе одноволоконного многомодового интерферометра может быть применен и для измерения поперечных смещений диффузных объектов в диапазоне смещений, значительно превосходящих корреляционный радиус картины спеклового поля. Экспериментально установлено, что метод позволяет проводить неинвазивные измерения деформации челюстно-лицевой костной ткани в диапазоне нагрузок, имитирующих жевательный процесс с погрешностью 10 мкм.

На рис. 10 приведены экспериментальные кривые, полученные с использованием метода прямого измерения корреляционной функции спекл-сигналов и демонстрирующие деформационные смещения различных участков челюстно-лицевой костной ткани при различных значениях действующей нагрузки.

Продемонстрирована возможность применения метода прямого измерения корреляционной функции спекл-сигналов, получаемых при рассеянии лазерного излучения диффузными объектами, для количественной оценки условий работы различных видов протезов и оптимизации их конструкций.

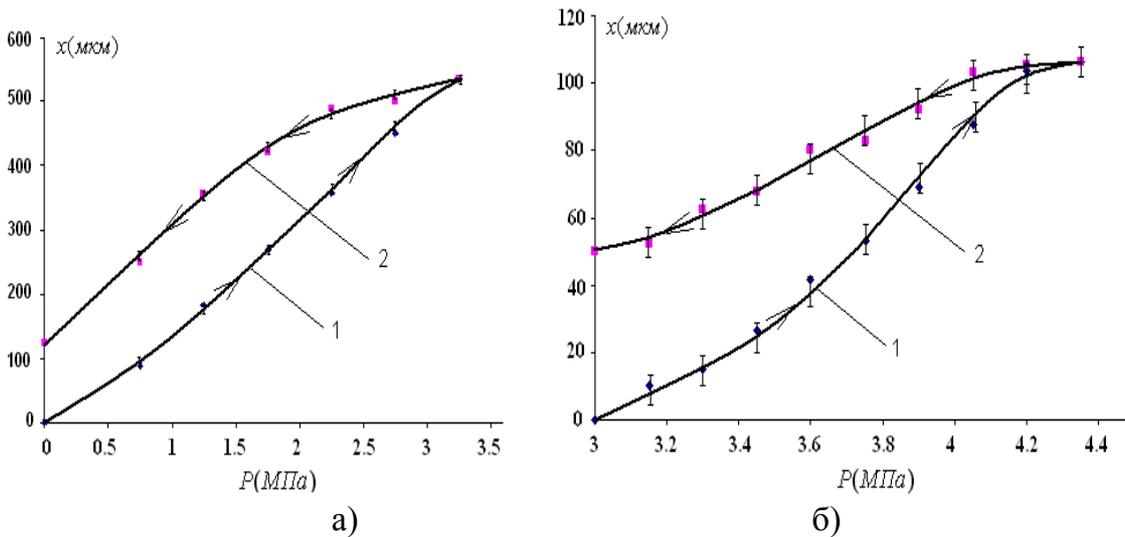


Рис. 10 Зависимость смещения анатомического препарата от величины прикладываемой нагрузки: а) 1 и 2 – зависимости $a(P)$, полученные, соответственно, при увеличении и уменьшении нагрузки на группу зубов с обозначением $|2345$; б) 1 и 2 – зависимости $a(P)$, полученные, соответственно, при увеличении и уменьшении нагрузки на группу зубов с обозначением $|2345$.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Установлено, что статистические и корреляционные свойства измеренных оптоэлектронными ПЗС системами сигналов о пространственном распределении интенсивностей спекл-модулированных световых волн зависят от режима работы прибора с зарядовой связью, используемого для их регистрации. Соответствие свойств исходных и регистрируемых спекл-сигналов достигается при обеспечении оптимального режима регистрации спекл-сигналов ПЗС.

Оптимальные условия регистрации спекл-сигналов ПЗС заключаются в следующем:

- расстояние L между формирующим спеклы объектом и ПЗС должно удовлетворять условию $-\frac{D}{\lambda}\delta_{nc} \ll L \ll \frac{D}{\lambda}\Delta_{ПЗС}$ (где D - это диаметр светового пучка, формирующего спеклы, L - расстояние от объекта до плоскости наблюдения, λ - длина волны излучения, δ_{nc} - поперечные размеры элемента матрицы ПЗС, $\Delta_{ПЗС}$ - размеры светочувствительной площадки ПЗС).

- статистический параметр распределения интенсивности света в регистрируемой спекл-картине \bar{X}/X_{max} (где \bar{X} - среднее зарегистрированное значение интенсивности, X_{max} - максимальное значение зарегистрированной интенсивности) не превышает 0.15.

- оптимальный радиус регистрируемой спекл-картины, формируемой многомодовым волоконным световодом лежит в пределах $R_o/3 \div R_o$, (где R_o - радиус участка спекл-картины, в пределах которого ПЗС матрицей регистрируется 80% световой мощности).

2. Показано, что оптимальный режим регистрации обеспечивает проведение измерений коэффициента корреляции распределений интенсивностей полей в случае трансляции и кипения спеклов, соответственно, обусловленных поперечными смещениями диффузных объектов и аксиальной деформацией волоконных световодов.

3. Установлено, что в случае кипения спеклов, вызываемого удлинением многомодового волоконного световода, характерная величина Δl_0 удлинения ВС, определяющая декорреляцию начального и текущего пространственных распределений интенсивностей спекловых полей, не совпадает с корреляционным радиусом a_0 при трансляции спекл-картин, не зависит от размеров спеклов, а определяется длиной волны источника, дисперсионными и механическими параметрами световодов в соответствии с полученными в настоящей работе соотношениями.
4. Показано, что статистические флуктуации коэффициента корреляции интенсивностей световых полей ограниченной апертуры определяют минимальное значение погрешности измерения аксиальной деформации многомодового волоконного световода. Данное значение не превышает 6% от характерной величины Δl_0 в случае удлинения волоконного световода, и достигается при соблюдении оптимальных условий регистрации лазерного излучения приборами с зарядовой связью. Дополнительным условием минимальной погрешности для случая работы волоконного световода в режиме возбуждения узкого модового спектра является применение диффузора для рассеивания излучения на выходе волоконного световода. Температурная погрешность измерения относительного удлинения многомодового волоконного световода близка к коэффициенту температурного расширения чистого кварца и равна $7.3 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.
5. Последовательная перезапись опорных сигналов о пространственном распределении интенсивности спекл-модулированных волн позволяет проводить измерения величин удлинений многомодовых волоконных световодов, значительно превышающие характерную величину Δl_0 , а так же позволяет устанавливать направление деформации.
6. На основе разработанного метода обработки случайно-неоднородных спекловых полей рассеянного лазерного излучения оптоэлектронными ПЗС системами разработаны и исследованы макеты конструкций волоконно-оптических измерительных преобразователей для измерения параметров продольной и поперечной деформации объектов в статическом и динамическом режимах. Показано, что макеты обеспечивают в частотном диапазоне 0÷25 Гц измерение величины смещений деталей механизмов при их возвратно-поступательном движении с точностью ± 3 мкм в диапазоне 0÷50 мм и величины смещения элементов биологического препарата челюсти человека с точностью ± 10 мкм в диапазоне 0÷7 мм. Экспериментально определены величины поперечных деформационных смещений и остаточных деформаций в челюстно-лицевых костях человека для различных участков челюстно-лицевой костной ткани в случае приложения нагрузки, имитирующей жевательную.
7. Разработаны физические принципы построения многоканальной лазерной волоконно-оптической измерительной системы, основанной на использовании одноволоконных многомодовых интерферометров и оптоэлектронной ПЗС системы обработки их спекл-сигналов. Определено максимальное число измерительных каналов такой системы в зависимости от числовой апертуры используемого многомодового волоконного световода, размеров апертуры и разрешения матрицы ПЗС. Разработаны алгоритмы и программные пакеты для обработки выходных сигналов многоканальной лазерной волоконно-оптической измерительной системы.
8. Разработаны физические принципы построения и топология одномерной лазерной волоконно-оптической измерительной системы томографического типа для сбора данных о параметрах деформации объектов. Разработаны математические методы и

вычислительные пакеты для обработки массивов получаемых ею интегральных данных. Экспериментально продемонстрировано восстановление пространственного распределения поля поперечных смещений упругой балки.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих печатных работах:

1. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.Д. Ланцов. [Корреляционный метод обработки спекловой картины сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров с использованием приборов с зарядовой связью](#) // Квантовая Электроника - 2006. Т. 36, № 4. – С. 339 – 342.
2. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.Д. Ланцов, Корреляционная обработка сигналов одноволоконного многомодового интерферометра в режиме возбуждения малого числа мод при измерениях деформационных воздействий // Квантовая Электроника - 2008. Т. 38, № 1. – С. 56 – 58.
3. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.Д. Ланцов, В.А. Воробьев, Ю.Н. Москвин. Спекл-корреляционный метод измерения величины деформации челюстно-лицевой костной ткани // Автометрия – 2008. Т. 44, №3. – С. 99 – 105.
4. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.Д. Ланцов, Одномерная томографическая волоконно-оптическая измерительная система на основе одноволоконных многомодовых интерферометров // Фотон-экспресс – 2007. Т.6, № 62. – С. 50 – 51.
5. Yu. N. Kulchin, O. B. Vitrik, A.D. Lantsov, V.A. Vorobiev, Yu.N. Moskvin Speckle-Correlation Method for Measuring Maxillofacial Bone Tissue Deformations // Pacific Science Review – 2006. – Vol.8 (1) – p. 1 – 5.
6. Yu. N. Kulchin; O. B. Vitrik; A. D. Lantsov, Correlation method of processing single fiber multimode interferometer (SFMI) signals using a charge coupled device // Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics III, SPIE Proc., Vol. 6595 – 2006
7. Yu. N. Kulchin; O. B. Vitrik; A. D. Lantsov, Processing of the signals of the single-fiber intermode interferometer with a small number of excited modes by using an electronic correlation method // Optical Modeling and Performance Predictions III, SPIE Proc., Vol. 6675 – 2007
8. Yu. N. Kulchin; O. B. Vitrik; A. D. Lantsov, Processing of the signals of the single-fiber intermode interferometer with a small number of excited modes // Key Engineering Materials, Trans Tech Publications Ltd., Vols. 381-382, p. 627 – 630 – 2007
9. Yu. N. Kulchin; O. B. Vitrik; A. D. Lantsov, One-dimensional tomographic fiber-optic measuring system based upon single fiber multimode interferometers // Remote Sensing System Engineering, SPIE Proc., Vol. 7087 – 2008
10. Ю.Н. Кульчин, О.Б. Витрик, А.Д. Ланцов, Особенности организации 1-D томографических исследований на основе одноволоконных многомодовых интерферометров // Инновационные технологии в повышении надежности и долговечности строительных конструкций: материалы международной науч.-техн. конф., посв. 85-летию со дня рождения проф. П. П. Ступаченко - Владивосток: Изд-во ДВГТУ. – С. 22 – 24. 2008

Личный вклад автора: Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично.