

**Резюме проекта НИР, выполняемого в рамках ФЦП
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы»
по этапу № 4
Итоговое**

Номер контракта: 11.519.11.5015

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

Приоритетное направление: Рациональное природопользование.

Критическая технология: Технологии снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф.

Период выполнения: 28 октября 2011 г. – 03 июня 2013 г.

Плановое финансирование проекта: 14 млн. руб.

Бюджетные средства - 7 млн. руб.

Внебюджетные средства - 7 млн. руб.

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Ключевые слова: волоконная оптика, мониторинг, адаптивность, измерительная система, интерферометр, волоконная решетка Брэгга, деформометр, корреляционная обработка, сейсмосигнал.

1. Цель исследования, разработки

1.1. Проект направлен на 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.

1.2. 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. Конечным продуктом, создаваемым с использованием результатов проекта, являются физические принципы и схемы организации адаптивных систем удаленного мониторинга крупномасштабных объектов. Использование результатов НИР обеспечит создание новых технологий рационального природопользования, соответствующих мировому уровню, усиление конкурентных позиций отечественной науки и бизнеса, привлечение молодых ученых к международному сотрудничеству.

2. Основные результаты проекта

В ходе выполнения НИР получены следующие результаты.

На этапе 1:

1) Раскрыты особенности применения существующих подходов и методов, а также измерительных систем на их основе в конкретных практических задачах мониторинга крупномасштабных объектов. Полученные результаты использованы зарубежным партнером для проведения оценки потенциала применения методов волоконной и нелинейной оп-

тики в задачах 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. Разработанная модель использована иностранным партнером для проведения теоретического исследования зависимости регистрируемых сигналов от спектральных сдвигов опрашиваемых ВБР-датчиков для реализации рефлектометрического метода регистрации сигналов ВБР-датчиков в широком спектральном диапазоне.

Разработана физико-математическая модель длинноволнового деформометра на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера для регистрации линейных деформаций крупномасштабных объектов и сред.

На этапе 2:

На основе физических принципов измерения напряжения и температуры крупномасштабных объектов и сред 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. Результаты работ по определению оптимальных схем установки опорных волоконных брэгговских решеток в измерительной системе, выполненных иностранным партнером, Даляньским технологическим университетом, обеспечили независимость выходного сигнала измерительной системы от флуктуаций мощности световых источников. Разработанный метод обеспечивает максимальную чувствительность волоконно-оптических информационно-измерительных систем на основе волоконных брэгговских решеток показателя преломления и адаптивность выходного сигнала измерительной системы к флуктуациям мощности световых источников.

Разработан оптоэлектронный цифровой корреляционный способ обработки сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров, обеспечивающий 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.

Разработан метод стабилизации параметров волоконно-оптического деформометра на основе интерферометра Маха-Цендера с протяженной измерительной базой, обеспечивающий стабильность выходного сигнала интерферометра в условиях температурного дрейфа рабочей точки.

Разработан метод регистрации сейсмосигналов с использованием волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера, обеспечивающий высокую чувствительность.

На этапе 3:

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

Иностранном 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.

Иностранном партнером, Даляньским технологическим университетом, определены оптимальные параметры системы мониторинга температурных и деформационных

распределений, при которых достигаются наилучшие чувствительность и динамический диапазон.

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.

Определены оптимальная архитектура, максимальное количество измерительных каналов указанной системы и способы минимизации перекрестных помех между измерительными каналами.

Разработана технология создания деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра.

Создан экспериментальный макет деформометра с протяженной базой на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера.

Разработана технология создания сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра.

Создан экспериментальный макет сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера.

На этапе 4:

Иностранном 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. 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 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 про-

тяженной 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. Иностранным партнером, Даляньским технологическим университетом, выработаны рекомендации по дальнейшему развитию и коммерциализации адаптивных систем дистанционного мониторинга крупномасштабных объектов.

Основные характеристики макета системы 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 12; величина перекрестных помех < 50 дБ; время опроса 0,04 с.

Основные характеристики системы мониторинга на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР): нестабильность регистрируемого сигнала (при фиксированном удлинении ВБР-датчика) в пределах 0,1% при уменьшении мощности зондирующего импульса на 50%, пороговая чувствительность ВБР-датчиков по удлинению - $50 \cdot 10^{-6}$, пороговая чувствительность по температуре - 5°C . Максимальное количество мультиплексируемых датчиков - более 400, величина перекрестных помех - < 40 дБ.

Основные характеристики макета системы мониторинга на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера: пороговая чувствительность 0,024 μstrain , диапазон измерений 11000 мкм; погрешность измерений 0,24 мкм; частотный диапазон – 0,001...1000 Гц.

Основные характеристики макета сейсмодатчика на основе волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера: чувствительность 6000 В/мм; частотный диапазон 2...250 Гц; максимальное значение измеряемого перемещения 1 мм.

Новизна научных решений заключается в использовании: альтернативных принципов формирования и обработки выходных сигналов волоконно-оптических брэгговских измерительных преобразователей; новых принципов корреляционной обработки выходных сигналов одноволоконных многомодовых интерферометров и новых принципов построения чувствительного элемента на базе интерферометра Маха-Цендера.

В отличие от разрабатываемых в настоящем проекте измерительных систем существующие в настоящее время системы мониторинга крупномасштабных объектов не обладают требуемыми характеристиками и помехозащищенностью.

3. Охраноспособные результаты интеллектуальной деятельности (РИД), полученные в рамках исследования, разработки

Полезная модель патент № 126820 от 10.04.2013 «Устройство измерения деформаций протяженных объектов». По результатам работ на этапе 4 в ФГУ ФИПС направлена заявка на полезную модель № 2013120710 от 06.05.2013.

Полезная модель заявка «Волоконно-оптический акселерометр».

4. Назначение и область применения результатов проекта

Результаты проведенной НИР позволят модернизировать существующие методы и подходы проведения мониторинга состояния крупномасштабных объектов природного и техногенного происхождения, а также открыть новые области применения высокочувствительных измерительных систем, расширив тем самым рынок высокотехнологичного научного оборудования, а также услуг, связанных с его производством и внедрением.

5. Эффекты от внедрения результатов проекта

Создание предпосылок для появления конкурентноспособных образцов высокотехнологического оборудования. Повышение уровня безопасности эксплуатации объектов повышенной опасности, улучшение экологической обстановки. Повышение престижа и уровня Российской науки. Закрепление научных кадров на территории РФ.

6. Формы и объемы коммерциализации результатов проекта

Коммерциализация проектом не предусмотрена.

Директор Института автоматике
и процессов управления ДВО РАН,



Ю. Н. Кульчин

Руководитель отдела оптоэлектронных
методов исследования газообразных и
конденсированных сред ИАПУ ДВО РАН,
академик
М.П.



Ю. Н. Кульчин