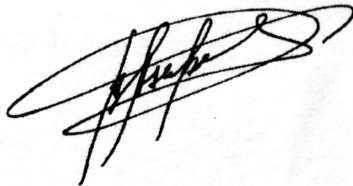


Лазарев Владимир Алексеевич

**БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ
И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ
БРЭГГОВСКИХ ДАТЧИКОВ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем

Научный руководитель –

Карасик Валерий Ефимович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Дмитриев Сергей Александрович,
доктор технических наук,
председатель совета директоров ЗАО «Лазер
Солюшенс»

Крылов Александр Анатольевич,
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник ФГБУН Научный центр
волоконной оптики РАН

Ведущая организация –

ОАО «Научно-производственное объединение
Геофизика-НВ», г. Москва

Защита диссертации состоится «29» мая 2013 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «__» апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Е.В. Бурый



2175

ака уик

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

За последнее десятилетие отмечается стремительное развитие производственной и социальной инфраструктуры. В связи с этим всё чаще возникает задача контроля параметров таких инфраструктурных объектов и сооружений, как мосты, тоннели, трубопроводы, гражданские и промышленные здания различного назначения. Одними из основных параметров таких объектов, подлежащих измерению, являются механическая деформация и температура. Своевременное обнаружение достижения указанными параметрами критических значений позволяет предотвратить возникновение аварийных ситуаций или катастроф.

Для решения указанной задачи применяют различные датчики. До недавнего времени основным типом датчиков для измерения механической деформации и температуры были тензодатчики, пьезодатчики, терморезисторы и др. Однако благодаря интенсивному развитию волоконной оптики были разработаны и получают всё большее распространение волоконно-оптические датчики, обладающие рядом преимуществ по сравнению с тензодатчиками: более высокой чувствительностью, помехозащищенностью и устойчивостью к воздействиям агрессивных сред, а также меньшей стоимостью. Среди волоконно-оптических датчиков перспективными являются квазираспределённые волоконно-оптические датчики на основе брэгговских решёток (далее – брэгговские датчики), позволяющие контролировать состояние объекта во многих точках одновременно благодаря возможности спектрального и временного мультиплексирования.

Разработка методов измерения деформации и температуры с использованием волоконно-оптических датчиков и работы по созданию систем измерения на их основе ведутся во многих научных организациях и научно-производственных компаниях как в России, так и за рубежом. Стоит отметить основополагающие работы А. Керсея в США и Б. Кулшоу в Великобритании, М. Дигонне в Стенфордском университете. В России данной тематике посвящены работы О.И. Медведкова и С.А. Васильева в НЦВО РАН, Ю.Н. Кульчина в ДВО РАН, группы микроволновой плазмохимии для фотоники ИРЭ РАН, лаборатории волоконной оптики Института автоматики и телеметрии СО РАН, лаборатории ФГУП «ВНИИОФИ» под руководством С.В. Тихомирова. Измерительные системы на основе брэгговских датчиков успешно реализованы компаниями “SmartFibers“, “OceanOptics“, отечественными компаниями “Опторекс“, “СибСенсор“, «Мониторинг-Центр», «Телеком-прибор».

И. П. З. БАУМАНС
БИБЛИОТЕКА

Серийно выпускаемые измерительные системы, предназначенные для опроса брэгговских датчиков, обладают одним весьма существенным недостатком – низким быстродействием, обусловленным существующими методами получения информации о состоянии брэгговских датчиков с использованием перестраиваемых по длине волны элементов. Указанный недостаток не позволяет использовать эти системы для контроля

быстропротекающих процессов. В то же время задача мониторинга таких процессов становится всё более актуальной вследствие возрастающей значимости непрерывного контроля параметров объектов инфраструктуры. В современных условиях часто возникает задача контроля деформаций, изменяющихся с частотами до 5 кГц. Прежде всего, это область авиастроения, в которой необходимо проводить контроль корпусных элементов летательных аппаратов, подверженных длительным высокочастотным нагружениям и климатическим воздействиям. Широкое применение волоконно-оптических датчиков обусловлено активным внедрением в сферу авиастроения композиционных материалов, обладающих высокой коррозионной стойкостью, прочностью, малой массой. Однако композиционные материалы подвержены многим видам повреждений: появлению трещин, нарушению структуры, расслоению и т. д. Всё это может стать причиной аварийно-опасных ситуаций и катастроф. Усугубляет ситуацию также сложность своевременного выявления этих повреждений. Поэтому разработка метода высокоскоростного получения информации от брэгговских датчиков деформации и температуры без использования перестраиваемых элементов, который позволит создать быстродействующую систему измерения деформации и температуры объектов и сооружений, является актуальной и перспективной научно-технической задачей.

Цель работы и задачи исследований

Цель диссертационной работы заключалась в разработке и исследовании метода получения информации от брэгговских датчиков деформации и температуры, позволяющего создать быстродействующую систему мониторинга элементов конструкций различных объектов инфраструктуры.

Указанная цель достигнута в результате решения в диссертации следующих задач:

- разработки метода высокоскоростного получения информации от брэгговских датчиков деформации и температуры;
- синтеза математической модели системы измерения деформации и температуры с целью проведения анализа процесса преобразования сигналов;
- разработки метода калибровки по шкале длин волн системы измерения деформации и температуры;
- создания методики исследований метрологических характеристик системы измерения, а также методики расчета ее основных параметров;
- разработки методики получения независимых оценок деформации и температуры, основанный на применении многорешётчатых брэгговских датчиков;
- создания макета системы измерения деформации и температуры, реализующего разработанный метод получения информации от брэгговских датчиков деформации и температуры;
- проведения лабораторных испытаний созданного макета быстродействующей системы измерения деформации и температуры с целью проверки основных теоретических положений и расчетных соотношений.

Объектом исследования является быстродействующая система измерения деформации и температуры объектов и сооружений на основе волоконно-оптических брэгговских датчиков.

Предметом исследования является метод высокоскоростного получения информации от брэгговских датчиков деформации и температуры.

Методы исследований

При решении теоретических и прикладных задач были использованы: теория линейных систем, метод волновых функций Блоха, методы теории вероятностей и математической статистики, методы математического моделирования.

Научная новизна исследований

В процессе проведения исследований были получены новые научные результаты теоретического и прикладного характера:

- разработан метод высокоскоростного получения информации от брэгговских датчиков деформации и температуры, позволяющий создать быстродействующую систему измерения с минимальным интервалом между двумя последовательными измерениями $0,2 \cdot 10^{-3}$ с;

- разработана структурно-функциональная схема быстродействующей системы измерения деформации и температуры на основе брэгговских датчиков и создана её математическая модель, описывающая процесс преобразования сигналов;

- разработан метод калибровки системы измерения деформации и температуры, позволяющий достичь минимальной погрешности измерений длины волны излучения, отражённого от брэгговских датчиков, порядка $1 \cdot 10^{-12}$ м;

- предложена методика получения независимых оценок деформации и температуры на основе многорешётчатых брэгговских датчиков, позволяющая реализовать одновременное измерение деформации и температуры;

- результаты лабораторных испытаний созданного макета быстродействующей системы измерения, подтвердившие полученные в работе теоретические положения и расчетные соотношения.

Положения, выносимые на защиту

- метод регистрации спектра излучения, отраженного от брэгговских датчиков, с использованием широкополосного источника излучения позволяет, отказавшись от применения перестраиваемых по длине волны элементов, реализовать быстродействующую систему измерения деформации и температуры с минимальным интервалом между двумя последовательными измерениями $0,2 \cdot 10^{-3}$ с;

- метод калибровки системы измерения деформации и температуры, основанный на применении брэгговской решётки и волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо, позволяет достичь погрешности измерений длины волны излучения, отражённого от брэгговских датчиков, не хуже $1 \cdot 10^{-12}$ м, что позволяет получать оценки деформации с погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-3} \%$ и оценки температуры с погрешностью не хуже 1°C .

- методика получения независимых оценок деформации и температуры, основанная на применении многорешётчатых брэгговских датчиков, состоящих

из двух брэгговских решеток и одной длиннопериодной решётки с разными передаточными характеристиками по деформации и температуре, позволяет проводить измерения деформации и температуры одновременно.

Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в использовании полученных результатов для повышения технических и метрологических характеристик систем измерения деформации и температуры на основе брэгговских датчиков. Разработанный метод получения информации о состоянии брэгговских датчиков деформации и температуры позволяет создать систему мониторинга быстропротекающих процессов.

Предложенная методика расчёта системы измерения деформации и температуры, а также методика исследований метрологических характеристик системы измерения может быть использована при расчёте точностных и технических характеристик таких систем.

Разработанная методика получения независимых оценок деформации и температуры на основе многорешётчатых брэгговских датчиков позволяет создать систему измерений для высокоточного контроля деформации различных инфраструктурных объектов, находящихся в жестких климатических условиях с резко изменяющимся температурным фоном.

Предложенный метод калибровки системы измерения деформации и температуры с помощью встроенного калибратора на основе интерферометра Фабри-Перо и брэгговской решётки может быть использован для уменьшения погрешности систем измерения деформации и температуры.

Реализация и внедрение результатов исследований

Результаты диссертации внедрены на предприятиях: ФГУП «ВНИИОФИ», ОАО «НИИГрафит», ОАО «НИАТ». Материалы диссертации использованы в учебном процессе кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана в лабораторных работах по дисциплине «Интегральная и волоконная оптика».

Реализация результатов работы подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертации докладывались на научно-технических конференциях и семинарах:

- на научно-технической конференции «Радиооптические технологии в приборостроении» (г. Туапсе) в 2007 г.;
- на 5-й Межвузовской конференции молодых ученых (СПбГУ ИТМО, г. Санкт-Петербург) в 2008 г.;
- на конференции «Фотометрия и её метрологическое обеспечение» (ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва) в 2008 г.;
- на Всероссийской конференции по волоконной оптике (г. Пермь) в 2009 г.;
- на международной конференции «International OSA Network of Students – IONS-8 Moscow» (г. Москва) в 2010 г.;
- на международной научно-технической конференции «Лазеры в науке, технике, медицине» (г. Геленджик) в 2011 г.;

- на международном симпозиуме «Optics and its applications» (Ереванский государственный университет, Армения) в 2011 г.;
- на международной конференции «International OSA Network of Students: North America Conference IONS-NA-3» (Стенфордский университет, США) в 2011 г.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 статьях в центральных научно-технических журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ. На разработанные способы и устройства для измерения деформации и температуры на основе брэгговских датчиков получены 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов и списка литературы, включающего 107 наименований. Общий объем работы – 185 страниц машинописного текста, включая 73 рисунка и 43 таблицы.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность. Приведена структура диссертации, формы апробации и реализации результатов.

В первой главе проведены обзор и классификация существующих методов измерения деформации и температуры и дан сравнительный анализ традиционных датчиков на основе пьезоэлектрического эффекта и волоконно-оптических датчиков. По результатам анализа показана перспективность использования брэгговских датчиков, выявлены их основные преимущества, связанные с нечувствительностью к внешним воздействующим факторам, помехозащищенностью, пассивностью и низкими массогабаритными показателями.

Проведено исследование передаточной характеристики брэгговских датчиков, определяющей зависимость длины волны отраженного излучения от деформации и температуры

$$\Phi_{FBG} = \left(\frac{\lambda_{FBG}(1 - p_{e1})}{\lambda_{FBG}(\alpha_A + \alpha_n)} \right),$$

где p_{e1} – константа деформации оптического волокна; α_A и α_n – температурный коэффициент линейного расширения и термооптический коэффициент соответственно. Сдвиг брэгговской длины волны излучения, отраженного от брэгговской решетки, можно представить следующим образом:

$$\Delta\lambda_{FBG} = (\varepsilon_z \quad \Delta T) \begin{pmatrix} \lambda_{FBG}(1 - p_{e1}) \\ \lambda_{FBG}(\alpha_A + \alpha_n) \end{pmatrix},$$

где ε_z – величина деформации; ΔT – изменение температуры.

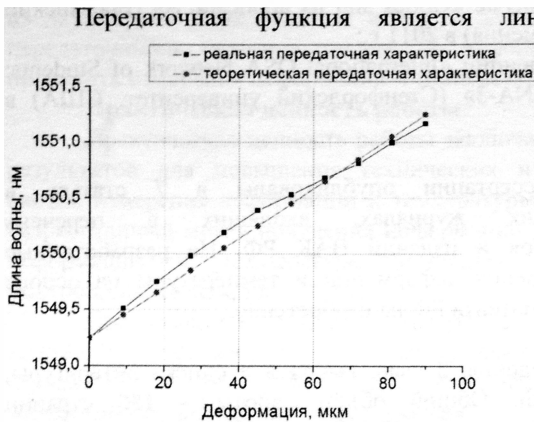


Рисунок 1. Реальная и теоретическая передаточные характеристики брэгговского датчика

Передаточная функция является линейной и определяется только физическими параметрами брэгговской решетки. Однако необходимо отметить, что при изготовлении брэгговского датчика используются специальные клеевые соединения, металлические конструкции, полимерные и композиционные материалы, обладающие упругими свойствами, что приводит к возникновению нелинейной составляющей передаточной характеристики брэгговского датчика. На рисунке 1 представлена измеренная передаточная характеристика в

сравнении с теоретической. Показано, что погрешность измерения деформации, вызванная нелинейностью передаточной характеристики, может достигать 12 %. Сделан вывод о необходимости устранения влияния нелинейности передаточной характеристики на результат измерений путем проведения калибровки датчиков по шкале деформации, предложен метод калибровки с использованием датчика наноперемещений и эталонного измерителя длины волны.

На основе метода волновых функций Блоха проведено исследование зависимости спектра отраженного излучения от механической деформации или температуры. Получены аналитические зависимости для результирующего поля прямой и обратной волн, распространяющихся вдоль оси z , как суммы волн Блоха с соответствующими постоянными распространения и весами:

$$E^+(z) = \exp\left(-j\frac{H}{2}z\right) \sum_{m=1}^{4N+2} a_m \{A_{-N}^{(m)} \exp(-j(\gamma_m - Ng)z) + \dots + A_N^{(m)} \exp(-j(\gamma_m + Ng)z)\},$$

где H — волновое число, характеризующее изменение диэлектрической проницаемости в брэгговской решетке, $A_{-N}^{(m)}, \dots, A_N^{(m)}$ — амплитуды функций Блоха, γ_m — собственные значения волнового уравнения, g — расстояние между спектральными компонентами поля, описываемыми волнами Блоха, N — число спектральных компонент поля, a_m — коэффициенты разложения в ряд по функциям Блоха, получаемые из граничных условий, $M = 4N + 2$ — число собственных значений волнового уравнения.

Аналогично можно записать поле встречной волны $E^-(z)$. Коэффициент отражения решётки определяется выражением

$$r(\delta) = \frac{E^-(z_0)}{E^+(z_0)},$$

где $\delta = \frac{\bar{n}}{c}(\omega - \omega_{\text{Бр}\bar{e}})$ — частотная расстройка, ω — частота падающего излучения,

$\omega_{\text{Бр}}$ – брэгговская частота решетки, $\bar{n}$ – среднее значение показателя преломления решетки.

С помощью рассмотренного метода проведен расчет дисперсионных и спектральных характеристик применительно к однородным брэгговским решеткам (с равномерным периодом). В этом случае коэффициент связи $q(z)$, определяющий вызванное решёткой взаимодействие падающей и отраженной волн, является константой

$$q(z) = \frac{\pi}{\lambda} \frac{\Delta\epsilon}{2},$$

где $\Delta\epsilon$ – амплитуда модуляции диэлектрической проницаемости решетки. Дисперсионная картина в этом случае определяется двумя собственными значениями

$$\gamma_{1,2} = \pm \sqrt{\delta^2 - q^2}.$$

На рисунке 2 представлена диаграмма дисперсии решетки.



Рисунок 2. Диаграмма дисперсии брэгговской решетки

Из предыдущего выражения следует, что если расстройка частоты падающего излучения находится в интервале $-q < \delta < q$, то собственные значения γ становятся мнимыми. В этом случае большая часть падающего излучения отражается, так как брэгговская решётка не поддерживает распространение волн. Отрезок $|\delta| \leq q$ представляет собой фотонную запрещённую зону. На рисунке 3 представлен коэффициент отражения, рассчитанный для равномерной брэгговской решетки.

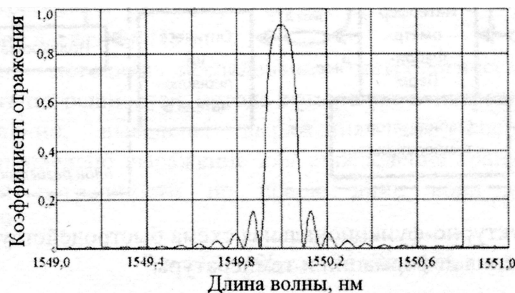


Рисунок 3. Коэффициент отражения брэгговской решетки

Рассмотрены методы изготовления брэгговских решёток. Показано, что метод фазовой маски с использованием фемтосекундного лазера является самым перспективным и позволяет изготавливать брэгговские решётки с повышенным сроком службы. Отмечена стабильность параметров таких решеток при их отжиге в течение 1 000 часов при температуре 1 000 °С.

Проведён сравнительный анализ методов получения информации от брэгговских датчиков деформации и температуры. Показаны преимущества схемы полихроматора, реализующей метод регистрации спектра без применения перестраиваемых элементов, что позволяет создать быстродействующую систему измерения деформации и температуры.

Во второй главе разработана структурно-функциональная схема многоканальной быстродействующей системы измерения деформации и температуры на основе брэгговских датчиков, реализующая метод регистрации спектра без использования перестраиваемых элементов. Структурно-функциональная схема, построенная с использованием графового представления, изображена на рисунке 4. Излучение широкополосного источника – суперлюминесцентного диода – проходит через оптический изолятор, систему оптических разветвителей и переключатель и попадает на измерительную линию с брэгговскими датчиками. Отраженное от датчиков излучение направляется в блок регистрации, затем измерительная информация отображается на экране ЭВМ. Особенностью предложенной схемы является применение полихроматора и многоэлементного ФПУ, что позволяет реализовать метод регистрации спектра без применения перестраиваемых элементов и проводить измерение оптических сигналов со всех датчиков каждой измерительной линии одновременно.

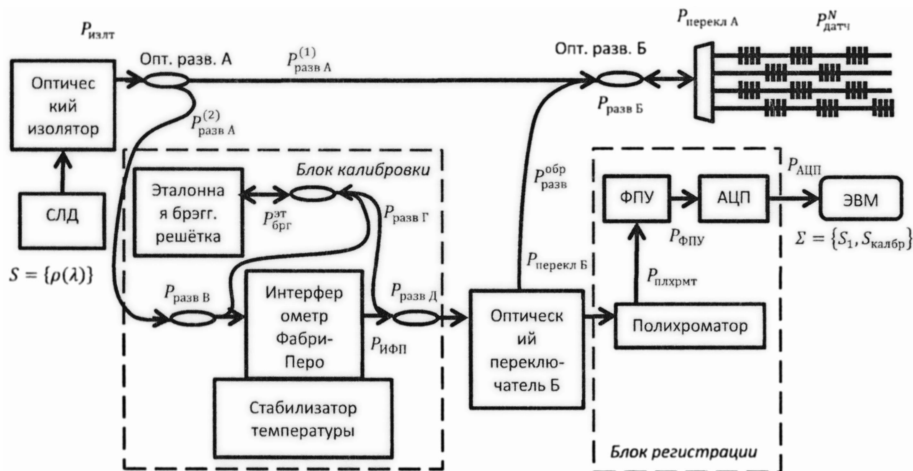


Рисунок 4. Структурно-функциональная схема быстродействующей системы измерения деформации и температуры

В схеме реализован оригинальный метод калибровки полихроматора с использованием волоконного интерферометра Фабри-Перо и встроенной эталонной брэгговской решетки. Калибровочный сигнал представляет собой сумму спектра пропускания интерферометра Фабри-Перо и спектра отражения брэгговской решетки. С заданной периодичностью к блоку регистрации подключается блок калибровки, происходит регистрация калибровочного спектра и пересчет шкалы длин волн.

На основе разработанной структурно-функциональной схемы синтезирована математическая модель многоканальной быстродействующей системы измерения деформации и температуры на основе брэгговских датчиков. Математическая модель разработана на основе структурной теории модельного синтеза с использованием аппарата математических структур. Для описания процесса преобразования сигналов задано множество входных сигналов в виде спектральной плотности мощности широкополосного источника, множество выходных сигналов в виде оцифрованных сигналов, поступающих в ЭВМ. Заданы внешние параметры в виде деформации и температуры, воздействующие на брэгговские решетки. Поведение каждого элемента системы описано преобразующим оператором.

На основе разработанной математической модели быстродействующей системы измерения создана методика расчета быстродействующей системы измерения деформации и температуры. На основе разработанной методики создан алгоритм расчёта быстродействующей системы измерения. В предположении преобладания шумов положки ФПУ, обусловленных неравномерностью чувствительности его элементов, получено выражение для оценки минимального времени усреднения сигналов

$$\tau_{int} \geq \frac{\tau_{сист} \cdot e^{-(\alpha+\eta)l} \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} [(\rho(\lambda)R(\lambda)) \otimes K(\lambda)] S_{фпу}(\lambda) d\lambda}{\mu_{треб} \sqrt{B_{фпу}}},$$

где $\tau_{сист}$ – суммарные потери оптической системы, α – показатель ослабления в волоконном световоде, l – суммарная длина волоконного световода, η – суммарные потери в оптических разветвителях и переключателях, $\Delta\lambda$ – эффективный спектральный диапазон полихроматора, $K(\lambda)$ – аппаратная функция полихроматора, $R(\lambda)$ – коэффициент отражения брэгговской решётки, $B_{фпу}$ – характеристика шума подложки ФПУ, $S_{фпу}$ – чувствительность ФПУ, $\mu_{треб}$ – требуемое отношение сигнал/шум, $P_{эл}$ – мощность излучения, падающая на один элемент ФПУ.

Разработана методика исследования метрологических характеристик. Проведён анализ погрешностей метода измерения и погрешностей от действия влияющих величин, выведены выражения для оценки составляющих погрешностей, приведено выражение для определения границы неисключённой систематической погрешности по шкале длин волн при доверительной вероятности 0,99

$$\theta = \pm 1,4 \cdot \sqrt{\theta_{калиб}^2 + \theta_T^2 + \theta_{алг}^2 + \theta_{АЦП}^2},$$

где $\theta_{калиб}$ – погрешность системы калибровки, θ_T – погрешность вследствие

температурного смещения и дефокусировки, $\theta_{\text{алг}}$ – погрешность алгоритма определения максимума в спектре отраженного излучения, $\theta_{\text{АЦП}}$ – погрешность квантования сигналов в АЦП.

Суммарная погрешность по шкале длин волн определяется выражением

$$S_x = \sqrt{S^2 + \frac{1}{3}(\theta_{\text{калиб}}^2 + \theta_{\text{алг}}^2 + \theta_{\text{АЦП}}^2)},$$

где S – случайная погрешность метода и средств измерений длины волны. Приведены выражения для определения стандартной неопределённости по типу А и В.

Разработана методика получения независимых оценок деформации и температуры на основе многорешётчатых брэгговских датчиков, позволяющая одновременно измерять деформацию и температуру. В основе методики – использование гибридного многорешётчатого датчика, содержащего две брэгговские решётки и одну длиннопериодную брэгговскую решетку.

Принцип действия заключается в различном отклике брэгговских решёток на воздействие деформации и температуры и последующем пересчёте деформации и температуры по сдвигам спектров отражения решёток. На рисунке 5 приведен спектр отражения гибридного датчика при различных значениях температуры T и деформации ε . Сдвиг спектра длиннопериодной решетки будет вызывать изменение коэффициентов отражения R_1 и R_2 от брэгговских решеток.

Для анализа отраженных сигналов вычисляется функция $F(R_1, R_2)$

$$F(R_1, R_2) = \frac{\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2}}{\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2}},$$

тогда изменение температуры и деформации $\Delta\varepsilon$ и ΔT можно найти следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta\lambda \end{bmatrix},$$

где A , B , C , и D – температурные и деформационные коэффициенты, $\Delta\lambda$ – изменение длины волны излучения, отраженного от одной из решеток.

В третьей главе приведены результаты лабораторных испытаний макета быстродействующей многоканальной системы измерения деформации и температуры. Создан макет быстродействующей системы измерения деформации и температуры, внешний вид которого представлен на рисунке 6.

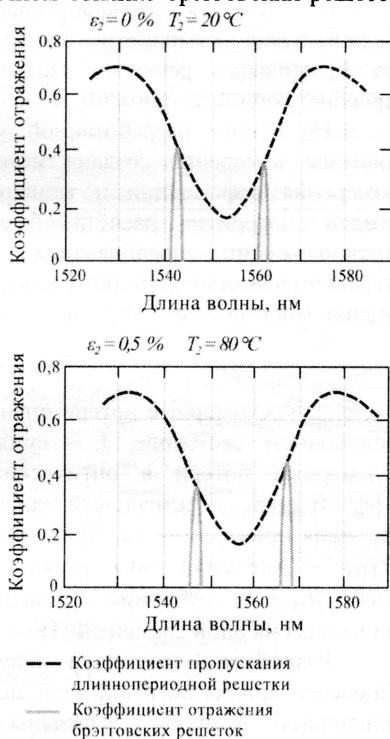
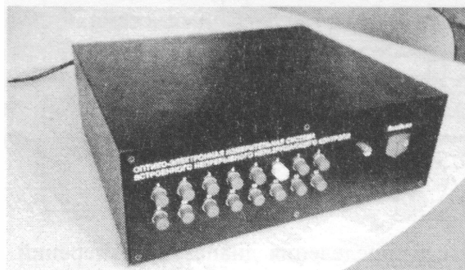
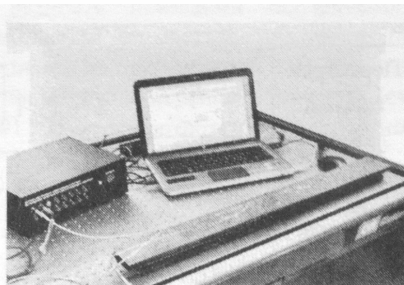


Рисунок 5. Спектр излучения, отраженного от гибридного много-решётчатого датчика



а)



б)

Рисунок 6. Внешний вид макета системы измерения (а) и система измерения, подключенная к датчикам, встроенным в балку из полимерного композиционного материала (б)

Стенд для исследований рабочего спектрального диапазона и абсолютной погрешности по шкале длин волн разработан в ФГУП «ВНИИОФИ» при участии автора на основе государственного первичного специального эталона (ГСЭ) единицы длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации ГЭТ170-2011. Структурная схема стенда представлена на рисунке 7.

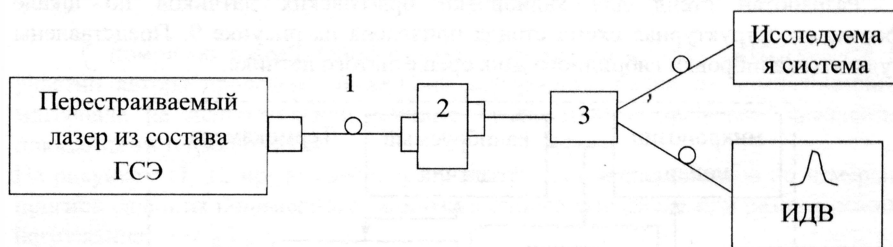


Рисунок 7. Структурная схема стенда для исследований рабочего спектрального диапазона и абсолютной погрешности по шкале длин волн: 1 – кабель оптический одномодовый; 2 – аттенуатор; 3 – разветвитель оптический одномодовый

Стенд для исследований диапазона измерений уровня средней мощности оптического излучения и относительной погрешности измерений уровня средней мощности оптического излучения разработан в ФГУП «ВНИИОФИ» при участии автора на основе рабочего эталона средней мощности оптического излучения в волоконно-оптических системах передачи РЭСМ-В. Структурная схема стенда представлена на рисунке 8.

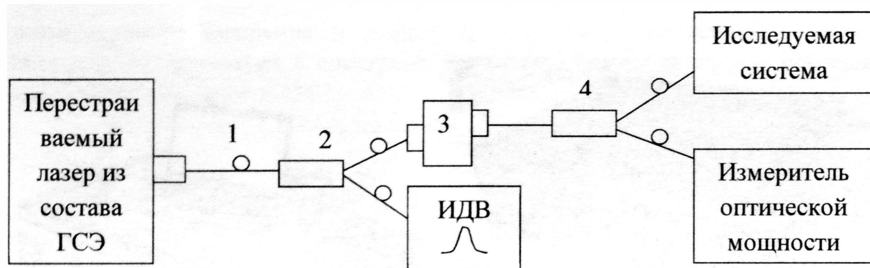


Рисунок 8. Структурная схема стенда для определения диапазона измерений уровня средней мощности оптического излучения: 1 – кабель оптический одномодовый; 2, 4 – разветвитель оптический одномодовый; 3 – аттенюатор

Лабораторные испытания разработанного макета быстродействующей многоканальной системы измерения деформации и температуры на основе брэгговских датчиков с использованием разработанных стендов подтвердили значения абсолютной погрешности по шкале длин волн $1 \cdot 10^{-12}$ м и быстродействия, характеризуемого минимальным интервалом между двумя последовательными измерениями порядка $0,2 \cdot 10^{-3}$ с. По результатам проведенных лабораторных испытаний разработанной аппаратуры составлен перечень технических характеристик системы измерения.

Разработан стенд для калибровки брэгговских датчиков по шкале деформации. Структурная схема стенда приведена на рисунке 9. Представлены результаты калибровки гибридного многорешетчатого датчика.

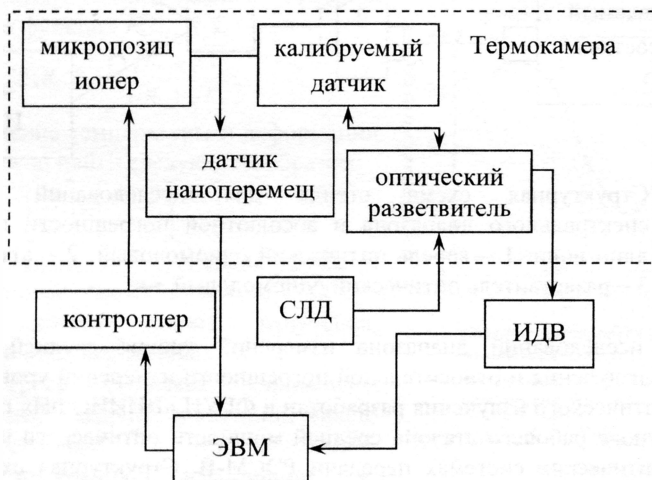


Рисунок 9. Структурная схема стенда для калибровки брэгговских датчиков деформации

В ходе калибровки вычислялась разность показаний исследуемого брэгговского датчика и датчика наноперемещений из состава установки для калибровки. Измерения проводились в диапазоне деформаций $\pm 0,2\%$ при увеличении деформации, затем при её уменьшении. Измеренные значения (см. Рисунок 10) попадают в диапазон $\pm 0,001\%$, что соответствует расчетной погрешности системы измерения.



Рисунок 10. Результаты калибровки гибридного многорешетчатого датчика

С помощью разработанного макета совместно с ОАО «НИИГрафит» при участии автора проведены измерения деформации бадки из композиционного материала на испытательной машине Zwick 3000 и проведено сравнение с показаниями тензодатчиков.

На рисунках 11, 12 представлены результаты двух экспериментов по измерению прогиба балки из полимерного композиционного материала при разных режимах нагружения.

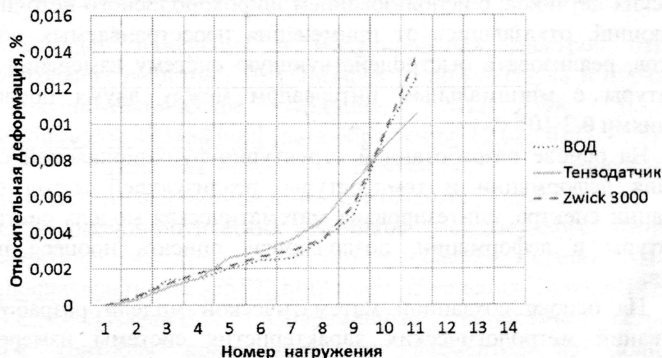


Рисунок 11. Результаты экспериментов по измерению прогиба балки на испытательной машине Zwick 3000 при равномерном нагружении балки

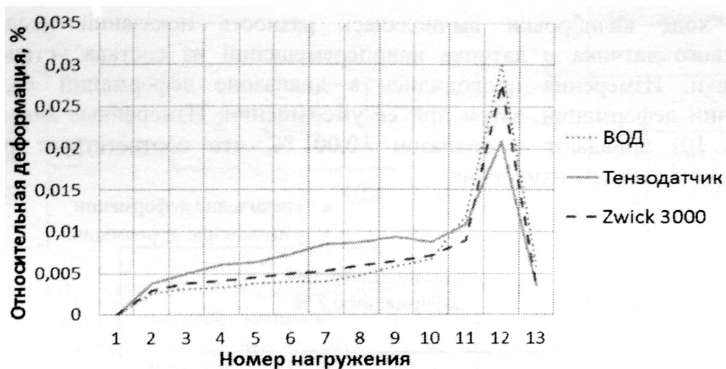


Рисунок 12. Результаты экспериментов по измерению прогиба балки на испытательной машине Zwick 3000 при неравномерном нагружении балки

Созданный макет системы измерения показывает результат, согласующийся с уставками испытательной машины Zwick 3000 в пределах 0,2 %, показания тензодатчиков отклоняются, в среднем, на 12 %.

Представленные результаты лабораторных испытаний макета системы измерения позволяют верифицировать созданную в диссертации математическую модель и подтверждают правильность расчетных соотношений, выполненных по разработанным методикам.

В выводах сформулированы основные результаты, полученные в ходе проведенной работы.

3. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработан метод регистрации спектра излучения, отраженного от брэгговских датчиков, с использованием широкополосного источника излучения, позволяющий, отказавшись от применения перестраиваемых по длине волны элементов, реализовать быстродействующую систему измерения деформации и температуры с минимальным интервалом между двумя последовательными измерениями $0,2 \cdot 10^{-3}$ с.

2. На основе разработанной структурно-функциональной схемы системы измерения деформации и температуры, реализующей метод одновременной регистрации спектра, синтезирована математическая модель системы измерения температуры и деформации, позволяющая описать процесс преобразования сигналов.

3. На основе созданной математической модели разработана методика исследований метрологических характеристик системы измерения, а также методика расчета ее основных параметров.

4. Предложена методика получения независимых оценок деформации и температуры на основе применения многогорешетчатых брэгговских датчиков, позволяющая проводить измерения деформации и температуры одновременно.

5. Разработан метод калибровки системы измерения деформации и температуры, основанный на применении брэгговской решётки и волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо, позволяющий достичь погрешности измерений длины волны излучения, отражённого от брэгговских датчиков, не хуже $1 \cdot 10^{-12}$ м, что позволяет получать оценки деформации с погрешностью не хуже $1 \cdot 10^{-3}$ % и оценки температуры с погрешностью не хуже 1 °С.

6. Созданы стенды для проведения лабораторных испытаний точностных характеристик системы измерения. Разработан стенд для калибровки брэгговских датчиков деформации.

7. Разработанные методики и технические решения реализованы и внедрены:

- в макете быстродействующей многоканальной системы измерения деформации и температуры;
- в многоканальной квазираспределенной информационно-измерительной системе, разработанной в ФГУП «ВНИИОФИ»;
- в системе встроенного непрерывного неразрушающего контроля деталей из полимерных композиционных материалов для ОАО «НИАТ»;
- в экспериментальном стенде для измерения прогиба балок при различных климатических условиях с целью одновременного контроля деформации и температуры в ОАО «НИИГрафит»;
- в экспериментальном стенде для калибровки брэгговских датчиков деформации в рамках лабораторной работы по дисциплине «Интегральная и волоконная оптика» в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

8. Проведены лабораторные испытания макета быстродействующей системы измерения деформации и температуры и получены результаты, подтвердившие правильность разработанных в диссертации теоретических положений и расчётных соотношений.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Сравнение методов измерения и моделирования спектров отражения волоконных брэгговских решеток / В.А. Лазарев [и др.] // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2012. № 6. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/422468.html> (дата обращения: 12.08.2012). С. 319-326.
2. Лазарев В.А., Шелестов Д.А. Разработка многоканальных квазираспределенных информационно-измерительных систем на основе наноразмерных волоконно-оптических датчиков механических напряжений // Наука и образование : электронное научно-техническое издание. 2012. № 4. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/355592.html> (дата обращения: 10.04.2012). 16 с.
3. Карасик В.Е., Лазарев В.А. Современные проблемы встроенного неразрушающего контроля конструкционных элементов из полимерных материалов на основе волоконно-оптических брэгговских датчиков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2011. Специальный выпуск «Современные проблемы оплотехники». С. 157–167.

4. Оптико-электронная измерительная система мониторинга деформации на основе наноразмерных волоконно-оптических периодических структур / В.А. Лазарев [и др.] // Фотон-экспресс. 2009. Спец выпуск, № 6. С. 156–157.
5. Быстродействующий измеритель длины волны лазерного излучения для волоконно-оптических систем передачи информации / В.А. Лазарев [и др.] : Пат. 2425338 Рос. Федерация. № 2009131082/28 ; заявл. 17.08.2009 // Б.И. 2011. № 21.
6. Современные проблемы оплотехники / В.А. Лазарев [и др.] : Учеб. пособие / Под ред. В.Е. Карасика. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 60-70.
7. Измерение деформации и температуры датчиками на основе брэгговских решеток / В.А. Лазарев [и др.] // Датчики и системы. 2009. № 1. С. 15–19.
8. Устройство для измерения деформаций на основе квазираспределенных волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках / В.А. Лазарев [и др.] : Пат. 2377497 Рос. Федерация. № 2008128572/28 ; заявл. 15.07.2008 // Б.И. 2009. № 36.
9. Многоканальная квазираспределенная информационно-измерительная система на основе наноразмерных волоконно-оптических структур датчиков механических напряжений / В.А. Лазарев [и др.] // Заводская лаборатория. 2008. Том 74, специальный выпуск. С. 70–75.
10. Квазираспределенная измерительная система на основе брэгговских датчиков механических напряжений с повышенной частотой опроса / В.А. Лазарев [и др.] // Автоматизация в промышленности. 2008. № 11. С. 58–62.
11. Карасик В.Е., Лазарев В.А., Неверова Н.А. Измерительное устройство контроля деформации и температуры на основе наноразмерных волоконно-оптических датчиков // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 58. С. 51–58.