

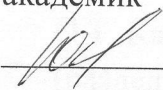
Российская академия наук
Дальневосточное отделение

Институт автоматики и процессов управления

УДК 681.78, 681.7.068
ВГК ОКП
№ госрегистрации:
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИАПУ ДВО РАН,
академик

 Ю.Н.Кульчин
«22» мая 2013 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

Адаптивные системы удаленного мониторинга крупномасштабных объектов
естественного и искусственного происхождения на основе
физических принципов, разрабатываемых
совместно с Даляньским технологическим университетом

(заключительный)

этап четвертый

Обобщение и оценка полученных результатов. Выработка рекомендаций

2011-1.9-519-029-030

Государственный контракт от «28» октября 2011 г. № 11.519.11.5015 в рамках
ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития
научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы»

Научный руководитель,
академик,
д.ф.-м.н., профессор

 Ю. Н.Кульчин
22.05.2013 г.

Владивосток 2013

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Научный руководитель,
академик, д.ф.-м.н.,
профессор

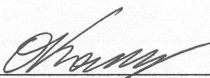


Ю.Н. Кульчин
(введение, заключение)

22.05.2013

Исполнители темы:

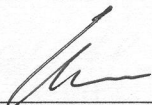
В.н.с., д.ф.-м. н.,



22.05.2013

О.Т. Каменев
(раздел 2)

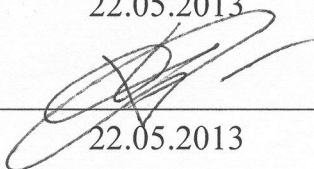
Г.н.с., д.ф.-м.н.



22.05.2013

О.Б. Витрик
(разделы 1, 4)

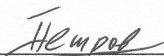
С.н.с., к.ф.-м. н.



22.05.2013

А.В. Дышлюк
(разделы 1, 4)

Н.с., к.т.н.



22.05.2013

Ю.С. Петров
(раздел 1)

Лаборант



22.05.2013

А.А. Ананская
(раздел 1)

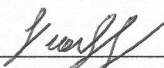
Лаборант



22.05.2013

А.А. Головин
(раздел 1)

Лаборант



22.05.2013

Д.Ю. Карловский
(раздел 1)

Лаборант



22.05.2013

М.С. Чулей
(раздел 2)

М.н.с.



22.05.2013

Р.В.Хижняк
(раздел 4)

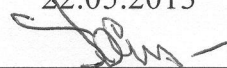
Лаборант



22.05.2013

А.А. Савченко
(раздел 2)

С.н.с.



22.05.2013

С.С. Голик
(раздел 3)

Лаборант



22.05.2013

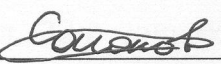
И.А. Степанов
(раздел 3)

Н.с.


22.05.2013

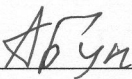
К.А. Шмирко
(раздел 3)

М.н.с.


22.05.2013

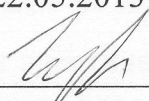
Е.Б. Соколова
(раздел 3)

Н.с.


22.05.2013

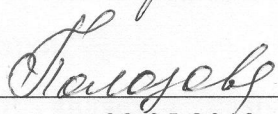
А.В. Буланов
(раздел 4)

М.н.с.


22.05.2013

С.О. Гурбатов
(раздел 1,2)

Нормоконтролер


22.05.2013

Н.И. Полозова

РЕФЕРАТ

Отчет 100 с., 16 рис., 9 табл., 32 источника и 1 приложение.

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА, МОНИТОРИНГ, АДАПТИВНОСТЬ, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА, ИНТЕРФЕРОМЕТР, ВОЛОКОННАЯ РЕШЕТКА БРЭГГА, ДЕФОРМОМЕТР, КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА

Объектом исследования являются адаптивные системы удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения на основе средств волоконной оптики.

Целью выполнения НИР является разработка принципов организации и построения адаптивных систем удаленного мониторинга на основе дистанционных методов неразрушающего контроля, волоконной и когерентной оптики, адаптивных методов обработки оптических сигналов с целью обеспечения безопасности эксплуатации крупномасштабных социальных объектов, производственных зданий, сооружений и механизмов, а также прилегающих к ним территорий для решения задач рационального природопользования и безопасности жизнедеятельности.

На этапе 4 настоящей НИР совместно с иностранным партнером, Даляньским технологическим университетом, проведены работы по обобщению и оценке полученных результатов, а также проведена выработка рекомендаций по их дальнейшему использованию.

Проведены дополнительные эксперименты с целью исследования возможности и определения путей улучшения характеристик систем мониторинга крупномасштабных объектов на основе средств волоконной оптики, представленные в главе 1. Иностраным партнером, Даляньским технологическим университетом, определены оптимальные параметры системы мониторинга температурных и деформационных распределений, при которых достигаются наилучшие чувствительность и динамический диапазон, представленные в разделе 1.1. В разделе 1.2 представлены результаты исследования корреляционных свойств спекл-сигналов, формируемых при прохождении лазерного излучения через одноволоконный многомодовый интерферометр, работающий в режиме возбуждения малого числа мод. В разделе 1.3 представлены дополнительные экспериментальные исследования деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера

Разработаны принципы создания адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров с протяженной базой в задачах мониторинга крупномасштабных объектов, представленные в главе 2.

Выполнено обобщение и оценка полученных результатов, представленное в главе 3.

В разделе 4.1 представлены рекомендации и предложения по использованию результатов проведенных НИР в области высоких технологий, связанных с осуществлением контроля за состоянием крупномасштабных природных и техногенных объектов.

В разделе 4.2 представлены рекомендации по дальнейшему развитию и коммерциализации адаптивных систем дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов, разработанные иностранным партнером – Даляньским технологическим университетом.

Разработан проект технического задания на НИР, представленный в приложении А.

Результаты НИР были использованы при модернизации образовательной программы 210100 «Электроника и нанoeлектроника», в том числе лекционных курсов «Квантовая и оптическая электроника», «Нелинейная оптика, а также при организации преддипломной и производственной практики студентов базовых кафедр Дальневосточного федерального университета.

Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие исследований методов контроля состояния природных и техногенных объектов. Результаты могут быть положены в основу создания высокочувствительных помехоустойчивых систем мониторинга состояния крупномасштабных объектов. Дальнейшее развитие исследований в области создания адаптивных систем мониторинга крупномасштабных объектов связано с проведением прикладных НИР, направленных на создание опытных образцов измерительных систем с проведением их экспериментальных исследований в процессе решения конкретных задач обеспечения контроля за состоянием крупномасштабных природных и техногенных объектов. Полученные в результате таких исследований результаты будут использованы для проведения соответствующих ОКР

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Обозначения и сокращения.....	8
Введение.....	9
1 Проведение дополнительной серии экспериментов с целью исследования возможности и определения путей улучшения характеристик систем мониторинга крупномасштабных объектов на основе средств волоконной оптики.....	13
1.1 Оптимизация схемы системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток, выполненное Даляньским технологическим университетом.....	13
1.2 Исследование корреляционных свойств спекл-сигналов, формируемых при прохождении лазерного излучения через одноволоконный многомодовый интерферометр, работающий в режиме возбуждения малого числа мод.....	16
1.3 Дополнительные экспериментальные исследования деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера.....	29
2 Разработка принципов создания адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров с протяженной базой в задачах мониторинга крупномасштабных объектов.....	32
3 Обобщение и оценка полученных результатов	41
3.1 Обобщение результатов исследований	41
3.2 Сопоставление анализа научно-информационных источников и результатов теоретических и экспериментальных исследований	46
3.3 Оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем	60

3.4 Анализ выполнения требований технического задания на НИР	63
3.5 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей НИР	77
4 Разработка рекомендаций по использованию результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках	83
4.1 Разработка рекомендаций и предложений по использованию результатов проведенных НИР в области высоких технологий, связанных с осуществлением контроля за состоянием крупномасштабных природных и техногенных объектов	83
4.2 Разработка рекомендаций по дальнейшему развитию и коммерциализации адаптивных систем дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов, выполненная Даляньским технологическим университетом	87
Заключение	91
Список использованных источников	94
Приложение А Проект технического задания на выполнение НИР	97

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о НИР применяют следующие обозначения и сокращения:

ФРК	- фоторефрактивный кристалл
МЧЭ	- многовитковый чувствительный элемент
АЦП	– аналого-цифровой преобразователь
ВБР	- волоконная брэгговская решетка
ВС	– волоконный световод
ОМИ	- одноволоконный многомодовый интерферометр
ПЗС	– прибор с зарядовой связью

Введение

В последнее время в нашей стране и за рубежом предпринимаются попытки создания систем мониторинга состояния крупномасштабных объектов. Однако, имеющиеся в настоящее время разработки не удовлетворяют современным требованиям ни по быстродействию, ни по объему собираемой информации. Протяженность информационных и измерительных каналов системы мониторинга крупномасштабного объекта приводит к значительному уровню шумов и как следствие недостаточной чувствительности. По той же причине сложно обеспечить приемлемую стоимость системы. Так же оставляет желать лучшего надежность подобных систем, эксплуатируемых часто в неблагоприятных условиях окружающей среды. Вопросы же сейсмической устойчивости объектов мониторинга вообще не изучаются. Существующие в настоящее время глобальные системы мониторинга сейсмической активности могут определять эпицентр и магнитуду землетрясения, но не могут ответить на вопрос, как данный конкретный объект реагирует на сейсмическую активность региона, в котором он находится.

Преимущества волоконно-оптической элементной базы: невосприимчивость к электромагнитным помехам, высокая чувствительность к внешним воздействиям, возможность создания протяженных измерительных преобразователей с распределенной чувствительностью, устойчивость к агрессивной внешней среде, низкая стоимость все чаще привлекают внимание исследователей, занятых разработкой систем мониторинга крупномасштабных объектов. Однако в нашей стране применение волоконно-оптической элементной базы для создания подобных систем как правило ограничивается разработкой систем охраны периметров. Ближайшие к предлагаемым в данной работе аналоги волоконно-оптических систем реализованы в виде набора точечных датчиков, что не может обеспечить надежный мониторинг состояния крупномасштабных объектов. За рубежом, значительных успехов добились исследователи, занимающиеся применением волоконных решеток Брэгга для создания протяженных одномерных измерительных линий, которые применяются для контроля за состоянием мостов и в последнее время – для контроля состояния зданий и сооружений. Однако эти системы требуют для обработки выходных сигналов сложных методов, ограничивающих быстродействие. Еще один

недостаток этих систем – низкая помехозащищенность, вызванная воздействием температуры на измерительные линии.

Более привлекательным с точки зрения мониторинга крупномасштабных объектов является применение одноволоконных многомодовых интерферометров, обладающих распределенной чувствительностью. Система таких протяженных (до 100м) интерферометров способна охватить значительные площади и объемы исследуемого объекта. Такой интерферометр может быть встроен в конструкцию сооружения на стадии строительства. Однако сложность обработки выходного оптического сигнала, представляющего собой спекловую картину, которая к тому же не обладает долговременной стабильностью, привела к тому, что подобные устройства вообще не применяются на практике.

Применение двухплечевых интерферометров, типа интерферометра Маха-Цендера, обладающих высокой чувствительностью к деформациям, в случае мониторинга крупномасштабных объектов так же затруднено из-за повышенной восприимчивости к нежелательным внешним воздействиям (температура), действующим на протяженное измерительное плечо.

Предварительные исследования, выполненные, в том числе совместно с учеными зарубежного партнера – Даляньского технологического университета - показали, что в случае использования волоконных решеток Брэгга для создания многоканальной системы мониторинга возможно применение альтернативных методов формирования и обработки выходных сигналов, которые позволяют разделить сигнал, связанный с деформацией объекта, от сигнала связанного с изменением температуры. Так же были разработаны новые принципы корреляционной обработки выходных сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров, которые обеспечивают адаптивность измерительной системы к изменениям температуры, что открывает перспективы для применения подобных устройств для создания систем мониторинга крупномасштабных объектов. Показана возможность применения волоконно-оптических интерферометров Маха-Цендера для создания деформометров с протяженной (до 50 м) базой, которые могут использоваться для регистрации акустических волн, распространяющихся в элементах конструкций зданий и сооружений, а также в земной коре. Показана возможность применения таких интерферометров для создания сейсмодатчиков.

В рамках настоящего проекта проведено комплексное исследование принципов построения протяженных волоконно-оптических измерительных линий, а также адаптивных и корреляционных методов обработки их выходных сигналов, основанных на применении средств оптоэлектроники и нелинейной оптики с целью построения на их основе адаптивных помехозащищенных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов. Необходимость применения средств волоконной и нелинейной оптики, а также адаптивных методов формирования и обработки сигналов определяется значительной протяженностью измерительных преобразователей и каналов передачи сигналов при мониторинге крупномасштабных объектов.

На предыдущих этапах НИР подготовлены следующие отчеты о НИР:
этап 1 – промежуточный отчет о НИР «Разработка принципов организации измерений параметров крупномасштабных объектов с использованием средств волоконной оптики»;
этап 2 – промежуточный отчет о НИР «Разработка принципов организации и построения адаптивных систем мониторинга крупномасштабных объектов на основе средств волоконной оптики»;
этап 3 – промежуточный отчет о НИР «Разработка и апробация адаптивных систем мониторинга крупномасштабных объектов на основе средств волоконной оптики»

Целью четвертого этапа НИР является обобщение и оценка полученных в ходе выполнения НИР результатов, а также выработка рекомендаций их дальнейшего применения. Работа выполнена совместно с иностранным партнером – Даляньским технологическим университетом. Достижение цели четвертого этапа НИР является завершением работ, связанных с разработкой адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга состояния крупномасштабных объектов.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

Китайская сторона:

1. Определение оптимальных параметров системы мониторинга температурных и деформационных распределений, при которых достигаются наилучшие чувствительность и динамический диапазон.
2. Разработка рекомендаций по дальнейшему развитию и коммерциализации адаптивных систем дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов.

Российская сторона:

3. Проведение дополнительной серии экспериментов с целью исследования возможности и определения путей улучшения характеристик систем мониторинга крупномасштабных объектов на основе средств волоконной оптики.
4. Разработка принципов создания адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров с протяженной базой в задачах мониторинга крупномасштабных объектов.
5. Обобщение и оценка полученных результатов, в том числе:
 - обобщение результатов исследований;
 - сопоставление анализа научно-информационных источников и результатов теоретических и экспериментальных исследований;
 - оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем;
 - анализ выполнения требований технического задания на НИР;
 - оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей НИР.
6. Разработка рекомендаций по использованию результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках, в том числе:
 - разработка рекомендаций и предложений по использованию результатов проведенных НИР в области высоких технологий, связанных с осуществлением контроля за состоянием крупномасштабных природных и техногенных объектов;
 - разработка проекта технического задания на проведение последующей НИР.

1 Проведение дополнительной серии экспериментов с целью исследования возможности и определения путей улучшения характеристик систем мониторинга крупномасштабных объектов на основе средств волоконной оптики

1.1 Оптимизация схемы системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток, выполненное Даляньским технологическим университетом

Система мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) включает в себя стандартный оптический рефлектометр и две волоконные линии, соединяемые при помощи циркулятора, одна из которых содержит ВБР-датчики, а вторая – две опорные перестраиваемые брэгговские решетки. Параметры ВБР-датчиков и опорных брэгговских решеток подбираются таким образом, что получаемая в результате измерений рефлектограмма содержит два пика отражения от каждой из опрашиваемых ВБР, отношение амплитуд которых прямо пропорционально относительному удлинению и температуре соответствующего ВБР-датчика. Для обеспечения регистрации сигналов датчиков в широком спектральном диапазоне в системе предусмотрена возможность использования несколько опорных ВБР. В этом случае, когда сигнал ВБР-датчика выходит за пределы рабочего диапазона между резонансными длинами волн двух опорных ВБР, рабочим становится диапазон между длинами волн следующей пары опорных решеток и т.д. Такой подход позволяет проводить измерения длины волны ВБР-датчика в сколь угодно широком диапазоне, ограниченном только пределом прочности волоконного световода (при измерении деформации) или его предельными термическими характеристиками (при регистрации температурных распределений). Схема регистрации сигналов ВБР-датчиков в широком спектральном диапазоне с применением нескольких опорных брэгговских решеток приведена на (рис 6.1).

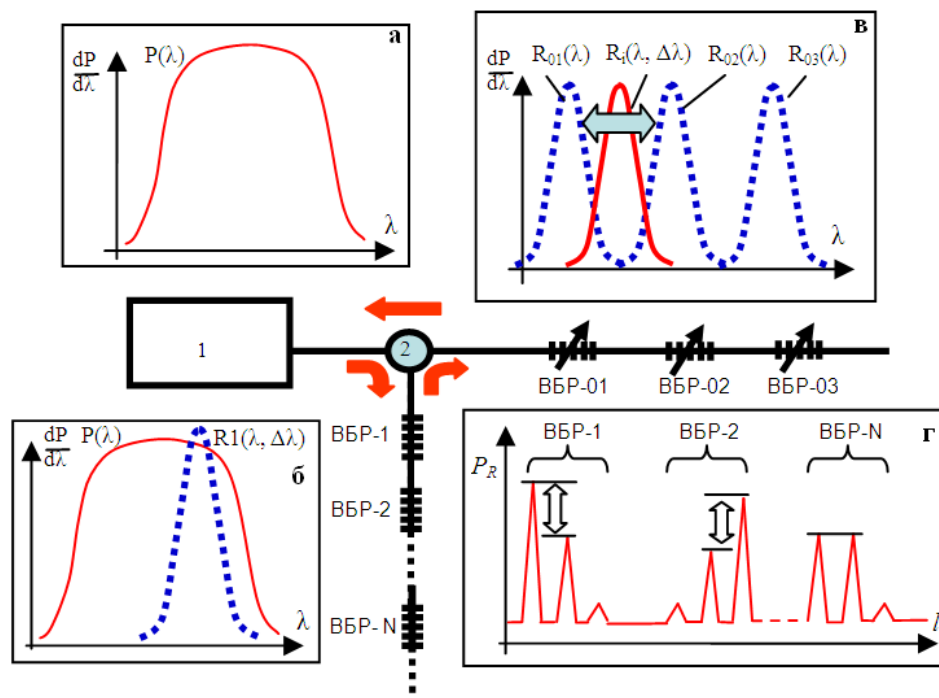


Рисунок 1.1 – Схема опроса ВБР-датчиков в широком спектральном диапазоне:
 1 – волоконно-оптический рефлектометр, 2 – волоконный циркулятор, ВБР-01... ВБР-03 – опорные брэгговские решетки, ВБР-1...ВБР-N – опрашиваемые ВБР-датчики. На вставках: а – схематическое изображение спектра исходного зондирующего импульса; б – отражение зондирующего импульса от ВБР-датчика; в – отражение импульса от опорных ВБР; г – схематическая рефлектограмма

В результате оптимизации схемы системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток было показано, что при регистрации механического напряжения и температуры брэгговской дифракционной решетки методом оптической временной рефлектометрии принимаемый сигнал прямо пропорционален измеряемому воздействию при выполнении следующих условий:

1. Полуширина спектра отражения ВБР много меньше, чем полуширина спектра мощности зондирующего импульса.
2. Полуширина спектра отражения ВБР больше чем разность длин волн двух соседних продольных мод спектра мощности зондирующего импульса.

При этом для обеспечения максимального динамического диапазона полезного сигнала резонансная длина волны ВБР должна выбираться из условия максимальной крутизны для огибающей спектра зондирующего импульса.

Было установлено, что в связи с возможностью насыщения фотоприемного устройства рефлектометра при регистрации излучения, отражаемого брэгговской дифракционной решеткой, для обеспечения линейного режима его работы коэффициент отражения ВБР на резонансной длине волны не должен превышать 2%.

Таким образом, для реализации рефлектометрического метода детектирования оптических сигналов, отражаемых брэгговскими дифракционными решетками, с применением стандартного волоконно-оптического рефлектометра (в частности, ANDO AQ7250) должны быть обеспечены следующие параметры ВБР-датчиков: полуширина спектра отражения: ~ 1 нм, коэффициент отражения на резонансной длине волны: 2%, резонансная длина волны в диапазонах: 1535 ± 5 нм или 1555 ± 5 нм. Указанные параметры обеспечиваются при глубине модуляции показателя преломления сердцевины волоконного световода $1.6 \cdot 10^{-5}$, длине дифракционной решетки 0,77 мм и периоде модуляции показателя преломления 0,511 мкм ($\lambda_{BR} = 1535$ нм) и 0,518 мкм ($\lambda_{BR} = 1555$ нм).

В ходе выполнения НИР было показано, что в качестве опорных ВБР предпочтительно использовать брэгговские решетки с коэффициентом отражения 20-40%. При этом оптимальный спектральный промежуток между соседними опорными брэгговскими решетками составляет $\Delta\lambda = 2 \cdot \lambda_{FWHM}$, где λ_{FWHM} – полуширина спектра отражения используемых ВБР.

Установлено, что для устранения погрешности измерений, обусловленной неконтролируемыми изменениями мощности зондирующих импульсов вследствие нестабильности мощности лазера, потерь направляемого излучения в подводящих световодах и пр. целесообразно использовать дифференциальную регистрацию сигналов от брэгговских датчиков. При этом для максимального снижения искажений регистрируемого сигнала вследствие модовых скачков в спектре зондирующего импульса необходимо усреднять результаты измерений резонансной длины волны опрашиваемого ВБР датчика на менее чем по 20 измерениям.

В результате выполнения НИР было показано, что при оптимизации параметров ВБР-датчиков и опорных ВБР в составе измерительной системы благодаря

реализации дифференциального принципа измерения обеспечивается стабильность регистрируемого сигнала (при фиксированном удлинении ВБР-датчика) в пределах 0,1% при уменьшении мощности зондирующего импульса на 50%. При этом пороговая чувствительность ВБР-датчиков к удлинению составляет $\sim 50 \cdot 10^{-6}$ при диапазоне измерения $4 \cdot 10^{-3}$, пороговая чувствительность по температуре 5°C . Максимальное количество мультиплексируемых датчиков составляет более 400, величина перекрестных помех $< 40\text{дБ}$.

Благодаря простоте и возможности использования стандартного и широкодоступного рефлектометрического оборудования разработанный подход может найти широкое применение в области мониторинга деформационных и термических процессов в крупномасштабных и протяженных объектах с использованием контрольно-измерительных систем на основе волоконных брэгговских решеток.

1.2 Исследование корреляционных свойств спекл-сигналов, формируемых при прохождении лазерного излучения через одноволоконный многомодовый интерферометр, работающий в режиме возбуждения малого числа мод

В ходе выполнения настоящей НИР были предложены, теоретически и экспериментально исследованы принципы создания многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью. На отчетном этапе с целью исследования путей оптимизации характеристик измерительной системы было проведено исследование корреляционных свойств спекл-сигналов, формируемых при прохождении лазерного излучения через одноволоконный многомодовый интерферометр, работающий в режиме возбуждения малого числа мод.

Одноволоконный многомодовый интерферометр не всегда используется в режиме возбуждения большого числа направляемых мод, что связано с большей длиной когерентности излучения, распространяющегося в ОМИ, работающем в режиме возбуждения узкого модового спектра. Поэтому в ряде случаев удобно

использовать лишь две моды, в результате спектра е чего картина межмодовой интерференции значительно упрощается и в идеальном случае становится регулярной (рисунок 1.2). Это позволяет использовать стандартные методы для обработки таких интерференционных сигналов и, таким образом, существенно упростить схему и режим работы измерительной системы.



Рисунок 1.2 - Картина интерференции двух линейно-поляризованных (LP) мод низшего порядка, формирующиеся одноволоконным многомодовым интерферометром, работающим в режиме возбуждения малого числа мод

Интерферометры такого типа находят применения для проведения различных физических измерений [1, 2], но широкому их применению препятствуют слабодетерминированные искажения картины межмодовой интерференции вследствие поляризационных изменений собственных волн и трудноустраняемого влияния мод высоких порядков (рисунок 1.3).

Для этого случая использование метода прямого измерения корреляционной функции спекл-сигналов, рассмотренного на предыдущих этапах выполнения НИР, оказывается неэффективным вследствие того, что маломодовые ВС не формируют картины спеклового поля. Однако такое поле может быть создано искусственно за счет пропускания излучения такого световода через диффузный рассеиватель (рисунок 1.4).

Поэтому в настоящем разделе рассматриваются возможности корреляционной обработки спекл-структур, получаемых при пропускании излучения ОМИ с малым числом мод через диффузно-пропускающий объект и исследуются особенности такой обработки.

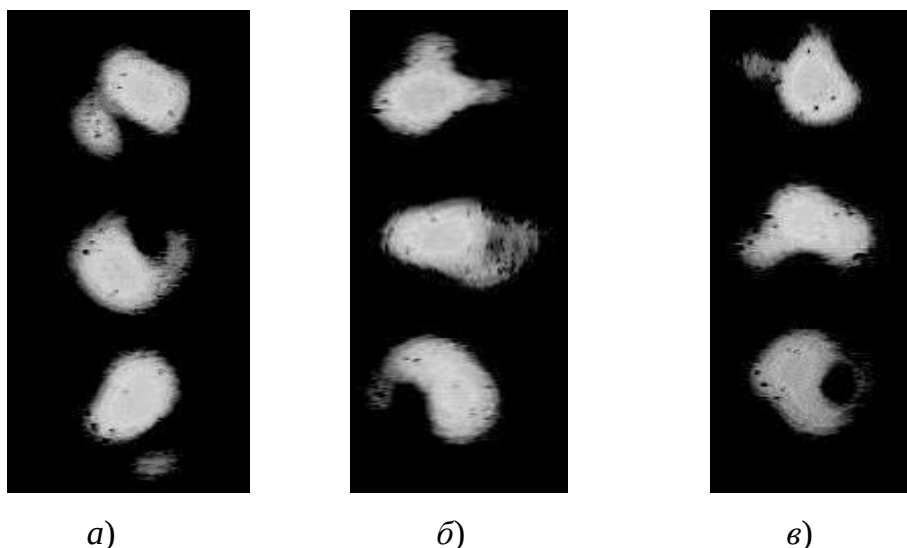


Рисунок 1.3 – Искажения интерференционной картины, формирующейся одноволоконным многомодовым интерферометром в режиме возбуждения малого числа мод вследствие: а) поляризационных изменений LP мод, б, в) варианты искажений из-за влияния мод высших порядков

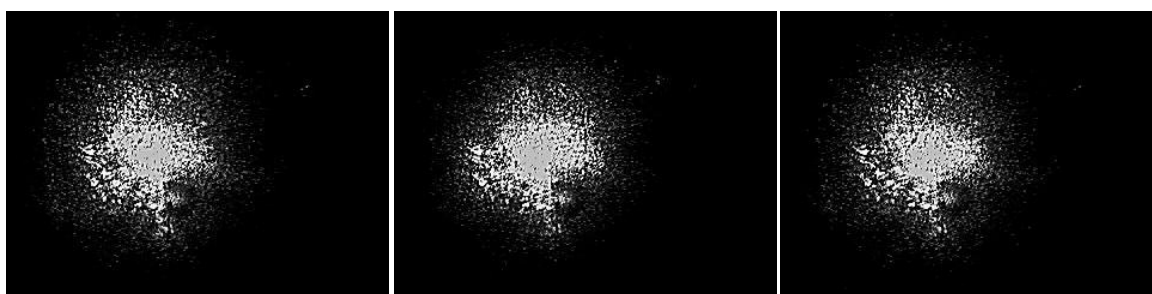


Рисунок 1.4 - Картины спеклового поля, получаемые при пропускании излучения одноволоконного многомодового интерферометра, работающего в режиме возбуждения малого числа мод, через диффузный рассеиватель

Рассмотрим физическую картину рассеяния когерентного излучения прозрачным диффузным рассеивателем. Будем полагать, что каждый из его элементов $\Delta\sigma = \Delta\xi\Delta\eta$ не изменяет амплитуды падающей световой волны, но вносит случайную добавку к ее фазе. При этом, линейные размеры элементов $\Delta\xi$ и $\Delta\eta$ малы по сравнению с длиной волны и нет никакой связи между фазовыми добавками внесенными двумя разными элементами диффузного рассеивателя.

Полагая, что среда между диффузным объектом и плоскостью регистрации является однородной, комплексное возмущение электромагнитного поля в точке P в плоскости регистрации (рисунок 1.5), обусловленное всеми элементами $\Delta\sigma_m$ запишется в виде:

$$V(x, y) = \sum_m \frac{1}{r_m} E_1(\xi_m, \eta_m) \exp(i\varphi(\xi_m, \eta_m) + ikr_m) \Delta\sigma_m \quad (1.1)$$

где $E_1(\xi_m, \eta_m)$ характеризует напряженность волны, падающей на m -ый элемент диффузного транспаранта; $\varphi(\xi_m, \eta_m)$ - случайная фазовая добавка, вносимая этим элементом; r_m - расстояние между элементом и точкой P с координатами (x, y) (рисунок 1.5).

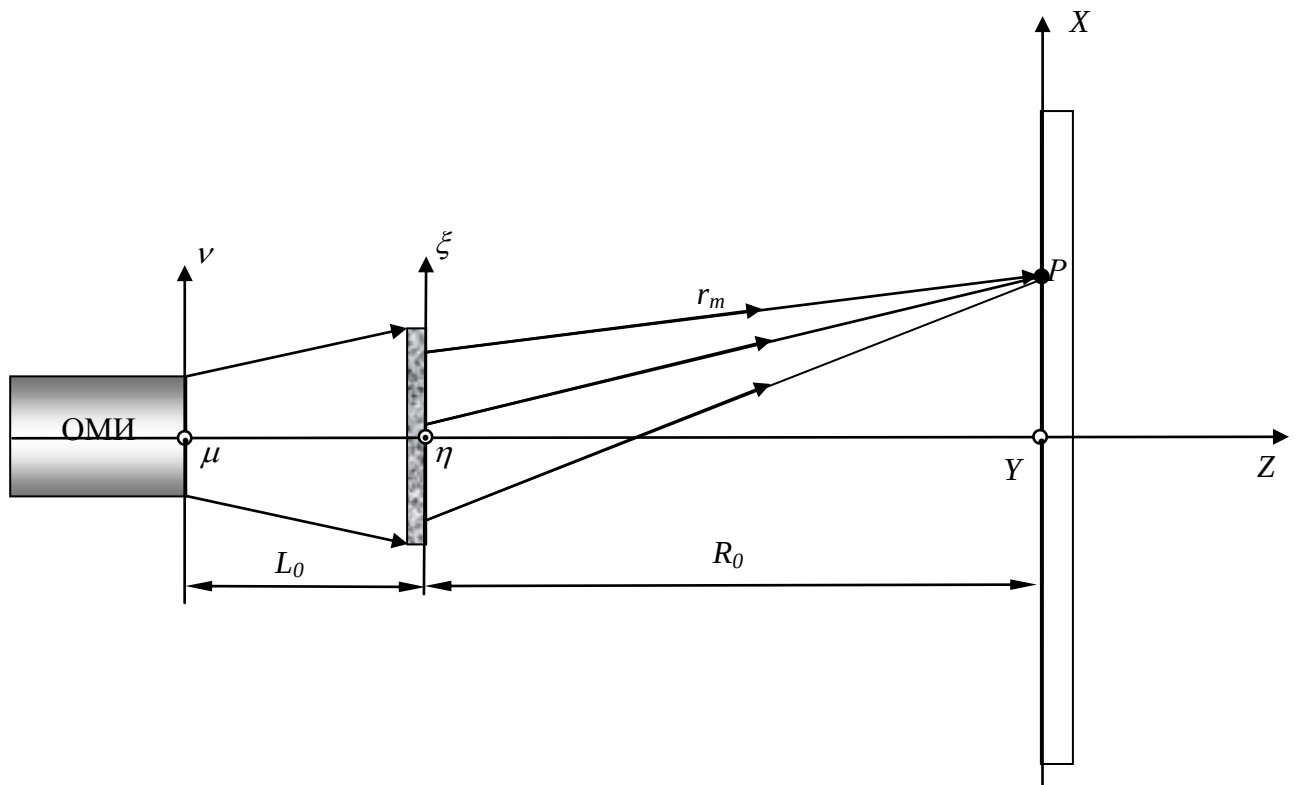


Рисунок 1.5 – Регистрация излучения на выходе одноволоконного многомодового интерферометра, работающего в режиме возбуждения малого числа мод, при прохождении через диффузный рассеиватель

Далее будем полагать, что малы как линейные размеры диффузного рассеивателя по сравнению с расстоянием R_0 между рассеивателем и плоскостью наблюдения, так и углы между осью Z и любыми лучами r_m (рис. 1.4). Тогда получаем, что

$$r_m = \sqrt{R_0^2 + (x - \xi_m)^2 + (y - \eta_m)^2} \approx R_0 + \frac{x^2 + y^2}{2R_0} + \frac{x\xi_m + y\eta_m}{R_0}. \quad (1.2)$$

При получении приближенного выражения в (1.2) учтены лишь основные члены относительно $\frac{x}{R_0}, \frac{y}{R_0}, \frac{\xi_m}{R_0}, \frac{\eta_m}{R_0}$. В знаменателе выражения (1.2) с хорошей точностью можно r_m заменить на R_0 . Тогда выражение (1.2) принимает вид:

$$V_1(x, y) = \frac{1}{R_0} \exp\left(ik\left(R_0 + \frac{x^2 + y^2}{2R_0}\right)\right) \times \sum_m E_1(\xi_m, \eta_m) \exp\left(i\varphi(\xi_m, \eta_m) + ik \frac{x\xi_m + y\eta_m}{R_0}\right) \Delta\sigma_m. \quad (1.3)$$

Интенсивность света в точке P с точностью до несущественной постоянной будет равна

$$I_1(x, y) = V_1(x, y)V_1^*(x, y) = \sum_m \sum_n E_1(\xi_m, \eta_m) E_1^*(\xi_n, \eta_n) \times \exp\left(i(\varphi(\xi_m, \eta_m) - \varphi(\xi_n, \eta_n)) + ik \frac{x(\xi_m - \xi_n) + y(\eta_m - \eta_n)}{R_0}\right) \Delta\sigma_m \Delta\sigma_n. \quad (1.4)$$

При внешнем воздействии на ОМИ, приводящем к изменению фазы его мод, напряженность поля электромагнитной волны падающей на диффузный рассеиватель изменится и станет равным некоторому новому значению $E_2(\xi, \eta)$. Тогда распределение интенсивности световой волны в плоскости регистрации $I_2(x, y)$ будет описываться выражением (1.4) в котором следует $E_1(\xi_m, \eta_m)$ заменить на $E_2(\xi_m, \eta_m)$.

Рассмотрим произведение интенсивностей I_1 и I_2 . Как следует из выражения (1.4) оно может быть рассчитано, как

$$\begin{aligned}
I_1(x, y)I_2(x, y) = & \quad (1.5) \\
& \sum_m \sum_n \sum_p \sum_q E_1(\xi_m, \eta_m) E_1^*(\xi_n, \eta_n) E_2(\xi_p, \eta_p) E_2^*(\xi_q, \eta_q) \Delta\sigma_m \Delta\sigma_n \Delta\sigma_p \Delta\sigma_q \times \\
& \times \exp(i(\varphi(\xi_m, \eta_m) - \varphi(\xi_n, \eta_n) + \varphi(\xi_p, \eta_p) - \varphi(\xi_q, \eta_q))) + \\
& + ik \frac{x(\xi_m - \xi_n + \xi_p - \xi_q) + y(\eta_m - \eta_n + \eta_p - \eta_q)}{R_0}.
\end{aligned}$$

С точки зрения усреднения по ансамблю статистически одинаковых диффузных транспарантов вклад в среднее значение произведения величин I_1 и I_2 дадут только те члены суммы в соотношении (1.5) для которых аргумент мнимой экспоненты оказывается равен нулю. Это возможно во первых, в случае когда $m = n$ и $p = q$ и, во вторых, когда $m = q$ и $n = p$. Учитывая обе эти возможности получаем:

$$\begin{aligned}
\langle I_1 I_2 \rangle = & \sum_m \sum_p |E_1(\xi_m, \eta_m)|^2 |E_2(\xi_p, \eta_p)|^2 \Delta\sigma_m \Delta\sigma_p + & (1.6) \\
& + \sum_m \sum_n E_1(\xi_m, \eta_m) E_2^*(\xi_m, \eta_m) E_1^*(\xi_n, \eta_n) E_2(\xi_n, \eta_n) \Delta\sigma_m \Delta\sigma_n = \\
= & \left[\sum_m |E_1(\xi_m, \eta_m)|^2 \Delta\sigma_m \sum_m |E_2(\xi_m, \eta_m)|^2 \Delta\sigma_m + \left| \sum_m E_1(\xi_m, \eta_m) E_2^*(\xi_m, \eta_m) \Delta\sigma_m \right|^2 \right].
\end{aligned}$$

Переходя в (1.5) от суммирования к интегрированию, имеем

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \int_{(\sigma)} E_1 E_1^* d\xi d\eta \int_{(\sigma)} E_2 E_2^* d\xi d\eta + \left| \int_{(\sigma)} E_1 E_2^* d\xi d\eta \right|^2. \quad (1.7)$$

Интегрирование в выражении (1.7) ведется по всей поверхности σ диффузного транспаранта, кроме того, для простоты опущены обозначения координатной зависимости для напряженностей полей E_1 и E_2 .

Поле электромагнитной волны, падающей на поверхность диффузного транспаранта, представляет суперпозицию возмущений A_{jn} , вносимых всеми модами

одноконного интерферометра: $E_j(x, y) = \sum_{n=1}^N A_{jn}$, где $j=1$, в отсутствие внешних воздействий на ОМИ и $j=2$ при их наличии, N – число мод одноволоконного интерферометра. Как следствие, интегралы, входящие в выражение (1.7) можно представить в виде:

$$\int_{(\sigma)} E_j(\xi, \eta) E_l^*(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \int_{(\sigma)} A_{jn}(\xi, \eta) A_{lm}^*(\xi, \eta) d\xi d\eta. \quad (1.8)$$

Представим величину напряженности электромагнитной волны, возбуждаемой n -ой модой ОМИ в плоскости диффузного объекта по аналогии с выражением (1.5) в виде

$$A_{jn}(\xi, \mu) = C_0 \exp\left(ik\left(L + \frac{\eta^2 + \xi^2}{2L_0}\right)\right) \int_{(\zeta)} F_n(v, \mu) \exp\left(i(\varphi_n + (j-1)\delta\varphi_n) + ik \frac{\xi v + \eta \mu}{L}\right) dv d\mu. \quad (1.9)$$

где v, μ – декартовы координаты в плоскости выходного торца ОМИ, C_0 – постоянный коэффициент, зависящий от расстояния L между выходным торцом ОМИ и плоскостью диффузного транспаранта, $F_n(v, \mu)$ – распределение амплитуды поля моды в плоскости поперечного сечения ОМИ, φ_n – фаза моды на выходе из ОМИ, $\delta\varphi_n$ – приращение фазы моды, вызванное внешними воздействиями на интерферометр, которое в случае изменения длины ОМИ, то есть если $dZ = dl$, может быть рассчитано [3] в виде (1.8).

Интегрирование в соотношении (1.9) ведется по всей поверхности ζ диффузного рассеивателя. Как следствие интеграл, входящий в правую часть выражения (1.8), может быть вычислен в виде

$$\begin{aligned} \int_{(\sigma)} A_{jn}(\xi, \eta) A_{lm}^*(\xi, \eta) d\xi d\eta &= C_0^2 \exp(i(\varphi_n - \varphi_m + (l-j)\delta\varphi_m)) \times \\ &\times \int_{(\zeta)} F_n(v, \mu) F_m^*(v', \mu') dv d\mu dv' d\mu' \int_{(\sigma)} \exp\left(ik \frac{\xi(v - v') + \eta(\mu - \mu')}{L}\right) d\xi d\eta = \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{C_0^2 \lambda^2 L^2}{4} \exp(i(\varphi_n - \varphi_m + (l-j)\delta\varphi_m)) \times \\
&\times \int_{(\varsigma)} F_n(\nu, \mu) F_m(\nu', \mu') \delta(\nu - \nu') \delta(\mu - \mu') d\nu d\mu d\nu' d\mu' = \\
&= \frac{C_0^2 \lambda^2 L^2}{4} \exp(i(\varphi_n - \varphi_m + (l-j)\delta\varphi_m)) \int_{(\varsigma)} F_n(\nu, \mu) F_m(\nu, \mu) d\nu d\mu = \\
&= \begin{cases} \frac{(C_0 L \lambda)^2}{4} \exp(i(l-j)\delta\varphi_m) \int_{(\varsigma)} F_n^2(\nu, \mu) d\nu d\mu \\ 0, \quad m \neq n \end{cases}.
\end{aligned}$$

При выводе последнего выражения было использовано свойство ортогональности полей мод в оптических волноводах [3]. В отсутствие внешних воздействий на ОМИ $\delta\varphi_n = 0$. Комбинируя выражения (1.7), (1.8) и (1.10) получаем, что

$$\langle I_1 I_2 \rangle = \left(\sum_{n=1}^N P_n \right)^2 + \left| \sum_{n=1}^N P_n \exp(i\delta\varphi_n) \right|^2 \quad (1.11)$$

где величина $P_n = \frac{(C_0 L \lambda)^2}{4} \int_{(\varsigma)} F_n^2(\nu, \mu) d\nu d\mu$ - характеризует мощность переносимую n -

ой модой. Проведя аналогичные рассуждения легко получить что $\langle I_1 \rangle = \langle I_2 \rangle = \sum_{n=1}^N P_n$,

$\langle I_1^2 \rangle = \langle I_2^2 \rangle = 2 \left(\sum_{n=1}^N P_n \right)^2$. В результате с учетом соотношения (1.1) и результатов работы [5] получаем следующее выражение для коэффициента интенсивностей световых корреляции полей в плоскости регистрации

$$\rho_{12} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N P_n \exp(i\delta\varphi_n) \right|^2}{\left(\sum_{n=1}^N P_n \right)^2} \quad (1.12)$$

Зависимость $\rho_{12}(\Delta l)$, рассчитанная в соответствии с выражениями (1.8) и (1.12) для случая возбуждения в световоде пяти направляемых линейно-поляризованных (LP)

мод низшего порядка приведена на рисунке 1.7 (кривая 1). Расчеты выполнялись в предположении, что кварцевый ВС с параметрами: числовая апертура $NA = 0.11$, $\Delta n = 0.004$, диаметр сердцевины $D = 10$ мкм возбуждается излучением с длиной волны $\lambda = 630$ нм и что мощность, переносимая каждой из пяти направляемых LP-мод, одинакова. Видно, что при достаточно малых величинах Δl данная зависимость похожа на ту, что получается при обработке сигналов многомодового интерферометра в режиме возбуждения большого числа направляемых мод. В частности, так же как и для последнего она предполагает существование такого характерного удлинения базы чувствительного световода - $\Delta l_0 \approx \frac{\lambda}{\Delta n} = 157$ мкм, по достижении которого наблюдается полная декорреляция сигнала межмодовой интерференции и исходного изображения и дальнейшая корреляционная обработка становится невозможной. Из анализа выражений (1.10) и (1.12) следует, что существенные различия в характере зависимостей $\rho_{12}(\Delta l)$ для случая широкого и узкого модовых спектров возникают при больших значениях удлинения световода в ОМИ ($\Delta l \gg \Delta l_0$), то есть в случае, который, как это указывалось ранее, не представляет интереса для измерений величины аксиального растяжения световодов. Если же $\Delta l < \Delta l_0$, то коэффициент корреляции оказывается достаточно высок, чтобы по его измеренному значению можно было рассчитать величину изменения длины волоконного световода в составе ОМИ.

Для экспериментальной проверки сделанных выводов использовалась установка, схема которой показана на рисунке 1.6. Аксиальная деформация чувствительного участка световода в ОМИ (4), достигается перемещением опоры (5) вдоль оси X. Выходящий из ОМИ световой пучок направляется на диффузный транспарант (6) и далее на ПЗС матрицу (7) видеокамеры, сопрягаемой с ЭВМ (8).

Чтобы исключить влияние на результат измерений взаимных продольных и поперечных перемещений излучающего торца ВС, диффузного транспаранта и видеокамеры, все эти элементы закрепляются в едином жестком корпусе. В результате пропускания оптического излучения ОМИ через диффузный рассеиватель, ПЗС матрица регистрирует изображение, подобное показанному на рисунке 1.3. Из указанного изображения видно, что средняя яркость регистрируемого изображения непостоянна, что требует выделения фрагмента кадра и выполнения условия для

средней регистрируемой интенсивности при обработке сигналов ПЗС, аналогично тому, как это было сделано для случая ОМИ, работающего в многомодовом режиме.

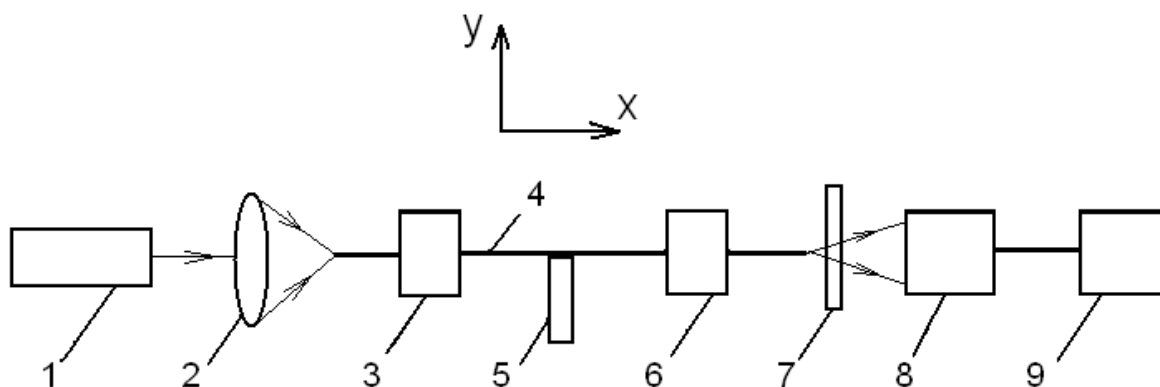


Рисунок 1.6 – Схема экспериментальной установки:

1 – He-Ne – лазер; 2 – микро объектив; 3, 6 – опоры; 4 – ОМИ; 5 – микрометрическая подача; 7 – диффузный рассеиватель, 8 – ПЗС матрица видеокамеры (разрешение 640*480 пс); 9 – ЭВМ

В настоящей работе были выбраны следующие условия эксперимента: радиус светового пятна на транспаранте ~ 200 мкм, средний размер зерна матовой поверхности стеклянной пластинки, используемой в качестве диффузного транспаранта ~ 1 мкм. Средний размер спекла в плоскости ПЗС матрицы составляет ~ 60 мкм и намного превышает размер ячейки матрицы (12 мкм), оставаясь значительно меньше, чем ее линейные размеры (~ 4 мм). При этом при регистрации обеспечиваются условия: $\bar{X} / X_{\text{max}} = 0.15$, $R = 0.7R_0$. Это в соответствии с выводами предыдущего раздела удовлетворяет оптимальным условиям регистрации спекловой картины. Как и в случае ОМИ с широким спектром мод, это позволяет минимизировать величину рассогласования между расчетными и экспериментальными кривыми для зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$. Тем не менее, у экспериментальной зависимости (кривая 2 на рисунок 1.8) остается ненулевая постоянная составляющая, которой нет у расчетной кривой 1 (рисунок 1.8). Наличие этой составляющей не связано с режимом регистрации световых полей приборами с зарядовой связью, а является следствием не учтенных в расчетной модели

особенностей формирования спекл-картины. Существенным моментом при расчетах явилось пренебрежение расходимостью светового пучка вследствие ненулевого значения числовой апертуры маломодового световода. В конечном итоге такое приближение позволило использовать свойство ортогональности полей мод при выводе расчетного выражения (1.13). По-видимому, условие ортогональности в дальнем поле излучения ВС выполняется не полностью, в результате чего экспериментальные значения для коэффициента корреляции между опорными и сигнальными распределениями интенсивностей не уменьшается до нуля. Такая особенность потребовала внесения соответствующих поправок в алгоритм вычисления величины удлинения волоконных световодов в ОМИ, работающих в режиме возбуждения малого числа мод.

Результаты экспериментального измерения зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$, полученные при использовании диффузного рассеивателя и с использованием различных опорных изображений картины спеклового поля, представлены на рис. 1.7 (кривые 2-3) и рисунке 1.8.

Как видно, полученные зависимости в целом совпадают. Имеющийся разброс объясняется статистическим характером измеряемого параметра, а также шумом, возникающим при приеме светового пучка ограниченной апертуры, прошедшего через случайную фазовую пластинку [6]. В настоящей работе этот разброс является источником погрешности при определении величины Δl . Как следует из представленных на рисунке. 1.8 результатов, погрешность измерения величины Δl составляет $\sim 6\%$ от характерной величины l_0 и для выбранного типа ВС с параметрами: числовая апертура $NA = 0.11$, диаметр сердцевины 10 мкм, может достигать ± 10 мкм на линейном участке зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$.

Интересно подробнее рассмотреть влияние диффузного рассеивателя на погрешность измерений в случае его использования в схеме ОМИ с маломодовым ВС (рисунок 1.7). На рисунке 1.7 представлены кривые 2 и 3 для зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$, полученные при использовании двух различных распределений опорного поля. Видно, что они совпадают в пределах погрешности измерений. Для сравнения на этом же рисунке представлены кривые 4 и 5, полученные при тех же самых условиях, что соответственно зависимости 2 и 3, но без использования диффузора. Заметно, что кривые 4 и 5 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. Таким образом, использование диффузного рассеивателя в схеме с ОМИ, работающем 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 $0.06 \Delta l_0$.

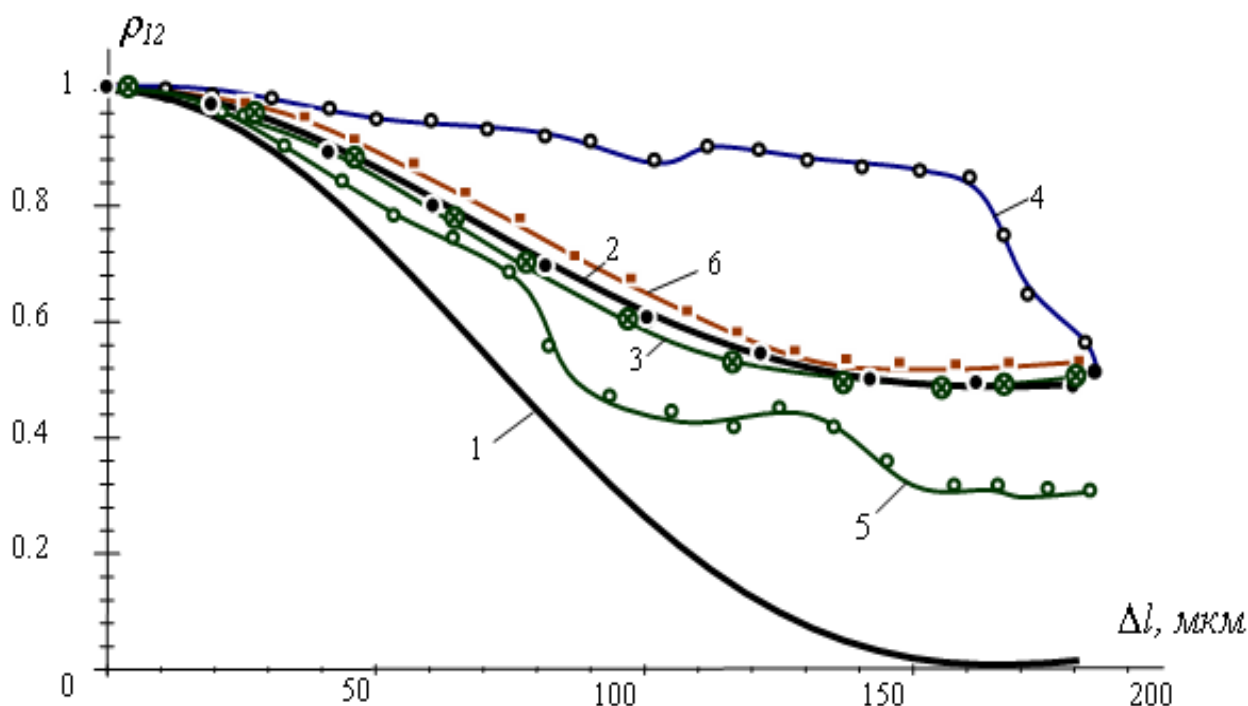


Рисунок 1.7 - Зависимость коэффициента корреляции от величины удлинения ВС в ОМИ, работающем в режиме возбуждения малого числа мод:

1 – кривая, рассчитанная в соответствии с выражением (1.2.12), 2,3 – экспериментальные кривые, полученные при прохождении излучения через диффузный рассеиватель, 4, 5 – экспериментальные кривые, полученные без использования диффузора при непосредственном освещении ПЗС излучением световода, 6 – экспериментальная кривая, полученная при усреднении результатов большого числа измерений, выполненных без использования диффузора

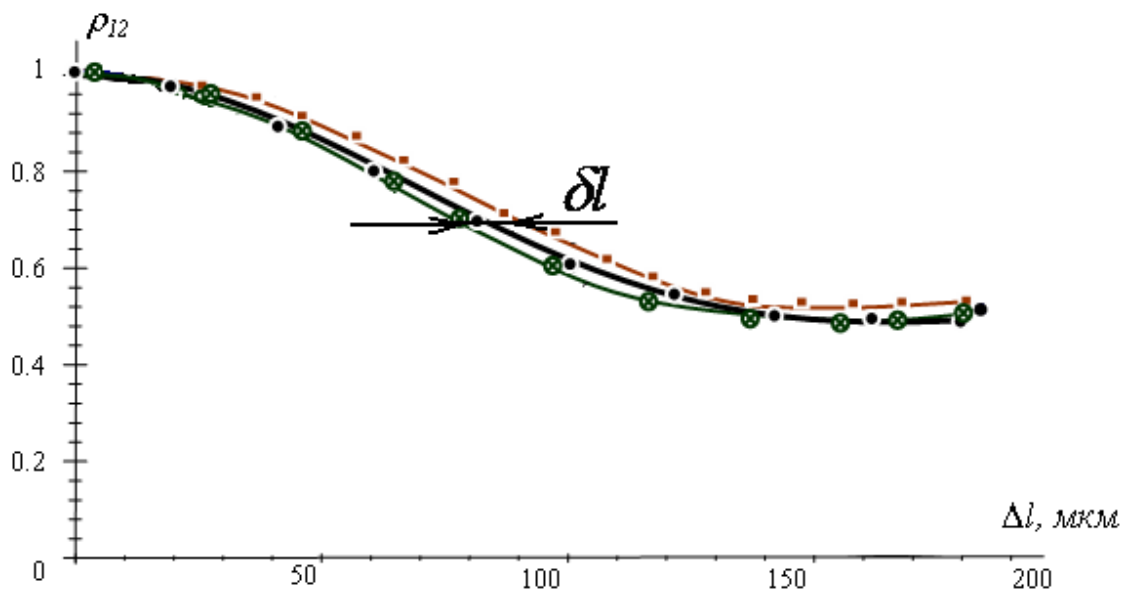


Рисунок 1.8 - Зависимости $\rho_{12}(\Delta l)$. полученные при использовании различных опорных изображений спеклового поля

На рисунке 1.7 представлена кривая 6, 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 2 и 3. Таким образом, корреляционные характеристики рассеянного диффузором светового поля могут рассматриваться как результат усреднения соответствующих характеристик для множества неоднородных интерференционных полей, формируемых непосредственно маломодовым ВС.

Таким образом, результаты, полученные на данном этапе выполнения НИР, сводятся в основном к следующему. Показано, что использование диффузного рассеивателя в схеме с ОМИ, работающем 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 $0.06 \Delta l_0$. При этом корреляционные характеристики рассеянного диффузором светового поля могут рассматриваться как результат усреднения соответствующих характеристик для множества неоднородных интерференционных полей, формируемых непосредственно маломодовым ВС.

Установлено, 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 и не превышает 6% от характерного удлинения Δl_0 при соблюдении оптимальных условий регистрации спекл-картин приборами с зарядовой связью. Дополнительным условием минимизации погрешности в случае возбуждения узкого модового спектра в волоконном световоде является введение в схему ОМИ диффузора для рассеивания лазерного излучения на выходе волоконного световода.

1.3 Дополнительные экспериментальные исследования деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера

На этапах 2 и 3 выполнения данной НИР были разработаны принципы построения и макет волоконно-оптического деформометра с протяженной базой на основе Интерферометра Маха-Цендера, в котором применен особый многовитковый чувствительный элемент (МЧЭ). Проведены экспериментальные исследования макета. Однако не было экспериментально подтверждено утверждение о том, что предложенная конструкция деформометра обеспечивает повышенную помехозащищенность по сравнению с традиционным волоконно-оптическим интерферометром Маха-Цендера.

Для проведения дополнительных экспериментальных исследований деформометра с протяженной базой на основе Интерферометра Маха-Цендера макет деформометра с МЧЭ был установлен на одной оптической плите со специально изготовленным деформометром на основе традиционного волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера (рисунок 1.9). Расположение основных элементов деформометров было выбрано таким образом, чтобы условия проведения измерений были одинаковыми. Длина измерительной базы составила 50 см. Выходные сигналы интерферометров поступали через АЦП на персональный компьютер для обработки.

На рисунке 1.10 представлены временные зависимости выходных сигналов деформометров: а – традиционного, б – с многовитковым чувствительным элементом.

Как видно из рисунка, помехозащищенность деформометра с многовитковым чувствительным элементом значительно выше, чем деформометра с традиционным интерферометром.

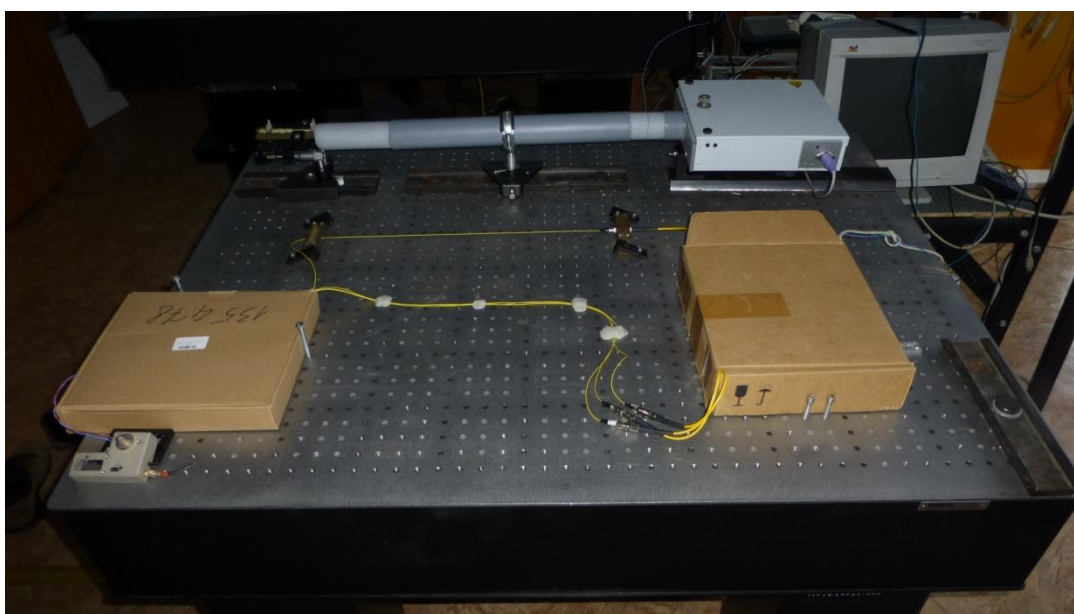
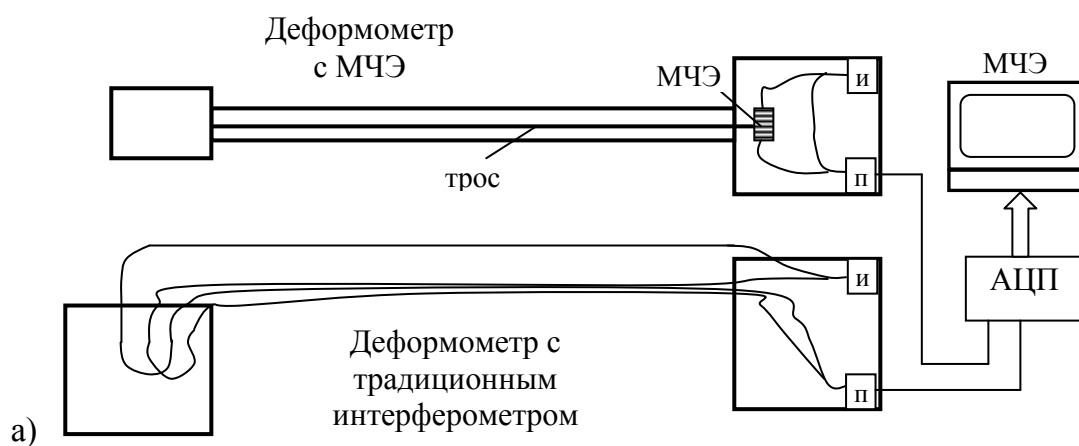
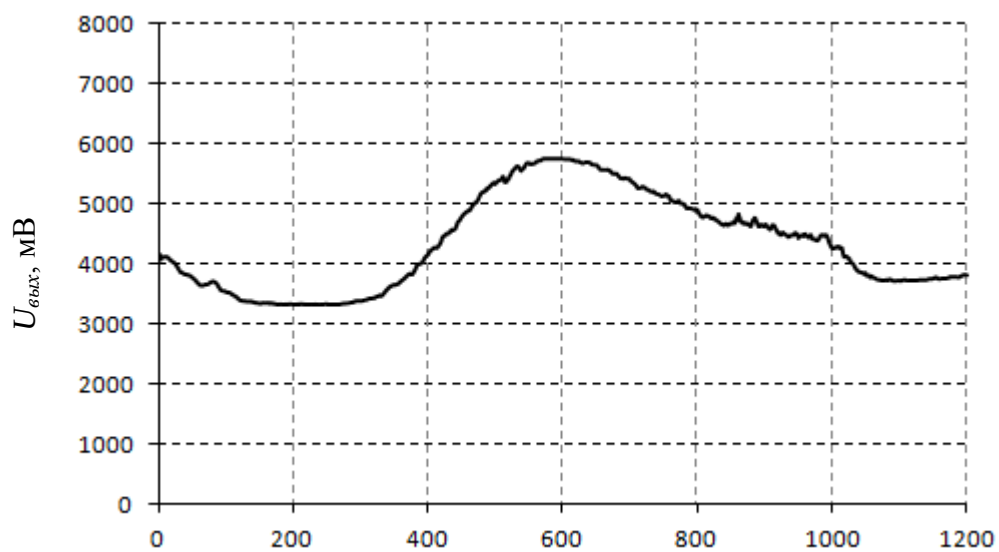
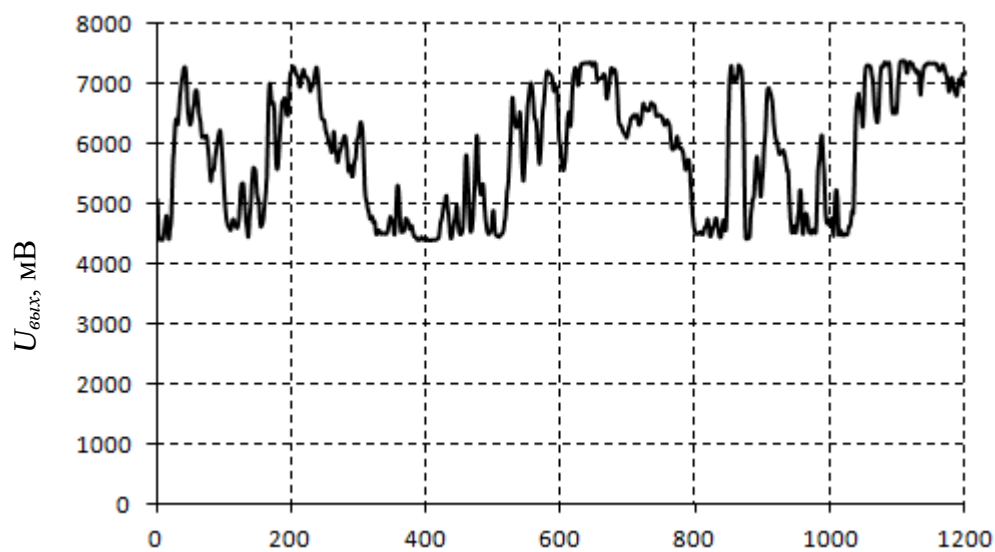


Рисунок 1.9 – Схема (а) и фотография (б) расположения деформометров в экспериментальной установке. и- излучатель, п- фотоприемник



а) Время, с



б) Время, с

Рисунок 1.10 – Зависимость выходного сигнала от времени для деформометра с применением многовиткового чувствительного элемента (а) и для традиционного деформометра (б)

2. Разработка принципов создания адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров с протяженной базой в задачах мониторинга крупномасштабных объектов

Высокая чувствительность волоконно-оптических интерферометров, в частности интерферометра Маха-Цендера, делает их в значительной степени подверженными влиянию внешних факторов (дрейф температуры окружающей среды, случайные механические воздействия и др.). Для обеспечения максимальной чувствительности интерферометра необходимо выполнить так называемое условие квадратуры, которое заключается в поддержании между интерферирующими пучками разности фаз $\pi/2$. Однако в силу своей высокой чувствительности интерферометр оказывается подверженным внешним воздействиям, в частности неконтролируемым изменениям внешних условий, что приводит к необходимости постоянно восстанавливать исходную разность фаз. Это привело к развитию различных методов решения проблемы фединга рабочей точки интерферометра Маха-Цендера, представляющих собой фактически методы демодуляции выходного сигнала интерферометра.

Наибольшее распространение получили два основных метода демодуляции [7]: метод активного гомодинного детектирования, при котором используется обратная связь для стабилизации интерферометра [8] и метод пассивного гомодинного детектирования, при котором оптические методы используются для создания выходных сигналов, исключающих попадание рабочей точки в область нулевой чувствительности [9]. Однако указанные методы гомодинного детектирования имеют ряд недостатков. Активная гомодинная демодуляция используется преимущественно в лабораторных условиях, так как имеет ограниченный динамический диапазон обратной связи и сложно реализуема в многоканальных измерительных системах. Методы пассивной демодуляции сложны в реализации, и зачастую не обеспечивают линейность передаточной характеристики измерительной системы. Другие методы, связанные с гетеродинной демодуляцией чрезвычайно сложны в реализации [10].

Демодуляция фазомодулированного сигнала в интерферометре должна осуществляться простым естественным образом, при этом должен обеспечиваться режим квадратурной модуляции и адаптация к медленному изменению фазы сигнала,

вызванному изменением температуры окружающей среды. По всей видимости, наиболее эффективным решением проблемы стабилизации рабочей точки интерферометра является применение на этапе демодуляции динамических голограмм, которые позволяют сделать интерферометр адаптивным. Динамическая голограмма записывается в фоторефрактивном кристалле непосредственно при попадании на него оптического излучения. Если меняются условия записи, то старая голограмма исчезает, а новая записывается в течение конечного времени. Голограмма, перезаписываясь, подстраивается под новые условия, сохраняя исходной значение средней разности фаз между интерферирующими световыми пучками, что позволяет интерферометру работать в изменяющихся внешних условиях.

Адаптивные интерферометры, основанные на использовании двух-волнового смещения в фоторефрактивных кристаллах (ФРК), являются высокоэффективными системами измерения малых фазовых изменений в условиях неконтролируемых воздействий окружающей среды. Под высокой эффективностью адаптивного интерферометра понимается высокая чувствительность и высокая помехозащищенность, обеспечиваемые интерферометрическим принципом измерения, голографическим принципом восстановления фронта световой волны (включая, сколь угодно сложные, например, спекловые) и адаптивными свойствами динамической голограммы, используемой для объединения световых пучков [11].

Отличие адаптивного интерферометра от классического заключается в том, что в первом вместо обычного светоделительного элемента (куба или зеркала) используется среда, в которой постоянно записывается динамическая голограмма [12]. Формирование голограммы происходит в фоторефрактивном кристалле непосредственно при попадании на него оптического излучения. Дополнительная обработка (проявление, фиксация и т.п.) не требуется. Таким же образом, при помощи света голограмма может быть стерта. Свет вызывает внутри кристалла перераспределение зарядов, и в течение характерного времени (времени записи) устанавливается динамическое равновесие между распределениями интенсивности записывающего света и электрического заряда. Если параметры световых волн, формирующих голограмму, изменяются быстро, за время меньше времени записи, то голограмма не успевает следовать за ними. К «быстрым» здесь следует отнести изменения, вызванные воздействием исследуемого объекта (или физической

величины). Для таких изменений голограмма будет «заморожена» (аналог статической голограммы), что обеспечит преобразование на ней световых волн и получение информации об объекте.

Если параметры световых волн меняются медленно (за время, превышающее характерное время записи), что, как правило, характерно для большинства температурных влияний или, например, медленного накопления механических напряжений в исследуемом объекте, то в кристалле запишется новая голограмма, заменив старую. Как следствие, изменения параметров световых волн, а, следовательно, и отрицательное влияние внешних факторов на измерительную систему будут компенсированы изменениями, произошедшими в голограмме. В этом заключается общий принцип адаптивности измерительной системы на основе применения динамических голограмм. Таким образом, динамическая голограмма является своего рода фильтром низких частот, что позволяет компенсировать влияние на интерферометр любых медленно изменяющихся внешних воздействий.

Разработанный на этапе 2 метод стабилизации параметров волоконно-оптического деформометра на основе интерферометра Маха-Цендера основан на применении адаптивных корреляционных фильтров, формируемых в фоторефрактивных кристаллах. Данный метод открывает перспективы создания адаптивных волоконно-оптических сенсоров с протяженной базой для решения задач мониторинга крупномасштабных объектов. К настоящему времени достаточно подробно изучены особенности формирования таких фильтров в фоторефрактивных кристаллах CdTe в коллинеарной и ортогональной геометрии для создания быстродействующих систем обработки оптических сигналов [11,13]. Для работы этих фильтров требуются значительные мощности оптического излучения (несколько сот милливатт), а быстродействие определяется временем записи фазовой голограммы в кристалле (порядка нескольких секунд). Однако для решения задач мониторинга крупномасштабных объектов чаще всего требуется регистрация низкочастотных сигналов. В этом случае корреляционный фильтр будет адаптироваться не только к температурному федингу рабочей точки, но также и к полезному сигналу, который, например, в случае регистрации колебаний земной коры, может иметь частоты от 0,01 до 1 Гц. Поэтому создание адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров с

протяженной базой в задачах мониторинга крупномасштабных объектов требует проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Как было показано на этапе 2 выполнения НИР, наиболее перспективным представляется использование ортогональной геометрии взаимодействия лучей в фоторефрактивном кристалле, которая позволяет реализовать поляризационно-независимую адаптивную демодуляцию оптического сигнала в интерферометре [13]. Это связано с тем, что динамическая голограмма, формируемая в ортогональной геометрии, обладает поляризационной селективностью, что делает возможным использовать в качестве объектной волны полностью деполаризованное излучение и, как следствие, снимает необходимость его поляризационной фильтрации. В частности становится возможным использовать многомодовый волоконный световод в измерительном плече интерферометра, что позволяет направлять большую мощность в измерительном канале, повысить чувствительность измерительной системы и полностью снимает проблему поляризационных шумов.

Как показали результаты исследований на предыдущих этапах выполнения НИР ФРК $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ (ВТО) является наиболее перспективным для создания адаптивных корреляционных фильтров для волоконно-оптических сенсоров мониторинга крупномасштабных объектов. Он, как и CdTe , относится к кристаллам с кубической симметрией, но особенностью кристалла является значительное время записи голограммы. Дополнительно увеличить время записи можно путем уменьшения мощности излучения взаимодействующих волн до значений порядка нескольких милливатт и менее.

На рисунке 2.1 представлена схема, а на рисунке 2.2 - фотография экспериментальной установки, предназначенной для исследования принципов создания адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров мониторинга крупномасштабных объектов.

Основой установки является модифицированный интерферометр Маха-Цендера, в котором интерференция волн на выходе заменена ортогональным взаимодействием в ФРК $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, который, как было указано выше, отличается большими временами записи решетки, что позволяет осуществлять демодуляцию изменений фазы, вызванных медленными процессами, например, сейсмосигналами. Более медленные

изменения фазы, вызванные температурным дрейфом вызовут лишь постепенную перезапись динамической голограммы в ФРК и не вызовут изменения выходного сигнала. Таким образом, достигается адаптивность работы интерферометра Маха-Цендера, на основе которого возможно создание адаптивных волоконно-оптических сенсоров мониторинга крупномасштабных объектов.

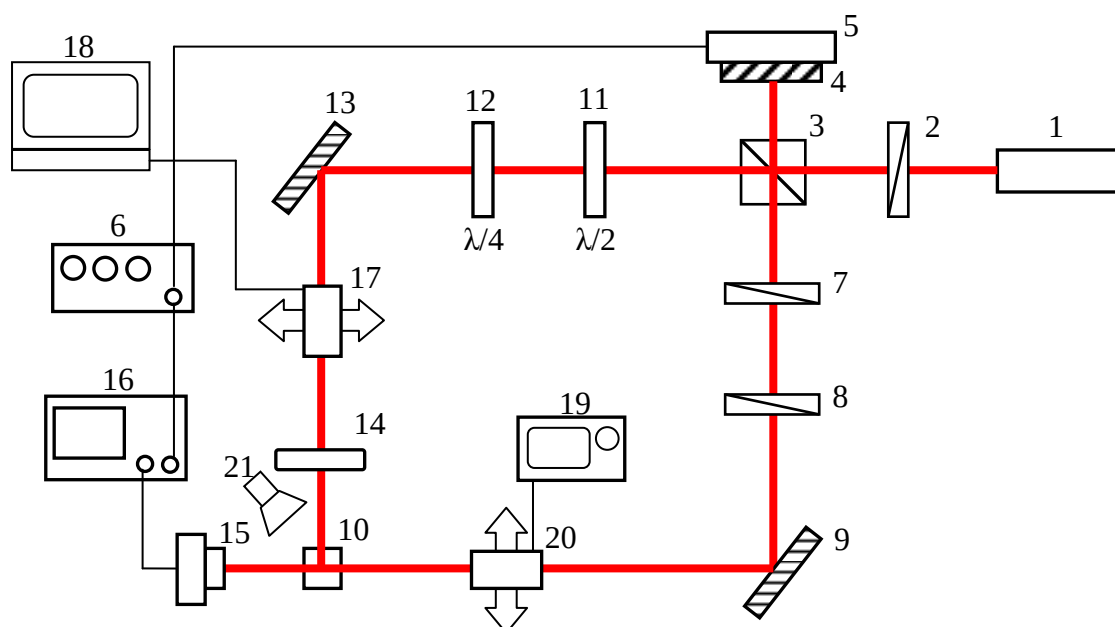


Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки, предназначенной для исследования принципов создания адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров мониторинга крупномасштабных объектов

Излучение He-Ne лазера (1) через поляризатор (2) направляется на светоделитель (3), в котором делится на два луча – сигнальный и опорный. Сигнальный луч попадает на подвижное зеркало (4) модулятора (5), управляемого генератором (6). Далее сигнальный луч, проходя через два поляризатора (7) и (8), отражается зеркалом (9) и направляется в ФРК (10). Опорный луч, проходя через полуволновую пластинку (11) и четвертьволновую пластинку (12), отражается зеркалом (13) и через цилиндрическую линзу (14) направляется

к сигнальному лучу. Прошедшее через ФРК в направлении сигнального луча излучение модулируется по интенсивности в соответствии с модуляцией фазы

сигнальной волны, что регистрируется фотоприемником (15). Осциллограф (16) осуществляет регистрацию сигнала демодуляции. Поляриметр (17) с ПК (18) обеспечивают контроль состояния поляризации опорной и сигнальной волн. Измеритель мощности оптического излучения (19) с измерительной головкой (20) используется для измерения мощности сигнальной и опорной волн. Галогеновая лампа (21) используется для стирания голограммы в ФРК.

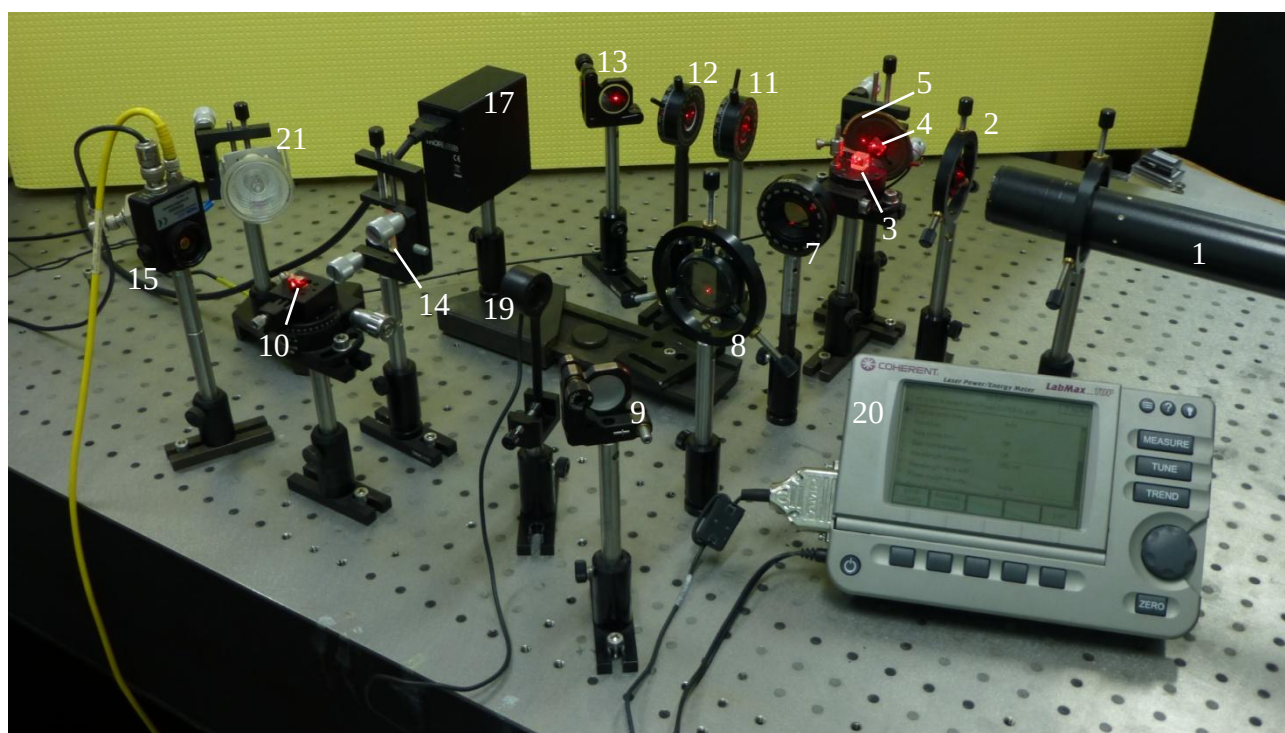


Рисунок 2.2 – Фотография экспериментальной установки, предназначенной для исследования принципов создания адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров мониторинга крупномасштабных объектов

В случае применения в качестве ФРК кристалла CaTe для эффективной демодуляции необходимо, чтобы опорная волна имела эллиптическую поляризацию [13]. При этом максимальный сигнал демодуляции наблюдается при определенных значениях степени эллиптичности, азимута и отношения мощностей опорной и сигнальной волн.

Для определения оптимальных условий формирования максимального сигнала фазовой демодуляции для кристалла ВТО были получены зависимости величины

сигнала демодуляции от эллиптичности опорной волны, от азимута опорной волны, а также от отношения мощностей опорной и сигнальной волн, представленные на рисунках 2.3, 2.4 и 2.5 соответственно.

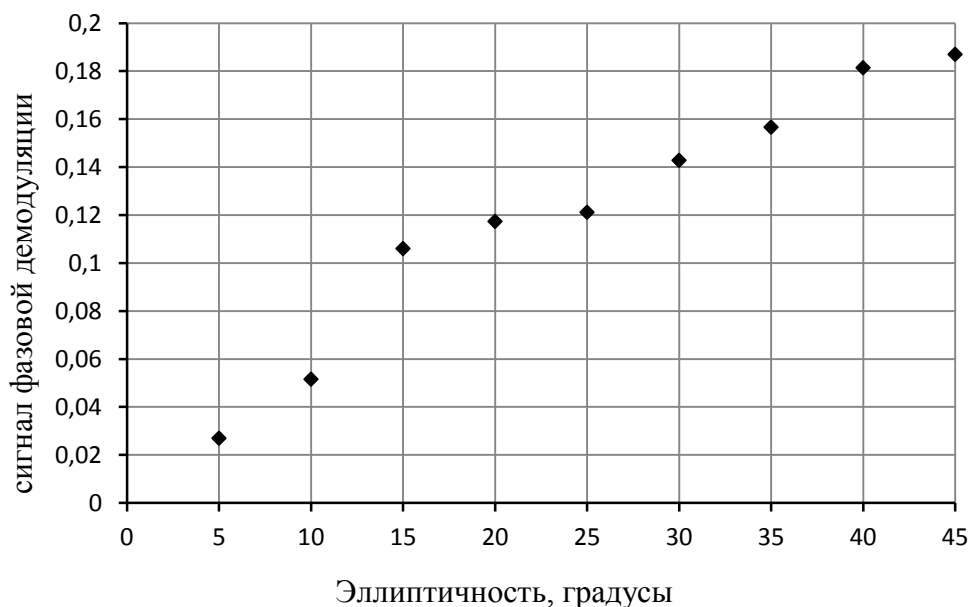


Рисунок 2.3 – Зависимость величины сигнала фазовой демодуляции от эллиптичности опорной волны при азимуте 73° и соотношении сигнальной и опорной волн равном 2.

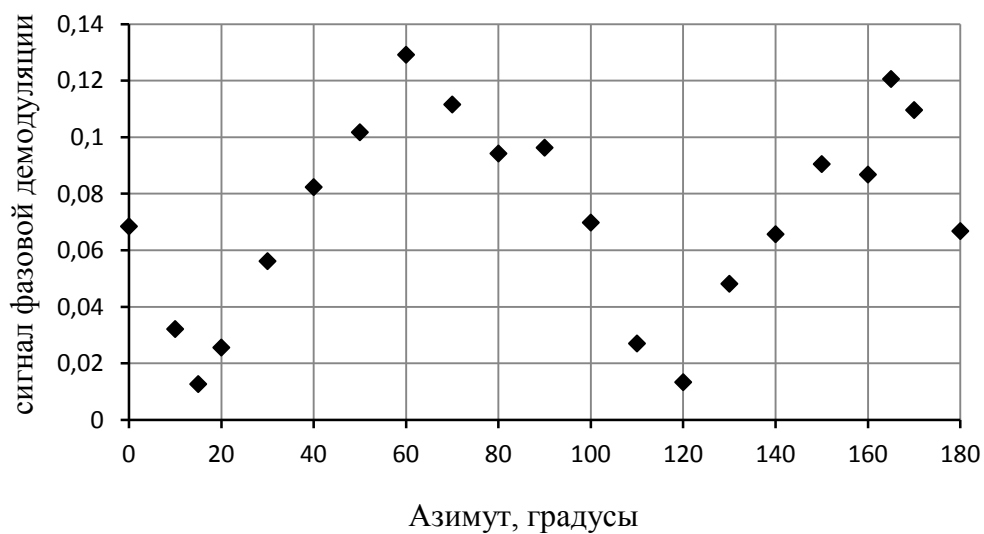


Рисунок 2.4 – Зависимость величины сигнала фазовой демодуляции от азимута опорной волны при эллиптичности 2° и соотношении сигнальной и опорной волн равном 2

Сигнал фазовой демодуляции определяется как отношение размаха модуляционного сигнала на выходе фотоприемника к постоянной составляющей.

Как видно из рисунка 2.3, максимальный сигнал фазовой демодуляции наблюдается при эллиптичности равной 45° , что соответствует круговой поляризации опорной волны, и составляет 0,185. Эти результаты отличаются от результатов, полученных для кристалла CdTe, где максимальный сигнал фазовой демодуляции наблюдался при степени эллиптичности около 2° . Данное расхождение связано с тем, что кристалл ВТО обладает двулучепреломлением, в результате чего состояние поляризации опорной волны в кристалле изменяется.

Из рисунка 2.4 видно, что при эллиптичности 2° действительно сигнал фазовой демодуляции не достигает максимального значения. При этом максимум 0,13 наблюдается при азимуте 60° , что также отличается от значения, получаемого для кристалла CdTe. Это также связано с особыми гиротропными свойствами кристалла ВТО, который доворачивает эллипс поляризации при прохождении излучения через кристалл.

На рисунке 2.5 представлена зависимость величины сигнала фазовой демодуляции от отношения интенсивностей сигнальной и опорной волн.



Рисунок 2.5 – Зависимость величины сигнала фазовой демодуляции от отношения интенсивностей опорной и сигнальной волн

Как видно из рисунка, максимальный сигнал фазовой демодуляции наблюдается при отношении интенсивностей 15. При этом мощность сигнальной волны составила всего 0,11 мВт, а опорной 1,67 мВт.

Для определения быстродействия адаптивного корреляционного фильтра на основе фоторефрактивного кристалла ВТО, предназначенного для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров мониторинга крупномасштабных объектов, были проведены экспериментальные исследования времени записи голограммы в ФРК. На рисунке 2.6 представлена временная зависимость сигнала фазовой демодуляции, записанная в процессе формирования голограммы в ФРК.

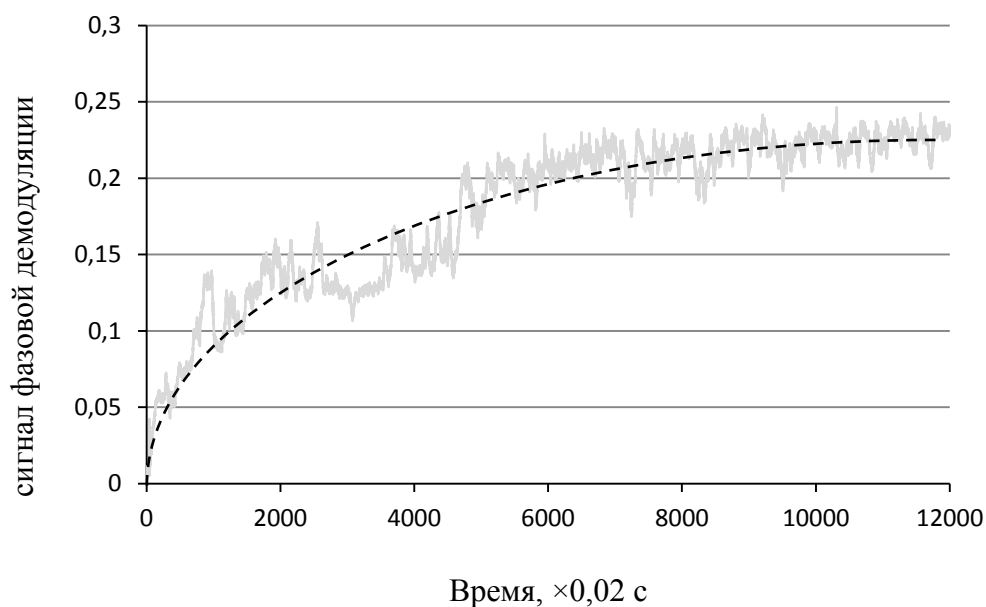


Рисунок 2.6 – Временная зависимость сигнала фазовой демодуляции в процессе формирования голограммы в ФРК

Как видно из рисунка, время записи голограммы в кристалле ВТО составляет 4 минуты.

3 Обобщение и оценка полученных результатов

3.1 Обобщение результатов исследований

В ходе выполнения научно-исследовательских работ на этапах 1-4 выполнения НИР получены следующие результаты.

Выполнен аналитический обзор информационных источников, раскрывающий современное состояние в области разработки принципов и систем мониторинга крупномасштабных объектов. Выполнена оценка потенциала применения методов волоконной и нелинейной оптики в задачах мониторинга крупномасштабных объектов. Анализ современного состояния в указанной области исследований позволил выявить нерешенные проблемы и определить актуальные задачи мониторинга крупномасштабных объектов. Результаты анализа свидетельствуют о перспективности выбранного подхода в создании нового класса адаптивных волоконно-оптических систем дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов на основе средств волоконной оптики. Обзор выявил практическое отсутствие данных по созданию адаптивных систем мониторинга, что свидетельствует о несомненной новизне выбранного направления и позволит в дальнейшем обеспечить приоритет в данной области на мировом уровне.

Исследования проводились по четырем направлениям.

Первое направление предполагает разработку адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов на основе применения межмодовой интерференции в многомодовых волоконных световодах с последующей оптоэлектронной обработкой формируемых при этом стохастических оптических полей.

В результате проведенных исследований разработана физико-математическая модель процессов измерения параметров линейных перемещений крупномасштабных объектов и сред на основе принципа оптоэлектронной обработки стохастических оптических полей, формируемых многомодовыми волоконными световодами. Результаты исследования модели показали, что величина деформации одноволоконного многомодового интерферометра может быть однозначно связана с величиной деформации и линейного перемещения объекта с закрепленным на его поверхности либо в объеме интерферометром. Эти результаты послужили основой

для разработки оптоэлектронного цифрового корреляционного способа обработки сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров, обеспечивающего измерение параметров линейных деформаций крупномасштабных объектов. Определены оптимальные условия обработки, обеспечивающие максимальную эффективность при извлечении количественной информации о внешних физических воздействиях на интерферометр и дающие возможность автоматического определения и компенсации погрешности измерений, связанной с температурными перепадами, старением источника излучения и другими неконтролируемыми факторами.

На основе полученных теоретических результатов разработана технология многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью. Создан экспериментальный макет многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью. Проведено экспериментальное исследование функционирования многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью, которое позволило определить оптимальную архитектуру максимальное количество измерительных каналов указанной системы и способы минимизации перекрестных помех между измерительными каналами.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты обеспечивают возможность создания адаптивных многоканальных систем мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью.

Второе направление предполагает разработку адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов на основе волоконно-оптических брэгговских решеток. В рамках данного направления в настоящее время во всем мире ведутся интенсивные исследования в области создания волоконно-оптических систем мониторинга крупномасштабных объектов. Для обеспечения мирового уровня

получаемых результатов в ходе выполнения НИР был использован высокий потенциал иностранного партнера – Даляньского технологического университета, ученые которого накопили значительный опыт создания измерительных систем на основе волоконно-оптических решеток Брэгга.

В результате проведенных совместно с Даляньским технологическим университетом исследований разработана физико-математическая модель процессов измерения напряжения и температуры крупномасштабных объектов и сред на основе комбинированного метода опроса и мультиплексирования сигналов волоконно-оптических брэгговских измерительных преобразователей. Исследованы особенности волоконных брэгговских решеток применительно к разработке принципов детектирования и мультиплексирования их сигналов методом оптической временной рефлектометрии. Показано, что механическое напряжение и изменение температуры брэгговской решетки приводят к амплитудной модуляции отраженного от ВБР излучения коротких лазерных импульсов. При этом регистрируемый рефлектометрическим способом отраженный оптический сигнал прямо пропорционален измеряемому воздействию при выполнении следующих условий:

Проведено теоретическое исследование зависимости регистрируемых сигналов от спектральных сдвигов опрашиваемых ВБР-датчиков для реализации рефлектометрического метода регистрации сигналов ВБР-датчиков в широком спектральном диапазоне. Показано, что предложенная топология измерительной системы открывает возможность измерения резонансной длины волны опрашиваемых ВБР-датчиков в сколь угодно широком спектральном диапазоне, который ограничен только количеством используемых опорных ВБР. Пороговая чувствительность предложенного метода при регистрации относительного удлинения ВБР-датчиков $\sim 50 \cdot 10^{-6}$. Оптимальный спектральный промежуток между соседними опорными брэгговскими решетками составляет $\Delta\lambda = 2 \cdot \lambda_{FWHM}$, где λ_{FWHM} – полуширина спектра отражения ВБР.

Разработан метод спектрально-временного разделения сигналов от измерительных волоконных брэгговских решеток при их зондировании нано- и микросекундными лазерными импульсами, сформированными с использованием внешнего перестраиваемого полосового фильтра, с учетом условий записи брэгговских решеток, обеспечивающие максимальную чувствительность волоконно-

оптических информационно-измерительных систем на основе волоконных брэгговских решеток показателя преломления. Результаты работ по определению оптимальных схем установки опорных волоконных брэгговских решеток в измерительной системе, выполненных иностранным партнером, Даляньским технологическим университетом, обеспечили адаптивность выходного сигнала измерительной системы к флуктуациям мощности световых источников.

На основе полученных теоретических результатов разработана технология системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток. Иностранным партнером, Даляньским технологическим университетом, проведены работы по созданию экспериментального макета системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток. Проведено экспериментальное исследование функционирования данного макета. Иностранным партнером определены оптимальные параметры системы мониторинга температурных и деформационных распределений, при которых достигаются наилучшие чувствительность и динамический диапазон. Полученные результаты позволили получить характеристики, превышающие характеристики соответствующих аналогов.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты обеспечивают возможность создания адаптивных систем мониторинга температурных и деформационных распределений крупномасштабных объектов на основе волоконных брэгговских решеток.

Третье направление предполагает разработку адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера.

В результате проведенных исследований разработана физико-математическая модель длиннбазового деформометра на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера для регистрации линейных деформаций крупномасштабных объектов и сред. Расчеты с использованием разработанной математической модели показывают, что применение многовиткового чувствительного элемента в измерительном плече интерферометра обеспечивает

возможность регулирования таких параметров измерительного устройства как чувствительность и диапазон измерений, что необходимо при разработке устройств мониторинга крупномасштабных объектов. Разработан метод стабилизации параметров длиннобазового деформометра на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера, предполагающий применение нелинейных оптических сред. Применение данного метода обеспечивает адаптивность деформометра к изменению температуры окружающей среды, исключая тем самым фединг рабочей точки интерферометра.

На основе полученных теоретических результатов разработана технология создания деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Создан экспериментальный макет деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Проведены экспериментальные исследования функционирования деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Определены оптимальные характеристики устройства.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты обеспечивают возможность создания адаптивных систем мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе волоконно-оптических интерферометров Маха-Цендера.

Четвертое направление предполагает разработку адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов на основе регистрации сейсмоакустических сигналов, основанных на применении волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Разработан метод регистрации сейсмосигналов с использованием волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера и многовиткового чувствительного элемента. Показана возможность регистрации сейсмосигналов с использованием разработанного метода.

На основе полученных теоретических результатов разработана технология создания сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра. Создан экспериментальный макет сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Проведено экспериментальное исследование сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера на

сейсмостанции г.Владивостока. Проведена регистрация реальных землетрясений, происходивших у берегов Японии.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты обеспечивают возможность создания адаптивных систем мониторинга крупномасштабных объектов на основе регистрации сейсмоакустических сигналов, основанных на применении волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера.

Разработанные в результате выполнения настоящей НИР адаптивные системы удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения обладают следующими достоинствами:

- способность адаптации к нежелательным изменениям условий окружающей среды, что обеспечивает высокую стабильность их работы;
- высокая чувствительность, обеспечиваемая применением спектральных и интерферометрических измерительных преобразователей;
- высокая помехозащищенность, обусловленная применением волоконно-оптической элементной базы, невосприимчивой к электромагнитным помехам.

3.2 Сопоставление анализа научно-информационных источников и результатов теоретических и экспериментальных исследований

Как показывает анализ литературы, одним из наиболее перспективных типов волоконно-оптических датчиков на сегодняшний день являются спектральные измерительные преобразователи на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР). Брэгговская решетка представляет участок волоконного световода с модулированным показателем преломления вдоль оптической оси световода. Такая решетка обеспечивает связь вперед и назад распространяющихся направляемых мод ВС на резонансной длине волны, что приводит к отражению узкой спектральной составляющей излучения, распространяющегося по волоконному световоду. При воздействии на световод с ВБР температуры, механического напряжения или другого физического эффекта, приводящего к изменению периода решетки или эффективного показателя преломления основной направляемой моды, происходит изменение длины волны отраженной компоненты, величина которого линейно зависит от

интенсивности внешнего воздействия. Регистрация этого эффекта позволяет измерить внешнее воздействие с высокой точностью.

Датчики на основе ВБР обладают такими преимуществами, как простота оптической схемы чувствительного элемента, минимальные массогабаритные показатели, высокая точность измерений, помехоустойчивость по отношению к флуктуациям интенсивности оптического излучения, простота организации удаленных измерений, мультиплексирования и объединения большого количества чувствительных элементов в единую измерительную систему. Поэтому волоконно-оптические измерительные преобразователи на основе брэгговских решеток в настоящее время все шире применяются в области мониторинга технических объектов и сооружений. Однако, существенной проблемой при практическом использовании брэгговских решеток является сложность и, как следствие, чрезмерно высокая стоимость спектральных систем для детектирования сдвига резонансной длины волны ВБР. В настоящей НИР предложен рефлектометрический метод регистрации сигналов брэгговских датчиков с комбинированным спектрально-временным разделением измерительных каналов и широким диапазоном регистрируемых относительных удлинений / температур. Данный метод основан на зондировании системы ВБР короткими лазерными импульсами и измерении мощности возникающих при этом отраженных импульсов при помощи стандартного волоконно-оптического рефлектометра. При этом для обеспечения максимально широкого диапазона регистрации сигналов, формируемых волоконными брэгговскими решетками, была предложена специализированная топология измерительной системы с использованием нескольких опорных ВБР. Данная топология позволила проводить измерения деформаций и температур ВБР в диапазоне, ограниченном исключительно характеристиками используемых волоконных световодов, с использованием стандартного и широкодоступного рефлектометрического оборудования. Это позволяет в 4-5 раз снизить затраты на построение системы мониторинга на основе ВБР и открывает недоступные ранее возможности экономически эффективного применения брэгговских датчиков для решения широкого круга измерительных задач в области мониторинга техногенных объектов.

В соответствии с разработанной технологией, система мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток включает в себя стандартный оптический рефлектометр и две волоконные линии, соединяемые при помощи циркулятора, одна из которых содержит ВБР-датчики, а вторая – две опорные перестраиваемые брэгговские решетки. Параметры ВБР-датчиков и опорных брэгговских решеток подбираются таким образом, что получаемая в результате измерений рефлектограмма содержит два пика отражения от каждой из опрашиваемых ВБР, отношение амплитуд которых прямо пропорционально относительному удлинению и температуре соответствующего ВБР-датчика. Для обеспечения возможности регистрации сигналов датчиков в широком спектральном диапазоне в системе предусмотрена возможность использования несколько опорных ВБР. В этом случае, когда сигнал ВБР-датчика выходит за пределы рабочего диапазона между резонансными длинами волн двух опорных ВБР, рабочим становится диапазон между длинами волн следующей пары опорных решеток и т.д. Такой подход позволяет проводить измерения длины волны ВБР-датчика в сколь угодно широком диапазоне, ограниченном только пределом прочности волоконного световода (при измерении деформации) или его предельными термическими характеристиками (при регистрации температурных распределений).

Другой ключевой особенностью разработанной технологии является то, что в предлагаемой системе мониторинга реализовано комбинированное спектрально-временное разделение измерительных каналов, что обеспечивает возможность мультиплексирования в составе единой волоконной линии до нескольких сотен измерительных преобразователей.

В настоящее время на мировом рынке систем регистрации сигналов волоконных брэгговских датчиков присутствует несколько компаний-производителей: Micron Optics, Inc. (США) [14], FOSTA Pte Ltd (Сингапур) [15], FiberSensing (Португалия) [16], National Instruments (США) [17], BaySpec, Inc (США) [18], Ibsen Photonics (Дания) [19], Smart Fibres Limited (Великобритания) [20] и др. Предлагаемые данными компаниями приборы для регистрации и мультиплексирования сигналов, формируемых брэгговскими волоконными решетками, могут базироваться на различных принципах. Один из распространенных подходов использует

измерительный блок на основе сканирующего оптического анализатора спектра, при помощи которого резонансные длины волн опрашиваемых ВБР регистрируются в отраженном или пропущенном через брэгговские решетки свете. Для таких систем, как правило, характерна высокая точность регистрации внешнего воздействия на ВБР, при относительно высокой стоимости и низкого быстродействия измерительного оборудования.

В других системах используются более высокоскоростные спектрометры с ПЗС матрицей, перестраиваемые фильтры Фабри-Перо и перестраиваемые лазеры. Метод регистрации резонансной длины волны ВБР на основе спектрометра с ПЗС матрицей использует свойство дифракционной решетки отражать оптическое излучение под разными углами в зависимости от длины волны. В данной схеме детектирования последовательно записываемые брэгговские дифракционные решетки в нескольких волоконных линиях, облучаются с помощью волоконно-оптического разветвителя одним широкополосным источником излучения. Отражаемое от ВБР излучение из всех волоконных линий направляется на изогнутую дифракционную решетку, с помощью которой сигналы от каждой из брэгговских решеток направляются на прямоугольную ПЗС-матрицу так, чтобы обеспечить пространственное разделение сигналов ВБР с одной волоконной линии по одной оси матрицы, и пространственное разделение излучения из разных волоконных линий по ортогональной оси. Обработка выходного сигнала ПЗС матрицы позволяет извлечь информацию о резонансной длине волны (следовательно, о величине регистрируемого воздействия) каждой из ВБР на каждой из волоконных линий.

Демодуляция сигналов чувствительных элементов на ВБР на основе применения перестраиваемых фильтров (Фабри-Перо, акустооптический фильтр) или перестраиваемого лазера состоит в сканировании заданного спектрального диапазона полосой пропускания фильтра или спектром генерации перестраиваемого лазера с одновременной регистрацией максимумов отраженной оптической мощности на длинах волн, соответствующих резонансным длинам волн каждой из опрашиваемых ВБР.

В целом для имеющихся в настоящее время на рынке спектральных систем детектирования сигналов измерительных преобразователей на основе ВБР характерна относительно высокая стоимость, что обусловлено сложностью конструкции, а также

высокими требованиями по стабилизации и юстировке элементов оптических схем. При этом количество мультиплексируемых в составе единой волоконной линии брэгговских решеток оказывается недостаточным для построения систем мониторинга крупномасштабных объектов.

Система опроса ВБР-датчиков может быть существенно упрощена и удешевлена при переходе к амплитудному принципу регистрации сигналов. В этом случае сдвиг резонансной длины волны ВБР при помощи спектрально селективного оптического элемента преобразуется в амплитудно-модулированный оптический сигнал. Такие приборы, как правило, имеют простую конструкцию и невысокую стоимость, обеспечивают измерение резонансной длины волны дифракционной решетки с приемлемой для многих практических применений точностью на уровне 10^{-4} . Однако их существенным недостатком является сложность мультиплексирования оптических сигналов нескольких брэгговских дифракционных решеток, записанных в одной волоконно-оптической линии, что в случае применения ВБР для мониторинга крупномасштабных и протяженных объектов является критическим требованием.

С точки зрения наилучшего соотношения цена-качество из систем опроса брэгговских датчиков, имеющихся в настоящее время на рынке, можно выделить следующие: Smart Fibers W4-2 (стоимость: 625 000 руб, количество мультиплексируемых датчиков в измерительном канале: 25, разрешение 10 пм, спектральный диапазон 1520 – 1570 нм, массогабаритные показатели: 114x234x132 см, 2 кг.); FBG Interrogator Fiber Sensing FS2100 (стоимость: 590 000 руб, разрешение: 2 пм, количество мультиплексируемых датчиков в измерительном канале: 25, массогабаритные показатели: 27,5x15,5x12 см, 4 кг), Smart Scan FBG Interrogator (стоимость: 450 000 руб., количество мультиплексируемых датчиков в измерительном канале: 16, массогабаритные показатели 14x11,5x8,5 см, 1 кг.), Fiber Sensing FS4100 (стоимость: 1 260 000 руб., разрешение: 1 пм, количество мультиплексируемых датчиков: 25, массогабаритные показатели 36x27,5x10 см, 7,3 кг.)

Таким образом, как следует из приведенных данных, имеющиеся на рынке системы демодуляции сигналов волоконно-оптических измерительных преобразователей на основе ВБР отличаются высокой стоимостью, которая ограничивает их широкое практическое использование, кроме того невысокое количество мультиплексируемых ВБР не позволяет эффективно осуществлять

мониторинг протяженных и крупномасштабных объектов. Разработанная в настоящем проекте система мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток базируется на использовании стандартного и широкодоступного рефлектометрического оборудования. Поэтому ее стоимость, которая оценивается в 80 000 руб, - в несколько раз ниже аналогов. Использование в составе предлагаемой системы слабоотражающих волоконных брэгговских решеток в сочетании с комбинированным спектрально-временным разделением измерительных каналов обеспечивает возможность опроса до 400 чувствительных элементов в составе единой волоконной линии.

На начальном этапе развития волоконно-оптических средств мониторинга широкое распространение получили системы на основе волоконно-оптических брэгговских дифракционных решеток (ВБР), которые представляют собой участок волоконного световода с гармонически (как правило) модулированным показателем преломления вдоль оптической оси световода. Внешнее воздействие на световод приводит к изменению периода решетки или эффективного показателя преломления основной направляемой моды, что, в свою очередь, изменяет длину волны компоненты излучения, отражающейся от решетки в обратном направлении. За счет регистрации спектральных изменений отраженного излучения датчики на основе ВБР позволяют с высокой точностью измерить локальное напряжение [23], обладая при этом относительно невысокой стоимостью и демонстрируя высокую стабильность измерений. Спектральные сигналы различных ВБР могут быть отдельно зафиксированы на выходе единственного волоконного световода, что позволяет создавать мультиплексированные измерительные системы. Тем не менее, каждый датчик в составе такой измерительной системы остается точечным, поскольку изготовление решеток длиной более нескольких сантиметров сопряжено со значительными технологическими трудностями. При этом существует ненулевая вероятность того, что деформационное напряжение возникнет в иной точке, чем место размещения датчика, что может привести к неверной интерпретации результатов измерений. Поэтому при необходимости измерений параметров деформаций вдоль протяженных участков контролируемых объектов целесообразно использовать системы с протяженным чувствительным элементом.

В качестве такого элемента может быть использован обычный волоконный световод (ВС), поскольку интегральное деформационное воздействие на ВС любой протяженности вызывает соответствующую модуляцию фазы направляемой по нему световой волны. Однако существующие фотоприемники не регистрируют фазу световой волны непосредственно, поэтому требуется преобразовать фазовый сигнал в амплитудный, что достигается использованием различных интерферометрических схем.

Использование интерферометрических двухплечевых схем Маха-Цендера и Майкельсона обеспечивает высокую чувствительностью ВОИП к деформационным воздействиям, однако изоляция опорного световодного плеча от влияния внешних неконтролируемых представляет сложную техническую проблему. Одноплечевые схемы Фабри-Перо и «low-coherence» схемы лишены недостатков, связанных с наличием опорного канала, однако остающаяся высокая температурная чувствительность вследствие сильной температурной зависимости показателя преломления кварцевой сердцевинной чувствительного световода затрудняет применение указанных схем для проведения измерений параметров деформаций.

В ходе выполнения настоящей НИР предложен иной тип одноволоконного интерферометра, основанный на интерференции мод, возбуждающихся в сердцевине многомодового световода. Изменение фаз мод в результате деформационного воздействия приводит к изменению спекловой картины, формирующейся на выходе световода. В этом предельно простом с точки зрения оптической схемы интерферометре влияние температуры одинаково сказывается на показателе преломления для всех направляемых в световоде мод, поэтому температурная стабильность работы данного интерферометра оказывается значительно лучше, чем у рассмотренных выше схем. В ходе выполнения НИР удалось получить однозначную функциональную зависимость между коэффициентом корреляции спекловых полей, формируемых ОМИ, и удлинением волоконного световода в составе интерферометра, а также показать, что использование ПЗС в схеме корреляционной обработки спекл-сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров (ОМИ) открывает перспективу создания не только отдельных измерительных преобразователей, но и многоканальных волоконно-оптических измерительных систем за счет регистрации выходного сигнала на выходе множества датчиков на основе ОМИ единой матрицей с

синхронной обработкой информации при помощи ЭВМ, сопряженной с измерительной системой. Такой подход открывает перспективу создания как многомерных измерительных систем, систем томографического типа, а также систем мониторинга с распределенной чувствительностью.

В соответствие с разработанной технологией многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью основана на обработке сигналов одноволоконного многомодового интерферометра ПЗС матрица видеокамеры регистрирует опорное изображение спекл-картины, формируемой ОМИ, соответствующее начальному состоянию волоконного световода (ВС) в интерферометре. Деформация световода вследствие внешних воздействий приводит к изменению пространственного расположения спеклов в регистрируемой ПЗС матрицей картине. Сравнение спекл-сигналов до и после деформационного воздействия на ВС производится корреляционным способом. Световые пучки, сформированные непосредственно на выходе из ВС, имеют сравнительно небольшую угловую апертуру, что позволяет направлять на чувствительную поверхность ПЗС неперекрывающиеся в пространстве пучки из нескольких чувствительных световодов одновременно. Это дает возможность обработки спекл-сигналов от нескольких волоконных световодов и позволяет организовать многоканальную волоконно-оптическую измерительную систему, объединяющую большое количество измерительных преобразователей. Информационный массив, описывающий распределение интенсивности регистрируемого светового поля, вводится в ЭВМ, причем данные о каждой из спекл-картин выделяются из общего массива при помощи специального алгоритма и затем обрабатываются методами, изложенными выше. В результате этого компьютер формирует массив информации об удлинении каждого из ОМИ, входящего в состав многоканальной измерительной системы.

Корреляционная обработка сигналов всех волоконных световодов в составе многоканальной измерительной системы осуществляется за одно считывание сигнала ПЗС матрицы, поэтому быстродействие указанной измерительной системы будет определяться быстродействием ПЗС и для используемого прибора составляет 25 Гц.

Дальнейшее увеличение быстродействия может быть достигнуто за счет применения высокоскоростных устройств ПЗС.

В настоящее время на мировом рынке для мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов наиболее часто используются системы мониторинга на основе волоконно-оптических брэгговских дифракционных решеток (ВБР) [23-27], а также резистивных тензометрических сенсоров (РТС) [28]. Производством указанных систем занимается множество компаний-производителей, среди которых можно отметить следующие: Micron Optics, Inc. (США) [21], FOSTA Pte Ltd (Сингапур) [22], FiberSensing (Португалия) [23], National Instruments (США) [24], BaySpec, Inc (США) [25], Ibsen Photonics (Дания) [26], Smart Fibres Limited (Великобритания) [27], Japan Measurement Technologies (Япония) [28] и др.

В целом для имеющихся в настоящее время на рынке систем мониторинга напряженно-деформированного состояния на основе ВБР характерна относительно высокая стоимость, что обусловлено сложностью конструкции, а также высокими требованиями по стабилизации и юстировке элементов оптических схем. Так, в средняя оценочная стоимость такой системы составляет от 450 тыс. руб. и выше, что более чем на порядок превышает стоимость разработанной в настоящем проекте системы. При этом количество мультиплексируемых в составе единой волоконной линии ВБР оказывается недостаточным для построения систем мониторинга крупномасштабных объектов.

Сравнение разработанной в настоящем проекте системы мониторинга на основе ОМИ с широко распространенными РТС показывает, что они с успехом могут заменить тензодатчики при решении задач изучения деформационных процессов в элементах железобетонных балок, ферм и иных конструкций. Кроме того, одноволоконные многомодовые интерферометры позволяют получить ряд дополнительных преимуществ при решении указанных задач по сравнению с традиционными средствами мониторинга, таких как возможность исследования деформационных процессов в толще конструкции и исследования пластических деформаций.

В области мониторинга состояния крупномасштабных объектов наибольший интерес представляет измерение параметров полей деформаций. Для решения этой

задачи применяются: амплитудные ВОД, датчики на основе волоконных решеток Брэгга, датчики с распределенной чувствительностью на основе бриллюэновского и рамановского рассеивания, датчики с интегральной чувствительностью на основе волоконно-оптических двуплечевых интерферометров Майкельсона и Маха-Цендера.

Амплитудные ВОД не обеспечивают требуемой точности и чувствительности. ВОД на основе волоконных решеток Брэгга, а также бриллюэновского и рамановского рассеяния требуют либо применения сложных методов обработки выходных сигналов, либо использования дорогостоящей аппаратуры. Поэтому интерферометрические ВОД на основе двуплечевых интерферометров, не требующие дополнительной обработки выходных сигналов, представляются наиболее перспективными с точки зрения создания длиннобазовых деформометров для решения практических задач мониторинга крупномасштабных объектов.

Так как разработанная технология предполагает создание деформометров с интегральной чувствительностью, предназначенных для измерения суммарных по длине базы деформаций, ограничимся рассмотрением только соответствующих аналогов. Системы с распределенной чувствительностью в настоящем отчете не рассматриваются, так как относятся к другой технологии, разрабатываемой в рамках выполняемой НИР.

Волоконно-оптическая измерительная система SOFO [29] швейцарской фирмы «Smartec» основанная на применении технологии низкокогерентной интерферометрии является наиболее широко распространенным средством мониторинга крупномасштабных объектов. Данная система получила распространение по всему миру, а фирма-изготовитель имеет представительства во всех развитых странах. В России распространение продукции «Sartec» осуществляет ООО «Мониторинг Солюшнс». Особенностью измерительной системы SOFO, предназначенной для измерения деформаций крупномасштабных объектов, является независимость выходного сигнала от интенсивности источника излучения. Основные характеристики: длина базы от 0,25 до 10 м (20 м по спецзапросу); пороговая чувствительность к деформации – 2 мкм; диапазон измерений – 0,5% от длины базы; погрешность измерений 0,2% от измеренного значения. Следует отметить принципиальную невозможность осуществления непрерывного измерения, что обусловлено особенностями регистрации деформаций при низкокогерентной

интерферометрии. Также следует отметить необходимость размещения измерительной части системы в специальном защитном кожухе, что снижает метрологические характеристики при увеличении длины измерительной базы свыше 2 м.

Другая измерительная система той же фирмы – волоконно-оптическая система MuST [29] основана на применении волоконных решеток Брэгга для несвойственных им интегральных измерений. Основные характеристики: длина базы от 0,2 до 2 м; пороговая чувствительность к деформации – 0,2 $\mu\epsilon$ (что при длине базы в 10 м составляет 2 мкм); диапазон измерений – 0,5% от длины базы; погрешность измерений 2 $\mu\epsilon$ (для длины базы 10 м составляет 20 мкм). Следует отметить присущую всем спектральным ВОД сложность регистрации выходного сигнала, требующую применения оптического спектроанализатора. Учет влияния температуры осуществляется с использованием дополнительной волоконной решетки Брэгга, расположенной вне зоны деформации.

Альтернативный подход к интегральным измерениям деформаций протяженных объектов состоит в применении обычных неволоконных интерферометров, получивших название лазерных интерферометров-деформометров. Однако, подобные установки обладают сверхвысокой чувствительностью, которая приближается к 10^{-12} м и поэтому требуют специального монтажа в шахтах. Их база варьируется от 5 до 100 м. Основное применение – мониторинг сейсмической активности и подвижек земной коры, применение их на техногенных объектах нецелесообразно. Уникальность подобных измерительных систем приводит к тому, что массовое производство отсутствует, производство и монтаж осуществляется научными или научно-производственными учреждениями. Лазерный интерферометр-деформометр является стационарной системой, однако в последнее время на рынке наукоемких технологий появились мобильные интерферометрические системы, которые обладают определенной мобильностью, но так же требуют строительства специальных укрытий для монтажа. Они являются наиболее близким аналогом разрабатываемой технологии из неволоконных интегрирующих измерительных систем.

В качестве примера можно привести мобильный лазерный интерферометр-деформограф, которым располагает Тихоокеанский океанологический институт [30]. Основные характеристики интерферометра: пороговая чувствительность 10^{-10} м,

динамический диапазон до 180 дБ. Длина базы 2,5 м. Весь путь луча лазера между отражателем и интерференционным узлом расположен в световоде из труб, изготовленных из нержавеющей стали. Световод поддерживается на стойках, вмонтированных в железобетонные трубы. Предусмотрено перемещение световода в горизонтальном и вертикальном направлениях. Отражатели смонтированы на основании, выполненном из инвара, в котором предусмотрена подстройка его юстировочными винтами в любом направлении.

В России производство и монтаж лазерных интерферометров-деформометров может осуществлять Институт радиэлектроники и электроники РАН, осуществляющий их разработку и усовершенствование на протяжении последних 20-ти лет. Лазерные интерферометры-деформографы активно устанавливаются на сейсмостанциях (например в Армении), так как позволяют собирать информацию не только о самом сейсмическом событии, но и о состоянии геосферы в районе мониторинга. Информация о применении подобных систем за рубежом отсутствует.

Однако высокая чувствительность двухплечевых волоконно-оптических интерферометров в сочетании с протяженной измерительной базой приводит к снижению помехозащищенности измерительной системы, что существенно ограничивает их применение в системах мониторинга крупномасштабных объектов. Кроме того, разнообразие условий проведения измерений требует обеспечения возможности изменения основных параметров деформометра, таких как чувствительность и предел измерений, что невозможно, в случае применения волоконного световода в качестве чувствительного элемента.

В рамках выполняемого проекта разработана технология создания деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера, обеспечивающая повышение помехозащищенности, а также возможность изменения чувствительности и предела измерений. При этом обеспечивается непрерывный мониторинг состояния исследуемого крупномасштабного объекта в режиме реального времени. Разработанная технология обеспечивает возможность применения волоконно-оптических интерферометров Маха-Цендера для создания деформометров с протяженной (до 50 м) базой, которые могут использоваться для регистрации акустических волн, распространяющихся в элементах конструкций зданий и сооружений, а также в земной коре.

Отличительной особенностью разработанной технологии создания деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера является пространственная локализация интерферометра, обеспечивающая повышение помехозащищенности при сохранении высокой чувствительности, присущей всем интерферометрическим измерительным схемам. В свою очередь, повышение помехозащищенности деформометра открывает перспективы для применения новых адаптивных методов обработки выходных сигналов, основанных на применении нелинейной оптики.

Особенность технологии пространственной локализации предполагает использование в качестве протяженного чувствительного элемента не волоконного световода, как в традиционных интерферометрических датчиках деформаций, а троса, который может быть изготовлен из различных материалов, а также обладать различными значениями площади поперечного сечения. Это обеспечивает возможность изменения основных метрологических параметров деформометра: чувствительности и диапазона измерений путем простой замены троса непосредственно на контролируемом объекте.

При этом волоконно-оптический интерферометр находится в закрытом корпусе, где остается невосприимчивым к резким изменениям условий окружающей среды, а длина троса, чувствительность которого к внешним воздействиям существенно ниже, чем у волоконного световода измерительного плеча интерферометра, может быть доведена до нескольких десятков метров.

В настоящее время в мире волоконно-оптическая элементная база начинает применяться для создания сейсмоприемников морской разведки и скважинных сейсмоприемников. В нашей стране попытки разработки волоконно-оптических сейсмоприемников предпринимались ОАО Пермская научно-производственная приборостроительная компания (ПНППК). Однако, отсутствие на рынке волоконно-оптических сейсмоприемников указывает на тот факт, что эти попытки не привели к созданию коммерческих продуктов.

Так как разработанная технология позволяет создавать сейсмодатчик, предназначенный для регистрации виброперемещения, в качестве ближайших аналогов следует выбирать сейсмоприемники, выходной сигнал которых пропорционален перемещению – вибродатчики.

Американская компания Optiphasе выпустила на рынок вибродатчик, который предназначен для измерения виброперемещений поверхностей, который в принципе может быть использован для мониторинга крупномасштабных объектов после некоторой доработки, так как не имеет колебательной системы. Вибродатчик ODS-4500, основанный на интерферометрической технологии, является, по всей видимости, ближайшим аналогом разработанной технологии [31]. Широкий частотный диапазон данного преобразователя не является преимуществом в задачах мониторинга техногенных объектов, так как область частот выше 300 Гц не используется из-за технологических шумов.

Пьезоэлектрические сейсмоприемники, предназначенные для регистрации перемещений, являются неоптическими аналогами разработанной технологии. Примером такого датчика является сейсмоприемник с выходом по перемещению ВС-1311-S ЗАО "Электронные технологии и метрологические системы" [32]. Сейсмоприемники пьезоэлектрические ВС 1311-S предназначены для преобразования параметров вибраций в пропорциональный электрический сигнал.

В рамках выполняемого проекта разработана технология создания сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера, обеспечивающая повышение помехозащищенности, а также возможность регистрации не скорости колебаний точек среды, а непосредственно самих колебаний, что открывает перспективы получения более полной информации о процессах, происходящих как в земной коре, так и в техногенных объектах, на состояние которых оказывает воздействие сейсмическая волна.

Отличительной особенностью разработанной технологии создания сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра является применение в качестве чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Техника оптической интерферометрии потенциально позволяет производить измерения крайне малых величин изменений фазы световой волны, что, в свою очередь, открывает возможности для регистрации ничтожно малых изменений оптического пути света в волоконном световоде. Объединение волоконно-оптического интерферометра с механической колебательной системой позволило получить технологию создания сейсмодатчика, обладающего повышенной помехозащищенностью. Разработанный в ходе выполнения НИР метод стабилизации

рабочих характеристик волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера является принципиально новым методом стабилизации положения рабочей точки интерферометра, обеспечивающим адаптивность сеймоприемника к изменениям условий окружающей среды. При этом основные характеристики сеймоприемника остаются на уровне современных аналогов.

3.3 Оценка эффективности полученных результатов в сравнении с современным научно-техническим уровнем

Одним из основных принципов рационального природопользования является принцип гармонизации отношений природы и человека, осуществляющего социальную и производственную деятельность, связанную с эксплуатацией крупномасштабных техногенных объектов: стратегически важные для национальной безопасности объекты, крупномасштабные социальные объекты, производственные здания, сооружения и механизмы. Реализация этого принципа предполагает создание и эксплуатацию природно-технических, геотехнических или эколого-экономических систем, представляющих собой совокупность какого-либо крупномасштабного техногенного объекта и взаимодействующих с ним элементов природной среды и обеспечивающих, с одной стороны, высокую эффективность эксплуатации объекта, а с другой - поддержание в зоне своего внимания благоприятной экологической обстановки, максимально возможное сохранение и воспроизводство естественных ресурсов. В таких системах предусматривается прогнозирование нежелательных и опасных ситуаций, а также реализации мер по их предотвращению. Своевременное и точное обнаружение опасных ситуаций достигается непрерывным сбором информации (мониторингом) о состоянии как самих техногенных объектов, так и прилегающих к ним территорий.

Существующие в настоящее время системы экологического мониторинга в большинстве своем ограничиваются контролем загрязнения воздуха, почвы, воды, наблюдением за состоянием живых организмов, а непосредственно на объекте - в контроле стоков и пылегазовых выбросов. Получаемая информация анализируется руководством предприятия, принимающим необходимые технические решения.

Проблемы же технического состояния, прочности, сейсмоустойчивости крупномасштабных объектов решаются в основном только на стадии проектирования и сооружения. В то же время становится все более очевидным, что применительно к проектированию, созданию и эксплуатации таких опасных производственных и социальных объектов и механизмов, наряду с общепринятыми нормами и правилами проектирования и анализа прочности, ресурса и надежности должны быть применены принципиально новые методы создания специальных средств непрерывного мониторинга их технического состояния и устойчивости к внешним воздействиям (землетрясения, ураганы и т.д.).

В последнее время в нашей стране и за рубежом предпринимаются попытки создания систем мониторинга состояния крупномасштабных объектов. Однако, имеющиеся в настоящее время разработки не удовлетворяют современным требованиям ни по быстродействию, ни по объему собираемой информации. Протяженность информационных и измерительных каналов системы мониторинга крупномасштабного объекта приводит к значительному уровню шумов и как следствие недостаточной чувствительности. По той же причине сложно обеспечить приемлемую стоимость системы. Так же оставляет желать лучшего надежность подобных систем, эксплуатируемых часто в неблагоприятных условиях окружающей среды. Вопросы же сейсмической устойчивости объектов мониторинга вообще не изучаются. Существующие в настоящее время глобальные системы мониторинга сейсмической активности могут определять эпицентр и магнитуду землетрясения, но не могут ответить на вопрос, как данный конкретный объект реагирует на сейсмическую активность региона, в котором он находится.

Преимущества волоконно-оптической элементной базы: невосприимчивость к электромагнитным помехам, высокая чувствительность к внешним воздействиям, возможность создания протяженных измерительных преобразователей с распределенной чувствительностью, устойчивость к агрессивной внешней среде, низкая стоимость все чаще привлекают внимание исследователей, занятых разработкой систем мониторинга крупномасштабных объектов. Однако в нашей стране применение волоконно-оптической элементной базы для создания подобных систем как правило ограничиваются разработкой систем охраны периметров. Ближайшие к предлагаемым в данной работе аналоги волоконно-оптических систем

реализованы в виде набора точечных датчиков, что не может обеспечить надежный мониторинг состояния крупномасштабных объектов. За рубежом, значительных успехов добились исследователи, занимающиеся применением волоконных решеток Брэгга для создания протяженных одномерных измерительных линий, которые применяются для контроля за состоянием мостов и в последнее время – для контроля состояния зданий и сооружений. Однако эти системы требуют для обработки выходных сигналов сложных методов, ограничивающих быстродействие. Еще один недостаток этих систем – низкая помехозащищенность, вызванная воздействием температуры на измерительные линии. Полученные совместно с Даляньским технологическим университетом в результате выполнения настоящей НИР результаты по разработке адаптивных систем мониторинга температурных и деформационных распределений крупномасштабных объектов на основе волоконных брэгговских решеток обеспечивают решение указанных проблем за счет применения нового метода обработки сигналов ВБР.

Более привлекательным с точки зрения мониторинга крупномасштабных объектов является применение одноволоконных многомодовых интерферометров, обладающих распределенной чувствительностью. Система таких протяженных (до 100м) интерферометров способна охватить значительные площади и объемы исследуемого объекта. Такой интерферометр может быть встроен в конструкцию сооружения на стадии строительства. Однако сложность обработки выходного оптического сигнала, представляющего собой спекловую картину, которая к тому же не обладает долговременной стабильностью, привела к тому, что подобные устройства вообще не применяются на практике. Полученные в ходе выполнения настоящей НИР результаты впервые обеспечивают возможность создания адаптивных многоканальных систем мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью.

Применение двухплечевых интерферометров, типа интерферометра Маха-Цендера, обладающих высокой чувствительностью к деформациям, в случае мониторинга крупномасштабных объектов так же затруднено из-за повышенной восприимчивости к нежелательным внешним воздействиям (температура), действующим на протяженное измерительное плечо. Полученные в ходе выполнения

настоящей НИР результаты обеспечивают возможность создания адаптивных систем мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе волоконно-оптических интерферометров Маха-Цендера, способных адаптироваться к медленным изменениям условий окружающей среды.

Применяемые в настоящее время сейсмоприемники, предназначенные для изучения влияния сейсмосигналов на безопасность эксплуатации крупномасштабных объектов не обладают достаточной помехозащищенностью, что чрезвычайно важно в условиях реальной эксплуатации промышленных сооружений, или жилых зданий в городской черте. В этих условиях устойчивость измерительных систем к электромагнитным воздействиям выходит на первое место и становится даже более важной особенностью измерительной системы, чем высокая чувствительность. Полученные в результате выполнения настоящей НИР результаты обеспечивают создание помехозащищенных волоконно-оптических сейсмоприемников, чувствительность которых не уступает чувствительности традиционных измерительных средств.

Результаты проведенных патентных исследований показали, что исследования, проводимые в рамках настоящей научно-исследовательской работы, находятся в русле основных тенденций развития мировой науки. По результатам НИР получен патент на полезную модель № 126820 «Устройство измерения деформаций протяженных объектов». Направлена заявка на второй патент. Это указывает на высокую патентоспособность полученных результатов.

3.4 Анализ выполнения требований технического задания на НИР

Основные требования к выполнению НИР предусмотрены разделом 5 технического задания на НИР. Анализ выполнения указанных требований по результатам выполнения НИР представлен в таблицах.

Таблица 1 – Требования к выполняемым работам:

№	№ п.п. ТЗ	Требование	Выполнение требования
1	5.1.1.1	Должны быть разработаны и	На этапе 1-4 НИР разработаны и

		исследованы принципы организации и построения адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения для решения задач рационального природопользования и безопасности жизнедеятельности	исследованы принципы организации и построения четырех адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения для решения задач рационального природопользования и безопасности жизнедеятельности
2	5.1.1.2	Должен быть выполнен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках НИР, в том числе обзор научных информационных источников: статьи в ведущих зарубежных и (или) российских научных журналах, монографии и (или) патенты) - не менее 25-ти научно-информационных источников за период 2000 – 2010 гг.	Выполнен аналитический обзор информационных источников, раскрывающий современное состояние в области разработки принципов и систем мониторинга крупномасштабных объектов, результаты которого представлены в отчете по НИР за 1 этап (стр.15-42). Обзор составлен на основе анализа большого количества научных работ и нормативных документов, а также патентов и содержит 52 ссылки на наиболее важные научно-информационные источники.
3	5.1.1.3	Должны быть исследованы, обоснованы и выбраны методы и средства, направления исследований и способы решения поставленных задач	На основе проведенного аналитического обзора и патентных исследований определены основные пути решения поставленных задач по разработке и исследованию принципов организации и построения адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения для решения задач рационального природопользования и безопасности жизнедеятельности. Результаты представлены во введении отчета по НИР за этап 1.
4	5.1.1.4	Должна быть проведена сравнительная оценка вариантов возможных решений исследуемой проблемы с учетом результатов прогнозных исследований, проводившихся по аналогичной тематике	Проведена сравнительная оценка вариантов возможных решений проблемы мониторинга состояния крупномасштабных объектов, представленная в отчете по НИР за 1 этап. Данная информация вошла в состав аналитического обзора (глава 1).

5	5.1.1.5	Должны быть исследованы и выбраны наиболее эффективные способы создания измерительных преобразователей адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов	Эффективность предложенных в работе способов создания измерительных преобразователей адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов подтверждена аналитическим обзором, патентными исследованиями (этап 1 НИР), а также результатами маркетинговых исследований, представленных в маркетинговых отчетах, разработанных на этапе 3 НИР.
6	5.1.1.6	Должны быть выработаны предложения и рекомендации по внедрению разработанных адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов	Разработаны предложения и рекомендации по внедрению разработанных адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов, представленные в главе 4 настоящего отчета по НИР.
7	5.1.2	Должно быть проведено моделирование работы разрабатываемых адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов: вид моделирования – математическое	На этапе 1 НИР проведено моделирование работы разрабатываемых адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов. Разработана физико-математическая модель процессов измерения параметров линейных перемещений крупномасштабных объектов и сред на основе принципа оптоэлектронной обработки стохастических оптических полей, формируемых многомодовыми волоконными световодами. Разработана физико-математическая модель процессов измерения напряжения и температуры крупномасштабных объектов и сред на основе комбинированного метода опроса и мультиплексирования сигналов волоконно-оптических брэгговских измерительных преобразователей. Разработана физико-математическая модель длиннбазового деформометра

			на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера для регистрации линейных деформаций крупномасштабных объектов и сред.
8	5.1.3	Должны быть разработаны и изготовлены макеты адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов	В соответствии с календарным планом на этапе 3 НИР Иностранным партнером, Даляньским технологическим университетом, проведены работы по созданию экспериментального макета системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток. ИАПУ ДВО РАН создан экспериментальный макет многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью. Создан экспериментальный макет деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Создан экспериментальный макет сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Создание макетов подтверждается актами создания (приложение 3 к отчету по НИР за этап 3)
9	5.1.4	Должны быть проведены исследовательские испытания макетов адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов по разработанной Программе и методикам исследовательских испытаний	Проведены испытания макетов адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов, результаты которых представлены в отчете по НИР за этап 3 и подтверждены актами и протоколами испытаний (приложение 3 к отчету по НИР за этап 3)
10	5.1.5	Исследовательские испытания должны проводиться с	Все испытания проводились с использованием оборудования научно-

		использованием поверенного/калиброванного измерительного оборудования, обеспечивающего точность измерения параметров не хуже 5%	исследовательской лаборатории №21 ИАПУ ДВО РАН, а также оборудования Центра коллективного пользования ЛАМИ ИАПУ ДВО РАН, обеспечивающего точность измерения параметров не хуже 5%
11	5.1.6	Результаты исследований должны обрабатываться с помощью протестированного программного обеспечения	Результаты исследований обработаны с использованием протестированного программного обеспечения, разработанного ИАПУ ДВО РАН
12	5.1.7	На основе полученных результатов должен быть разработан проект Технического задания на проведение последующих НИР в области создания адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов	На основе полученных результатов на этапе 4 разработан проект Технического задания на проведение последующих НИР в области создания адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов.
13	5.1.8	Должны быть предусмотрены стажировки на базе организации иностранного партнера для не менее 2 молодых специалистов на срок не менее 5 рабочих дней.	Проведены две стажировки на базе организации иностранного партнера, Даляньского технологического университета, в период с 20.08.2012 по 26.08.2012. Дышлюк Антон Владимирович (кандидат наук 31 год) и Гурбатов Станислав Олегович (аспирант до 25 лет).

Таблица 2 – Требования к разрабатываемой документации

№	№ п.п. ТЗ	Требование	Выполнение требования
В ходе работы должны быть разработаны и согласованы с Заказчиком следующие документы:			
1	5.2.1.1	Промежуточные и заключительный отчеты о НИР, оформленные в соответствии с ГОСТ 7.32-2001	Подготовлены промежуточные отчеты по НИР по этапам 1-3, а также заключительный отчет по этапу 4 в соответствии с ГОСТ 7.32-2001
2	5.2.1.2	Отчет о патентных исследованиях, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96	На этапе 1 подготовлен отчет о патентных исследованиях, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96
3	5.2.1.3	Проект технического задания на проведение НИР	Подготовлен проект технического задания на проведение НИР
4	5.2.1.4 5.2.2	Эскизная конструкторская документации на создаваемые макеты адаптивных систем	Оформлена эскизная конструкторская документации на создаваемые макеты адаптивных систем дистанционного

		дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов в составе (по каждому макету): 1) схема комбинированная функциональная в соответствии с ГОСТ 2.701-84; 2) схема комбинированная соединений и подключения в соответствии с ГОСТ 2.701-84; 3) чертёж общего вида в соответствии с ГОСТ 2.102-68. Эскизная конструкторская документация должна выполняться в соответствии с требованиями ГОСТ 2.125-88	мониторинга крупномасштабных объектов в составе: эскизная конструкторская документация на макет многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью (схема комбинированная функциональная - 1 лист; схема комбинированная соединений и подключения - 1 лист; чертёж общего вида - 2 листа), представленная в приложении А отчета по НИР за этап 3; Эскизная конструкторская документация на макет деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера (схема комбинированная функциональная - 1 лист; схема комбинированная соединений и подключения - 1 лист; чертёж общего вида - 2 листа), представленная в приложении Б отчета по НИР за этап 3; Эскизная конструкторская документация на макет сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера (схема комбинированная функциональная - 1 лист; схема комбинированная соединений и подключения - 1 лист; чертёж общего вида - 2 листа), представленная в приложении В отчета по НИР за этап 3;
5	5.2.3	По результатам исследовательских испытаний должны быть представлены (в соответствии с ГОСТ 15.201-2000) Акты результатов испытаний, другие документы, подтверждающие результаты испытаний	По результатам исследовательских испытаний представлены акты результатов испытаний, протоколы результатов испытаний экспериментального макета системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток,

			экспериментального макета многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью, экспериментального макета деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера, экспериментального макета сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера (приложение 3 отчета по НИР за 3 этап)
6	5.2.4	Отчетные научно-технические документы, разрабатываемые в соответствии с пунктом 5.2.1.4 настоящего технического задания (ТЗ), должны быть включены в отчет о НИР в качестве приложений или представлены в составе отчетной документации в качестве отдельных документов	Отчетные научно-технические документы, разрабатываемые в соответствии с пунктом 5.2.1.4 технического задания (ТЗ), включены в отчет о НИР в качестве приложений или представлены в составе отчетной документации в качестве отдельных документов.

Таблица 3 – Требования к работам, выполняемым с участием иностранных партнёров

№	№ п.п. ТЗ	Требование	Выполнение требования
1	5.3.1	Работы должны выполняться в рамках Соглашения о научно-техническом сотрудничестве между Учреждением Российской академии наук Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (ИАПУ ДВО РАН), г.Владивосток и Даляньским технологическим университетом (ДТУ), Китайская народная республика, г. Далянь, определяющем предмет и объем общей исследовательской	Все работы, выполненные иностранным партнером, выполнены в соответствии с Соглашением от 01.08.2011 г. о научно-техническом сотрудничестве между Учреждением Российской академии наук Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН (ИАПУ ДВО РАН), г.Владивосток и Даляньским технологическим университетом (ДТУ), Китайская народная республика, г. Далянь, копия которого представлена вместе с

		программы партнеров, сроки ее выполнения, условия взаимодействия, а также распределение между ними выполняемых работ. Данные документы и/или Приложения к ним должны также регулировать порядок использования совместно полученной интеллектуальной собственности с учетом требований раздела «Права на результаты работ» государственного контракта.	отчетной документацией на этапе 1.
2	5.3.2	В соответствии с Соглашением от 01.08.2011 г. между ИАПУ ДВО РАН и ДТУ (иностранном партнером) за счет собственных средств (внебюджетных) должны быть выполнены следующие работы: На этапе 1 выполнения НИР: 1) Оценка потенциала применения методов волоконной и нелинейной оптики в задачах мониторинга крупномасштабных объектов. 2) Теоретическое исследование зависимости регистрируемых сигналов от спектральных сдвигов опрашиваемых ВБР-датчиков для реализации рефлектометрического метода регистрации сигналов ВБР-датчиков в широком спектральном диапазоне. На этапе 2 выполнения НИР: Определение оптимальных схем установки опорных волоконных брэгговских решеток в измерительной системе, обеспечивающих независимость выходного сигнала измерительной системы от флуктуаций мощности световых источников. На этапе 3 выполнения НИР: 1) Создание экспериментального макета системы мониторинга температурных и деформационных	Иностранном партнером за счет собственных средств (внебюджетных) выполнены следующие работы: На этапе 1 выполнения НИР: 1) Оценка потенциала применения методов волоконной и нелинейной оптики в задачах мониторинга крупномасштабных объектов. 2) Теоретическое исследование зависимости регистрируемых сигналов от спектральных сдвигов опрашиваемых ВБР-датчиков для реализации рефлектометрического метода регистрации сигналов ВБР-датчиков в широком спектральном диапазоне. На этапе 2 выполнения НИР: Определение оптимальных схем установки опорных волоконных брэгговских решеток в измерительной системе, обеспечивающих независимость выходного сигнала измерительной системы от флуктуаций мощности световых источников. На этапе 3 выполнения НИР: 1) Создание экспериментального макета системы мониторинга температурных и деформационных

		распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток. 2) Определение оптимальных параметров системы мониторинга температурных и деформационных распределений, при которых достигаются наилучшие чувствительность и динамический диапазон. На этапе 4 выполнения НИР: 1) Оптимизация схемы системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток. 2) Разработка рекомендаций по дальнейшему развитию и коммерциализации адаптивных систем дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов.	2) Определение оптимальных параметров системы мониторинга температурных и деформационных распределений, при которых достигаются наилучшие чувствительность и динамический диапазон. На этапе 4 выполнения НИР: 1) Оптимизация схемы системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток. 2) Разработка рекомендаций по дальнейшему развитию и коммерциализации адаптивных систем дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов. Выполнение подтверждено научными отчетами зарубежного партнера, копии которых представлены с отчетной документацией на соответствующих этапах НИР. Полученные результаты вошли в состав соответствующих отчетов по НИР.
3	5.3.3	Отчетные материалы по выполнению работ иностранным партнёром, наряду с документами, декларирующими их стоимость, должны быть включены в состав отчетных материалов по этапам работ Исполнителя государственного контракта, предоставляемых Заказчику	Научные отчеты о выполненных иностранным партнером работах вместе с письмами о расходах включены в состав отчетных документов на соответствующих этапах НИР.
4	5.3.4	Обладающая коммерческим потенциалом совместная интеллектуальная собственность, полученная в ходе работ, должна быть защищена в соответствии с российским и международным законодательством	Совместная интеллектуальная собственность не создавалась.

Таблица 4 – Технические требования

№	№ п.п. ТЗ	Требование	Выполнение требования
	6.1	Система мониторинга на основе одноволоконных многомодовых интерферометров: - точность измерений ± 3 мкм; - диапазон измерений 5 см; - динамический диапазон 80 дБ; - температурная нестабильность выходного сигнала не более $7,3 \cdot 10^{-7}$ на 1 градус Цельсия; - частотный диапазон 0 - 25 Гц; - число измерительных каналов – до 8; - величина перекрестных помех <50 дБ; - время опроса 0,05 с. Система мониторинга на основе волоконных брэгговских решеток: - пороговая чувствительность при регистрации относительного удлинения $0,5 \cdot 10^{-4}$ (50 μstrain); при регистрации температуры – 5 градусов Цельсия; - нестабильность выходного сигнала не более 0,1% при изменении мощности источника излучения на 50%; - число ВБР датчиков в составе измерительной системы до 200; - величина перекрестных помех <40 дБ. Система мониторинга на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера: - пороговая чувствительность к продольным деформациям 0,1 μstrain - частотный диапазон от 0,001	Система мониторинга на основе одноволоконных многомодовых интерферометров: - точность измерений ± 3 мкм; - диапазон измерений 5 см; - динамический диапазон 80 дБ; - температурная нестабильность выходного сигнала не более $7,3 \cdot 10^{-7}$ на 1 градус Цельсия; - частотный диапазон 0 - 25 Гц; - число измерительных каналов – 12; - величина перекрестных помех <50 дБ; - время опроса 0,04 с. Система мониторинга на основе волоконных брэгговских решеток: - пороговая чувствительность при регистрации относительного удлинения $0,5 \cdot 10^{-4}$ (50 μstrain); при регистрации температуры – 5 градусов Цельсия; - нестабильность выходного сигнала не более 0,1% при изменении мощности источника излучения на 50%; - число ВБР датчиков в составе измерительной системы 400; - величина перекрестных помех <40 дБ. Система мониторинга на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера: - пороговая чувствительность к продольным деформациям 0,024 μstrain - частотный диапазон от 0,001 Гц

		Гц до 1000 Гц Все параметры должны быть определены с точностью не хуже 5%. Внешние условия проведения экспериментальных исследований (включая температуру и влажность окружающей среды) должны воспроизводиться с точностью не хуже 10%. Все экспериментальные исследования должны проводиться с использованием поверенного, сертифицированного и/или калиброванного (по поверенному) метрологического оборудования, обеспечивающего достоверность данных, получаемых в процессе измерения. Метрологическое обслуживание измерительного оборудования должно производиться в соответствии с установленным порядком.	до 1000 Гц Все параметры определены с точностью не хуже 5%. Внешние условия проведения экспериментальных исследований (включая температуру и влажность окружающей среды) воспроизводятся с точностью не хуже 10%. Все экспериментальные исследования проведены с использованием поверенного, сертифицированного и/или калиброванного (по поверенному) метрологического оборудования, обеспечивающего достоверность данных, получаемых в процессе измерения. Метрологическое обслуживание измерительного оборудования производится в соответствии с установленным порядком.
	6.2	Интеллектуальные системы удаленного мониторинга должны разрабатываться с учетом возможного их построения по блочно-модульному принципу, предполагающему выделение общих подсистем в унифицированные модули, а также с использованием, по возможности, существующих унифицированных модулей и устройств.	Интеллектуальные системы удаленного мониторинга разработаны с учетом возможного их построения по блочно-модульному принципу, предполагающему выделение общих подсистем в унифицированные модули, а также с использованием, существующих унифицированных модулей и устройств, что подтверждается блок-схемами, представленными в отчете по НИР за этап 3.
	6.3	При выполнении НИР должны соблюдаться правила техники электро- и пожарной безопасности, а также правила техники безопасности, предусмотренные для работ, связанных с использованием лазерных источников оптического излучения	Все работы выполнялись в специализированных научных лабораториях в соответствии с правилами техники безопасности, предусмотренными для работ, связанных с использованием лазерных источников оптического излучения

Таблица 5 – Требования к патентной чистоте и патентоспособности

№	№ п.п. ТЗ	Требование	Выполнение требования
1	7.1	На этапе 1 выполнения НИР должны быть проведены патентные исследования в соответствии ГОСТ Р 15.011-96.	На этапе 1 выполнения НИР проведены патентные исследования в соответствии ГОСТ Р 15.011-96, составлен соответствующий отчет.
2	7.2	На остальных этапах НИР при разработке результатов интеллектуальной деятельности (далее – РИД), способных к правовой охране (в соответствии со ст. 1225 ГК РФ), должны быть проведены дополнительные патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96	На этапах 3 и 4 в ходе оформления заявок на полезную модель проведены дополнительные патентные исследования.
3	7.3	Должны быть представлены сведения об охранных и иных документах, которые будут препятствовать применению результатов работ в Российской Федерации (и в других странах – по требованию заказчика), и условия их использования с представлением соответствующих обоснованных предложений и расчетов	Сведений об охранных и иных документах, которые будут препятствовать применению результатов работ в Российской Федерации не выявлено.
4	7.4	РИД, полученные в ходе выполнения НИР, подлежат регистрации и охране в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации	РИД, полученные в ходе выполнения НИР зарегистрированы в соответствии с действующим законодательством.

Таблица 6 – Основные технико-экономические требования

№	№ п.п. ТЗ	Требование	Выполнение требования
1	8.1.1	Разрабатываемые интеллектуальные системы удаленного мониторинга должны обеспечить: 1) повышение качества (точности, достоверности)	Как показали результаты теоретических и экспериментальных исследований, аналитического обзора, а также маркетинговых исследований, разрабатываемые интеллектуальные

		измерений деформаций исследуемого объекта; 2) снижение затрат на проведение мониторинга; 3) снижение затрат на изготовление систем мониторинга; 4) повышение эффективности мониторинга крупномасштабных объектов за счет получения возможности использования многоканальных систем; 5) вывод на качественно новый уровень систем контроля состояния крупномасштабных технологических объектов, обеспечивающий возможность осуществления дистанционных измерений в реальном времени; 6) усиление конкурентных позиций отечественной науки и бизнеса.	системы удаленного мониторинга обеспечивают: 1) повышение качества (точности, достоверности) измерений деформаций исследуемого объекта; 2) снижение затрат на проведение мониторинга; 3) снижение затрат на изготовление систем мониторинга; 4) повышение эффективности мониторинга крупномасштабных объектов за счет получения возможности использования многоканальных систем; 5) вывод на качественно новый уровень систем контроля состояния крупномасштабных технологических объектов, обеспечивающий возможность осуществления дистанционных измерений в реальном времени; 6) усиление конкурентных позиций отечественной науки и бизнеса.
2	8.1.2	Полученные при проведении НИР результаты должны соответствовать или превышать мировой уровень работ в исследуемой области	Как показали результаты маркетинговых исследований, полученные при проведении НИР результаты соответствуют, а в ряде случаев превышают мировой уровень работ в исследуемой области

Таблица 7 – Требования к достижению программных индикаторов и показателей

Обозн.	Наименование программного индикатора	Ед. изм.	Задано				Достигнуто				
			Всего	в том числе:			на отчетном этапе	Всего	в том числе:		
				на 2011 г.	на 2012 г.	на 2013 г.			за 2011 г.	за 2012 г.	за 2013 г.
И1.9.1	Число технологий, соответствующих мировому уровню либо превосходящих его, разработанных в рамках выполнения проектов	Единиц	4	-	4	-	-	4	-	4	-

И1.9.2	Число патентов (в том числе международных) на результаты интеллектуальной деятельности, полученные в рамках выполнения проектов	Единиц	2	-	1	1	1	2	-	1	1
И1.9.3	Число публикаций, содержащих результаты интеллектуальной деятельности, полученные в рамках выполнения проектов	Единиц	4	-	2	2	2	4	-	2	2
И1.9.4	Число диссертаций на соискание ученых степеней, защищенных в рамках выполнения проектов проблемно-ориентированных поисковых исследований	Единиц	1	-	-	1	-	1	-	1	-
	Число молодых специалистов, привлеченных к выполнению исследований и разработок	Человек	-	12	12	12	-	-	12	13	12

Таблица 8 – Объем работ, выполненных за счет внебюджетных средств

Задано, рублей					Достигнуто, рублей				
Всего	в том числе:			на отчетный этап	на отчетном этапе	Всего	в том числе:		
	на 2011 г.	на 2012 г.	на 2013 г.				за 2011 г.	за 2012 г.	за 2013 г.
7000000	3500000	1500000	2000000	2000000	2000004,78	7001373,07	3 499 996,81	1501371,48	2000004,78

Анализ таблиц 1-8 показывает, что в ходе выполнения НИР все требования технического задания выполнены полностью.

3.5 Оценка полноты решения задач и достижения поставленных целей НИР

Основной целью настоящей НИР в соответствии с техническим заданием является стимулирование развития международных интеграционных процессов в науке и содействие формированию устойчивых кооперационных связей российских и иностранных научно-исследовательских организаций и университетов, направленных на создание технологий в области рационального природопользования, соответствующих мировому уровню, либо превосходящих его, получение международных патентов и привлечение молодых ученых и специалистов к исследованиям в рамках научного сотрудничества в сфере высоких технологий с иностранными научно-исследовательскими организациями стран БРИКС. Выполнение международных обязательств Российской Федерации по развитию научно-технического сотрудничества со странами БРИКС. При этом в соответствии с требованиями ТЗ под технологиями в области рационального природопользования подразумевается разработка и исследование принципов организации и построения адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения для решения задач рационального природопользования и безопасности жизнедеятельности.

Выполнение настоящей НИР осуществлялось совместно с Даляньским технологическим университетом (ДТУ) Китайской народной республики в рамках Соглашений о сотрудничестве между ИАПУ ДВО РАН и ДТУ от 01.08.2011, а также в рамках Соглашения между Правительством Российской Федерации и Правительством Китайской народной республики о научно-техническом сотрудничестве от 18.12.1992. Таким образом, при выполнении настоящей НИР осуществлено укрепление многолетнего сотрудничества с научными коллективами одного из ведущих университетов КНР, достигшими значительных успехов в области разработки средств и методов мониторинга природных и техногенных объектов для решения задач рационального природопользования и безопасности жизнедеятельности. Развитие научной кооперации позволило не только успешно решить поставленные в проекте научные задачи, но также организовать и провести на базе ДТУ международную конференцию в августе 2012 г., в которой приняло участие

6 молодых ученых и аспирантов ИАПУ ДВО РАН, в том числе двое исполнителей настоящей НИР.

Полнота решения научных задач и достижения поставленных целей НИР определяется полнотой получения запланированных в техническом задании научных результатов, сформулированных в разделе 4 ТЗ. В таблице 8 представлены результаты анализа полноты получения запланированных научных результатов.

Таблица 9 – Анализ полноты получения запланированных научных результатов

№	№ п.п. ТЗ	Запланированный результат	Полученный результат
1	4.1.1	Отчет о НИР, содержащий, в том числе: а) обзор и анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках НИР; б) обоснование выбора направления исследований; в) теоретическое исследование путей создания адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения для решения задач рационального природопользования и безопасности жизнедеятельности; г) результаты расчетов, математического моделирования адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения для решения задач рационального природопользования и безопасности жизнедеятельности; д) результаты экспериментальных исследований; е) технико-экономическую оценку результатов НИР; ж) обобщение и выводы по	Отчет о НИР за 1 этап, содержащий материалы по пунктам а, б, в, г. Отчет о НИР за 2 этап, содержащий материалы по пунктам в, г, д. Отчет о НИР за 3 этап, содержащий материалы по пунктам г, д. Отчет о НИР за 4 этап, содержащий материалы по пунктам д, е, ж, и.

		результатам НИР; и) рекомендации и предложения по использованию результатов НИР.	
2	4.1.2	Физико-математическая модель процессов измерения параметров линейных перемещений крупномасштабных объектов и сред на основе принципа оптоэлектронной обработки стохастических оптических полей, формируемых многомодовыми волоконными световодами	Физико-математическая модель процессов измерения параметров линейных перемещений крупномасштабных объектов и сред на основе принципа оптоэлектронной обработки стохастических оптических полей, формируемых многомодовыми волоконными световодами, представленная в гл. 2 отчета о НИР за 1 этап.
3	4.1.3	Физико-математическая модель процессов измерения напряжения и температуры крупно-масштабных объектов и сред на основе комбинированного метода опроса и мультиплексирования сигналов волоконно-оптических брэгговских измерительных преобразователей	Физико-математическая модель процессов измерения напряжения и температуры крупно-масштабных объектов и сред на основе комбинированного метода опроса и мультиплексирования сигналов волоконно-оптических брэгговских измерительных преобразователей, представленная в гл. 3 отчета о НИР за 1 этап.
4	4.1.4	Физико-математическая модель длиннобазового деформометра на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера для регистрации линейных деформаций крупномасштабных объектов и сред	Физико-математическая модель длиннобазового деформометра на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера для регистрации линейных деформаций крупномасштабных объектов и сред, представленная в гл. 5 отчета о НИР за 1 этап.
5	4.1.5	Метод спектрально-временного разделения сигналов от измерительных волоконных брэгговских решеток при их зондировании нано- и микросекундными лазерными импульсами, сформированными с использованием внешнего перестраиваемого полосового фильтра, с учетом условий записи брэгговских решеток, обеспечивающие максимальную чувствительность волоконно-	Метод спектрально-временного разделения сигналов от измерительных волоконных брэгговских решеток при их зондировании нано- и микросекундными лазерными импульсами, сформированными с использованием внешнего перестраиваемого полосового фильтра, с учетом условий записи брэгговских решеток, обеспечивающие максимальную чувствительность волоконно-

		оптических информационно-измерительных систем на основе волоконных брэгговских решеток показателя преломления	оптических информационно-измерительных систем на основе волоконных брэгговских решеток показателя преломления, представленный в главе 1 отчета о НИР за 2 этап
6	4.1.6	Оптоэлектронный цифровой корреляционный способ обработки сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров, обеспечивающего измерение параметров линейных деформаций крупномасштабных объектов	Оптоэлектронный цифровой корреляционный способ обработки сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров, обеспечивающего измерение параметров линейных деформаций крупномасштабных объектов, представленный в главе 2 отчета о НИР за 2 этап
7	4.1.7	Метод стабилизации параметров волоконно-оптического деформометра на основе интерферометра Маха-Цендера с протяженной измерительной базой	Метод стабилизации параметров волоконно-оптического деформометра на основе интерферометра Маха-Цендера с протяженной измерительной базой, представленный в главе 3 отчета о НИР за 2 этап
8	4.1.8	Метод регистрации сейсмосигналов с использованием волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера	Метод регистрации сейсмосигналов с использованием волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера, представленный в гл.4 отчета о НИР за 2 этап
9	4.1.9	Макет многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью	Макет многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью, представленный в гл.2 отчета о НИР за 3 этап
10	4.1.10	Макет системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток	Макет системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток, представленный в гл.1 отчета о НИР за 3 этап
11	4.1.11	Макет деформометра с протяженной базой на основе	Макет деформометра с протяженной базой на основе волоконно-

		волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера	оптического интерферометра Маха-Цендера, представленный в гл.3 отчета о НИР за 3 этап
12	4.1.12	Макет сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера	Макет сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера, представленный в гл.4 отчета о НИР за 3 этап
12	4.1.13	Принципы создания адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров с протяженной базой в задачах мониторинга крупномасштабных объектов	Принципы создания адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров с протяженной базой в задачах мониторинга крупномасштабных объектов, представленные в гл.2 отчета о НИР за 4 этап
14	4.2.1	Проект Технического задания на проведение последующей НИР	Проект Технического задания на проведение последующей НИР, представленный в приложении к отчету по НИР за 4 этап.
15	4.2.2	Патенты на результаты интеллектуальной собственности в количестве не менее двух	Патент на полезную модель № 126820 «Устройство измерения деформаций протяженных объектов» по заявке № 2012148228/28 от 12.11.2012; Заявка на получение патента на полезную модель «Волоконно-оптический акселерометр», направленная в апреле 2013г.
16	4.2.3	Технологии, соответствующие мировому уровню, либо превосходящие его в количестве четыре, как ниже указано.	Соответствие технологий мировому уровню подтверждается результатами маркетинговых исследований, подтвержденными соответствующими отчетами, представленными на этапе 3 НИР.
17	4.2.3.1	Технология многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью	Технология системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток, представленная в отчете о НИР за 3 этап.
18	4.2.3.2	Технология системы мониторинга температурных и деформационных	Технология многоканальной системы мониторинга напряженно-

		распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток	деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью, представленная в отчете о НИР за 3 этап.
19	4.2.3.3	Технология создания деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра	Технология создания деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра, представленная в отчете о НИР за 3 этап.
20	4.2.3.4	Технология создания сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра	Технологии создания сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра, представленная в отчете о НИР за 3 этап.

Анализ таблицы 8 показывает, что в ходе выполнения НИР получены все запланированные результаты. Тем самым обеспечена полнота выполнения поставленных задач и достижения целей НИР.

4 Разработка рекомендаций по использованию результатов проведенных НИР в реальном секторе экономики, а также в дальнейших исследованиях и разработках

4.1 Разработка рекомендаций и предложений по использованию результатов проведенных НИР в области высоких технологий, связанных с осуществлением контроля за состоянием крупномасштабных природных и техногенных объектов

Проблема безопасности и экономичности зданий и сооружений относится к числу основных проблем, выдвинутых на первый план техническим прогрессом современной цивилизации. В условиях динамического развития строительной инфраструктуры при постоянном увеличении техногенных нагрузок на строительные объекты, достоверная информация об уровне их эксплуатационной надежности является необходимым условием безопасного и устойчивого развития общества. При этом внезапные обрушения сооружений с большепролетными конструкциями, произошедшие за последние годы в различных городах и странах мира (Москва - 2004 и 2006 гг., Пермь - 2006 г., Париж - 2005 г., Германия - 2006 г.), заставили мировое сообщество обратить особое внимание на проблемы мониторинга технического состояния таких объектов. В России данная проблема стоит наиболее остро, в частности, 46% жилых объектов находятся в неудовлетворительном состоянии, а 5% всего жилфонда (более 100 млн. кв. м или порядка 20000 единиц) составляют здания в аварийном состоянии, проживание в которых опасно для жизни. Поэтому в настоящее время вопросы обеспечения безопасности строительных сооружений являются важнейшими задачами государственной политики в области национальной безопасности.

Решением проблемы обеспечения эксплуатационной безопасности техногенных объектов, в том числе крупномасштабных и протяженных сооружений, таких как мосты, тоннели, здания, башни, плотины, дамбы, а также корабли, летательные аппараты и пр. является проведение их комплексного аппаратного мониторинга, включающего в себя сбор и анализ данных о напряженно-деформированном состоянии, распределении температур, линейных и угловых перемещениях структурных элементов с целью предотвращения или уменьшения последствий аварийных ситуаций.

Мониторинг – одно из наиболее быстро развивающихся направлений измерительных технологий. Стареющая инфраструктура, возникающие каждый день новые объекты требуют все более детального понимания движения происходящего с ними. Постоянный контроль критичных компонентов сооружений позволит руководителям объектов своевременно обнаружить явления, способные привести к тяжелым последствиям, вовремя эвакуировать людей и оборудование из опасной зоны, предотвратить несчастные случаи прежде, чем они произойдут, своевременно принять меры по доработке или усилению конструктивных элементов.

Особое внимание при разработке систем мониторинга крупномасштабных объектов уделяется особо опасным, технически сложным и уникальным объектам.

К особо опасным объектам относятся: ядерные объекты, объекты захоронения опасных отходов, гидротехнические сооружения 1-го и 2-го классов, крупные склады для хранения нефти и нефтепродуктов (свыше 20 тыс. тонн), объекты производства и переработки взрывоопасных веществ (с энергией взрыва эквивалентной 4,5 т тринитротолуола), предприятия подземной (глубина до 150 м) и открытой добыче твердых полезных ископаемых, тепловые электростанции мощностью свыше 600 МВт.

К технически сложным объектам относятся: морские порты, аэропорты с взлетно-посадочной полосой длиной не менее 1800 м, мосты и тоннели длиной более 500 м, метрополитены, крупные промышленные объекты с численностью занятых более 10000 человек.

К уникальным объектам относятся: стадионы, высотные здания, крупные торговые центры, киноконцертные залы и т.п.

Как показывает современная мировая практика, наиболее перспективным решением данной задачи является применение волоконно-оптических датчиков (ВОД), что обусловлено следующими их преимуществами: полная невосприимчивость к электромагнитным помехам, чувствительность к широкому кругу физических величин, химическая устойчивость, долговечность, простота сопряжения с высокоскоростными и помехозащищенными волоконно-оптическими линиями связи, а также возможность мультиплексирования и объединения большого количества сенсоров в распределенные информационно-измерительные системы.

Как показывают последние публикации, среди различных типов ВОД лидирующее положение занимают измерительные преобразователи на основе

волоконных брэгговских решеток (ВБР) благодаря высокой чувствительности к механическому напряжению и температуре, а также устойчивости к флуктуациям интенсивности оптического сигнала. Однако существенной проблемой при их практическом использовании является сложность и, как следствие, высокая стоимость спектральных систем для детектирования сигналов, формируемых ВБР при регистрации внешних воздействий. В рамках настоящей НИР был разработан принципиально новый рефлектометрический метод регистрации и мультиплексирования сигналов от волоконных брэгговских решеток с применением стандартного и широкодоступного рефлектометрического оборудования. Реализация данного метода приведет к 4 - 5 кратному снижению стоимости измерительных систем на основе ВБР и откроет недоступные ранее возможности экономически эффективного применения брэгговских датчиков для решения широкого круга измерительных задач в области мониторинга техногенных объектов, как на этапе их строительства, так и в период эксплуатации.

Измерительная система, реализованная на основе предлагаемого метода, включает в себя стандартный оптический рефлектометр и две волоконные линии, соединяемые при помощи циркулятора, одна из которых содержит ВБР-датчики, а вторая – две или более опорные перестраиваемые брэгговские решетки. Благодаря данной топологии, а также специально подобранным параметрам ВБР, получаемая в результате измерений рефлектограмма содержит два или более пика отражения от каждой из опрашиваемых ВБР, отношение амплитуд которых прямо пропорционально относительному удлинению и температуре соответствующего ВБР-датчика. В результате выполнения НИР была экспериментально достигнута пороговая чувствительность по относительному удлинению $\sim 50 \cdot 10^{-6}$ при диапазоне измерений $4 \cdot 10^{-3}$, что обеспечивает успешное применение разработанной системы для решения практических задач в области контроля эксплуатационной безопасности и мониторинга технического состояния крупномасштабных и протяженных техногенных объектов. В системе реализовано совмещенное спектрально-временное разделение измерительных каналов, при этом максимальное количество опрашиваемых брэгговских датчиков оценивается в несколько сотен, что значительно превышает характеристики ближайших аналогов.

Более привлекательным с точки зрения мониторинга крупномасштабных объектов является применение одноволоконных многомодовых интерферометров, обладающих распределенной чувствительностью. Система таких протяженных (до 100м) интерферометров способна охватить значительные площади и объемы исследуемого объекта. Такой интерферометр может быть встроен в конструкцию сооружения на стадии строительства. Однако сложность обработки выходного оптического сигнала, представляющего собой спекловую картину, которая к тому же не обладает долговременной стабильностью, привела к тому, что подобные устройства вообще не применяются на практике. Поэтому в рамках НИР были разработаны принципы построения многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью. Полученные результаты могут быть использованы для создания многоканальной (до 12-ти каналов) адаптивной системы мониторинга деформаций крупномасштабных объектов, обеспечивающую точность измерений ± 3 мкм; диапазон измерений 5 см; динамический диапазон 80 дБ. Применение подобной системы при соблюдении разработанной топологии расположения протяженных волоконно-оптических измерительных линий в форме петель различной длины, укладываемых вдоль выделенного направления на поверхности или в объеме исследуемого объекта, обеспечит восстановление пространственного распределения поля поперечных смещений исследуемого объекта.

Разработанные в ходе выполнения НИР принципы построения длиннобазовых деформометров на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера обеспечат создание специализированных измерительных устройств, предназначенных для мониторинга состояния зданий и других крупномасштабных сооружений. Кроме того, возможность обеспечить длину измерительной базы до 25 м позволит успешно использовать такие деформометры для решения задач обеспечения безопасной эксплуатации шахт и тоннелей.

Разработанные принципы построения сейсмоприемников на основе интерферометра Маха-Цендера обеспечат возможность создания сейсмодатчиков, которые могут быть успешно использованы для изучения влияния сейсмических волн, распространяющихся в земной коре, на состояние зданий и крупномасштабных

сооружений. Высокая помехозащищенность волоконно-оптических сейсмоприемников обеспечит возможность их активного внедрения в системы мониторинга состояния крупномасштабных объектов в условиях наличия значительных электромагнитных помех. Успешное решение задач сейсмометрического мониторинга обеспечит возможность обследования объекта в целом.

Таким образом, работы, выполненные в ходе настоящей НИР, являются актуальными в научной и прикладной сфере их применения. При этом главным направлением использования результатов проведенных исследований является решение задач мониторинга крупномасштабных и протяженных техногенных объектов. Дальнейшее развитие исследований в области создания адаптивных систем мониторинга крупномасштабных объектов связано с проведением прикладных НИР, направленных на создание опытных образцов измерительных систем с проведением их экспериментальных исследований в процессе решения конкретных задач обеспечения контроля за состоянием крупномасштабных природных и техногенных объектов. Полученные в результате таких исследований результаты будут использованы для проведения соответствующих ОКР.

4.2 Разработка рекомендаций по дальнейшему развитию и коммерциализации адаптивных систем дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов, выполненная Даляньским технологическим университетом

В настоящее время в гражданском строительстве, гидротехнике, машиностроении и в ряде других отраслей хозяйственной деятельности существует значительное количество нерешенных задач, связанных с контролем технического состояния и безопасности эксплуатации сооружений гражданского и гидротехнического строительства, структурных элементов машин и механизмов. Адаптивные системы дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов, разработанные в рамках настоящей НИР, позволяют экономически выгодно решать данные и аналогичные данным задачи. Главным направлением использования данных

систем является обеспечение безопасности эксплуатации элементов зданий, сооружений, плотин, дамб, тоннелей нефтедобывающих платформ, нефте- и газопроводов, элементов энергетической инфраструктуры и др. После проведения ОКР и доведения созданных разработок до уровня опытных образцов ожидается крупномасштабное тиражирование разработанных систем мониторинга для применения не только в вышеназванных, но и в смежных отраслях хозяйственной деятельности. Такие преимущества разработанных систем, как невосприимчивость к внешним электромагнитным помехам, агрессивным средам и радиации, использование стандартного измерительного оборудования, простота и надежность первичных чувствительных элементов, возможность оценки технического состояния контролируемых объектов по сигналам системы и возможность контроля состояния конструктивных элементов сооружений в течение длительного срока эксплуатации обеспечивают высокую конкурентоспособность созданных систем, как на российском рынке, так и за рубежом.

Главным направлением использования результатов проведенных исследований является проведение ОКР для создания завершенных научно-технических продуктов (НТП), ориентированных на решение задач мониторинга крупномасштабных и протяженных техногенных объектов. На данный момент разработанные адаптивные системы дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов находятся на стадии НИР. Следовательно, стадии коммерциализации проекта по сегменту «Измерительные приборы для мониторинга техногенных объектов» можно представить следующим образом:

1. Стадия «Скрытая коммерциализация»: НИР, ОКР, опытный образец, экспериментальное.

- 2010 - 2013 гг. – НИР;
- 2013 - 2016 гг. – ОКР;
- 2017 - 2018 гг. опытные образцы и их применение;

2. Стадия «Выход на рынок» (период 3-5 лет): создается серийное производство (мелкое и серийное).

- 2018-2019 гг. начало коммерческого производства и выход на рынок.

Анализ рынка сбыта завершенных НТП проводился для Дальневосточного региона России. Основными (потенциальными) потребителями результатов,

полученных при выполнении НИР, являются крупные и средние компании, занимающиеся строительством и обслуживанием крупных зданий и сооружений («Корпорация Инжтрансстрой», НПО «Мостовик», УСК «Мост», ЗАО «Крокус Интернэшнл», ОАО «Дальмостострой», ЗАО «ТМК», Дальневосточный арматурный завод «Аскольд» и др.). С учетом предполагаемой области использования разрабатываемых НТП - для мониторинга технического состояния, оценки несущей способности элементов зданий, сооружений, плотин, дамб, нефтедобывающих платформ и обеспечения безопасности их эксплуатации, потребность рынка для предприятий и организаций региона оценивается в 120-150 комплектов единовременно и не менее 15-20 ежегодно в течение последующего периода, (при этом в расчет не принимались перспективы развития работ на шельфе Сахалина и строительства нефтепровода "Сибирь - Дальний восток"). Полученные при выполнении НИР результаты представляют интерес в первую очередь для крупных потребителей, эксплуатирующих и строящих крупногабаритные и дорогостоящие сооружения. Предполагаемая схема распространения конечного продукта основана на том, что потенциальные потребители - крупные предприятия-пользователи. На первом этапе предполагается оснащение части объектов разрабатываемыми системами на условиях лизинга или товарного кредита с оказанием оплачиваемой технической помощи в организации работы систем. На втором этапе предполагается организация сервисных центров для оказания услуг по поставке, наладке и техническому сопровождению систем мониторинга на договорных условиях.

Учитывая, что для любой малоизвестной марки выход на рынок с дорогостоящим продуктом означает, что продажи будут невысоки, а рост рыночной доли очень медленным, для стимулирования роста рыночной доли будут применяться следующие маркетинговые стратегии:

- 1) Снижение стоимости НТП за счет широкого применения стандартных продуктов и элементов волоконной оптики в составе измерительного комплекса, а также за счет оптимизации его конструкции.
- 2) Предложение НТП с уникальными функциями обеспечивающими возможность оценки технического состояния крупномасштабных строительных объектов в течение длительного срока эксплуатации, возможность проведения дистанционных измерений с выводом результатов измерений на удаленный

компьютерный терминал в реальном времени в сочетании с предельной простотой и надежностью первичных измерительных преобразователей – одноволоконных многомодовых интерферометров.

- 3) Создание информационной инфраструктуры, обеспечивающей потенциальных потребителей информацией о свойствах, преимуществах и областях применения разрабатываемой системы.
- 4) Активная рекламная политика
- 5) Создание системы сервисных центров для технического обслуживания потребителей
- 6) Создание системы обратной связи между потребителями, производителями и разработчиками измерительных систем для непрерывного совершенствования их параметров.

Заключение

Таким образом, в ходе выполнения настоящего этапа НИР получены следующие основные результаты.

На этапе 4 настоящей НИР совместно с иностранным партнером, Даляньским технологическим университетом, проведены работы по обобщению и оценке полученных результатов, а также проведена выработка рекомендаций по их дальнейшему использованию.

Проведены дополнительные эксперименты с целью исследования возможности и определения путей улучшения характеристик систем мониторинга крупномасштабных объектов на основе средств волоконной оптики, представленные в главе 1. Иностраным партнером, Даляньским технологическим университетом, определены оптимальные параметры системы мониторинга температурных и деформационных распределений, при которых достигаются наилучшие чувствительность и динамический диапазон. В результате оптимизации схемы системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток было показано, что при регистрации механического напряжения и температуры брэгговской дифракционной решетки методом оптической временной рефлектометрии принимаемый сигнал прямо пропорционален измеряемому воздействию при выполнении следующих условий:

1. Полуширина спектра отражения ВБР много меньше, чем полуширина спектра мощности зондирующего импульса.

2. Полуширина спектра отражения ВБР больше чем разность длин волн двух соседних продольных мод спектра мощности зондирующего импульса.

Выполнено исследование корреляционных свойств спекл-сигналов, формируемых при прохождении лазерного излучения через одноволоконный многомодовый интерферометр, работающий в режиме возбуждения малого числа мод. Показано, что использование диффузного рассеивателя в схеме с ОМИ, работающем 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 $0.06 \Delta l_0$. При этом корреляционные характеристики рассеянного

диффузором светового поля могут рассматриваться как результат усреднения соответствующих характеристик для множества неоднородных интерференционных полей, формируемых непосредственно маломодовым ВС.

Установлено, 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 и не превышает 6% от характерного удлинения Δl_0 при соблюдении оптимальных условий регистрации спекл-картин приборами с зарядовой связью. Дополнительным условием минимизации погрешности в случае возбуждения узкого модового спектра в волоконном световоде является введение в схему ОМИ диффузора для рассеивания лазерного излучения на выходе волоконного световода.

Проведены дополнительные экспериментальные исследования деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Показано, что применение многовиткового чувствительного элемента в схеме интерферометра Маха-Цендера существенно повышает помехозащищенность деформометра.

Разработаны принципы создания адаптивных корреляционных фильтров на основе фоторефрактивных сред для обработки сигналов волоконно-оптических сенсоров с протяженной базой в задачах мониторинга крупномасштабных объектов. Показано, что применение фоторефрактивного кристалла ВТО обеспечивает возможность снижения времени записи голограммы в кристалле, что открывает возможность регистрации медленно протекающих сейсмопроцессов.

Выполнено обобщение и оценка полученных результатов. Разработаны рекомендации и предложения по использованию результатов проведенных НИР в области высоких технологий, связанных с осуществлением контроля за состоянием крупномасштабных природных и техногенных объектов. Разработаны рекомендации по дальнейшему развитию и коммерциализации адаптивных систем дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов, разработанные иностранным партнером – Даляньским технологическим университетом.

Полученные результаты вносят существенный вклад в развитие исследований методов контроля состояния природных и техногенных объектов. Результаты могут быть положены в основу создания высокочувствительных помехоустойчивых систем мониторинга состояния крупномасштабных объектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Кульчин Ю.Н., Беловолов М.И., Витрик О.Б., Дианов Е.М., Обух В.Ф. Исследование модуляции фазы и состояния поляризации в маломодовом волоконном световоде при аксиальных деформациях // Квантовая электроника. 1989. Т.16. №2. С. 2301-2304.

2 Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Кириченко О.В., Петров Ю.С., Каменев О.Т. Метод обработки сигналов двухмодового волоконного интерферометра // Автометрия 1995. №5. С.32-35.

3 Бусурин Б.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики. М.: Энергоатомиздат, 1990.

4 Снайдер А., Лав Дж., Теория оптических волноводов, М.: Мир., 1980.

5 Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Ланцов А.Д., 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. 2008. С. 22-24.

6 Зубов В.А., Крайский А.В., Голографическая память для информации с периодической структурой с изображением рассеивателя в плоскость голограммы при записи // Квантовая Электроника. 1980. Т 7. № 9. С. 2014-2017.

7 Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э.Удда. М. Техносфера. 2008. 520 с.

8 D.A.Jekson, R.Priest, A.Dandridge, A.B.Tveten. Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber // Applied Optics. 1980. V.19. N.17. P.2926-2929.

9 Sheem S.K., Giallorenzi T.G., Koo K.P. Optical techniques to solve the signal fading problem in fiber interferometers // Applied Optics, 1982. V.21. N4. P.689-693.

10 Волоконно-оптические датчики // Под ред. Т.Окиси: Перевод с японского Г.Н.Горбунова. Л. Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. 1990). 256 с.

11 S. Di Girolamo, A.A.Kamshilin, R.V.Romashko, Yu.N.Kulchin, J.-C.Launay. Fast adaptive interferometer on dynamic reflection hologram in CdTe:V // Optics Express. 2007. Vol.15. No.2. P.545-555.

12 М. П. Петров, С. И. Степанов, А. В. Хоменко. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л. Наука Ленингр. отд.-ние. 1983. 269 с.

13 R.V.Romashko, S.Di Girolamo, Y.N.Kulchin, A.A. Kamshilin. Photorefractive vectorial wave mixing in different geometries // J. Opt. Soc. Am. B. 2010. V.27. №.2. P.311-317.

14 Официальный сайт компании Micron Optics [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.micronoptics.com/sensing_instruments.php

15 Официальный сайт компании FOSTA Pte Ltd [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.fos-ta.com/index.html>

16 Официальный сайт компании FiberSensing [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=27795

17 Официальный сайт компании National Instruments [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/209012>

18 Официальный сайт компании BaySpec, Inc [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.bayspec.com/product.php?a_id=8

19 Официальный сайт компании Ibsen Photonics [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ibsenphotonics.com/im>

20 Официальный сайт компании Smart Fibres Limited [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.smartfibres.com/FBG-interrogators>

21 Официальный сайт компании Micron Optics [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.micronoptics.com/sensing_instruments.php

22 Официальный сайт компании FOSTA Pte Ltd [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.fos-ta.com/index.html>

23 Официальный сайт компании FiberSensing [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=27795

24 Официальный сайт компании National Instruments [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/209012>

- 25 Официальный сайт компании BaySpec, Inc [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.bayspec.com/product.php?a_id=8
- 26 Официальный сайт компании Ibsen Photonics [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ibsenphotonics.com/im>
- 27 Официальный сайт компании Smart Fibres Limited [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.smartfibres.com/FBG-interrogators>
- 28 Официальный сайт компании Smart Fibres Limited [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.tmljp.ru/>
- 29 Официальный сайт компании Smartec [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://smartec.ch/products.htm>
- 30 Сайт лаборатории физики геосфер [электронный ресурс] – Режим доступа: http://labfg.narod.ru/equipment/ld_mobil.htm
31. Официальный сайт компании Optiphase [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.optiphase.com/datasheets.html>
32. Официальный сайт компании ZetLab [электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.zetms.ru/catalog/Seismo/seismo-datchik_vs1311-s.php

Дальневосточное отделение Российской академии наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ
(ИАПУ ДВО РАН)



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИАПУ ДВО РАН
д.ф.-м.н., академик РАН

Ю.Н.Кульчин

«30» апреля 2013г.

ПРОЕКТ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ
на выполнение инновационного проекта

по теме

«Разработка действующих макетов адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга крупномасштабных техногенных объектов»

выполнен в рамках государственного контракта от 28 октября 2011г.

№ 11.519.11.5015

«Адаптивные системы удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения на основе физических принципов, разрабатываемых совместно с Даляньским технологическим университетом»

Руководитель работ,

д.ф.-м.н., академик

Ю.Н. Кульчин

Ответственный исполнитель:

В.н.с., д.ф.-м.н.

О.Т. Каменев

Владивосток 2013

1. Наименование проекта: «Разработка действующих макетов адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга крупномасштабных техногенных объектов»

2. Организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН)

(наименование организации)

3. Исполнитель: Лаборатория прецизионных оптических методов измерений

(наименование структурного подразделения)

4. Руководитель проекта академик РАН Кульчин Юрий Николаевич, директор ИАПУ ДВО РАН, тел. (423)2310439 e-mail:director@iacp.dvo.ru

(Ф.И.О., должность, уч. степень, телефон, e-mail)

5. Коды темы по ГРНТИ:

29.33 Лазерная физика

90.27.37 Оптические и оптико-физические измерения

59.41 Приборы для измерения оптических и светотехнических величин и характеристик

29.31.29 Формирование оптического изображения. Оптические приборы и оптические методы измерений

6. Сроки выполнения: 01.01.2014 – 31.12.2015

7. Цель работы:

Разработка действующих макетов адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга крупномасштабных техногенных объектов на основе:

- одноволоконного многомодового интерферометра (ОМИ);
- волоконных брэгговских решеток (ВБР) с применением рефлектометрического метода регистрации и мультиплексирования сигналов;
- волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера.

8. Имеющийся научный задел:

При выполнении НИР «Адаптивные системы удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения на основе физических принципов, разрабатываемых совместно с Даляньским технологическим университетом» исполнителями разработаны принципы организации и построения адаптивных систем удаленного мониторинга на основе дистанционных методов

неразрушающего контроля, волоконной и когерентной оптики, адаптивных методов обработки оптических сигналов с целью обеспечения безопасности эксплуатации крупномасштабных социальных объектов, производственных зданий, сооружений и механизмов, а также прилегающих к ним территорий. Созданы лабораторные макеты: системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток; многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью; деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера; экспериментального макета сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера.

9. Ожидаемые результаты и практическая реализация результатов работы НИР:

- создание действующих макетов:

системы мониторинга температурных и деформационных распределений с широким диапазоном измеряемых относительных удлинений / температур на основе волоконных брэгговских решеток;

многоканальной системы мониторинга напряженно-деформированного состояния крупномасштабных объектов на основе одноволоконных многомодовых интерферометров с распределенной чувствительностью;

деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера;

сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера;

10. Научно-техническая и практическая ценность ожидаемых результатов работы:

Результаты, полученные в ходе выполнения НИР будут использованы:

- для организации мелкосерийного производства адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов естественного и искусственного происхождения на основе физических принципов, разрабатываемых совместно с Даляньским технологическим университетом.
- при подготовке материалов дипломных и диссертационных работ по тематике проводимых исследований;

Коммерциализация планируется в форме государственных контрактов и государственно-частного партнерства с РАН, МЧС, организациями, занимающимися строительством и обслуживанием крупных зданий и сооружений.

11. Календарный план.

№ п/п	Наименование этапа	Срок выполнения	Результат, вид отчетности
1	2	3	4
1	Создание действующих макетов адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга крупномасштабных техногенных объектов	01.01.2014 – 31.12.2014	Действующие макеты адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга крупномасштабных техногенных объектов . Отчет о НИР.
2	Апробация действующих макетов адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга крупномасштабных техногенных объектов	01.01.2015 – 31.12.2015	Результаты испытаний действующих макетов адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга крупномасштабных техногенных объектов Конструкторская документация

13. Перечень научной, технической и другой документации, (или опытные образцы НТП), представляемой по окончании работы.

Ожидаемые результаты, в том числе результаты интеллектуальной деятельности, которым может быть предоставлена правовая охрана в соответствии со статьей 1225 ГК РФ:

действующие макеты адаптивных волоконно-оптических систем удаленного мониторинга крупномасштабных техногенных объектов на основе:

- одноволоконного многомодового интерферометра (ОМИ);
- волоконных брэгговских решеток (ВБР) с применением рефлектометрического метода регистрации и мультиплексирования сигналов;
- волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера.

По окончании каждого этапа работ будет предоставлен научно-технический отчет.

Руководитель организации

Научный руководитель проекта



[Signature]

Ю.Н. Кульчин

[Signature]

Ю.Н. Кульчин