

На правах рукописи
УДК 681.78

Степанов Константин Викторович

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА С
ПОВЫШЕННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ
НА ОСНОВЕ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА**

Специальность 05.11.07

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2021

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

Научный руководитель:	Пнев Алексей Борисович кандидат технических наук, начальник лаборатории волоконно-оптических систем НОЦ «Фотоника и ИК-техника» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Официальные оппоненты:	Тихомиров Сергей Владимирович , доктор технических наук, преподаватель аспирантуры Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений Куликов Андрей Владимирович , кандидат технических наук, доцент факультета лазерной фотоники и оптоэлектроники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»
Ведущая организация:	Акционерное общество «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»

Защита состоится «28» апреля 2021 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



М.С. Ковалев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Волоконно-оптические сенсорные системы (ВОСС) широко применяются в таких областях, как сейсмометрия нефтяных скважин, мониторинг состояния и контроль утечек в трубопроводах, регистрация деформаций сооружений и зданий. Основным отличием ВОСС, определяющим их преимущества и уникальные характеристики, является полное отсутствие электрического питания в сенсорных элементах датчиков, потому что все преобразования внешних воздействий в показания системы происходят за счёт изменения параметров распространяющейся световой волны. Это обеспечивает нечувствительность к электромагнитным помехам различной природы, полную взрыво- и пожаробезопасность датчика. Чувствительные элементы волоконных сенсоров являются химически инертными, что позволяет использовать их длительное время в коррозионно-опасных средах. ВОСС способны регистрировать различные параметры, такие как температура, растяжение, изгибы оптического волокна, прикладываемое давление и др. Отдельно стоит выделить возможность регистрации акустического воздействия на волоконно-оптический кабель. Существует несколько типов ВОСС регистрации акустических воздействий: точечные, квази-распределённые и распределённые. Среди них к самым перспективным можно отнести распределённые ВОСС на основе фазочувствительной рефлектометрии, т.к. в ряде случаев это единственный способ, позволяющий на большом расстоянии исследовать акустические воздействия. В связи с этим интерес к данным системам в последнее время очень высок.

ВОСС на основе фазочувствительной рефлектометрии начали своё развитие с работ группы учёных Техасского университета под руководством Г. Ф. Тейлора в начале 1990-х. На сегодняшний день работы по системам на основе фазочувствительного рефлектометра ведутся как в России, так и за рубежом. В России – это МГТУ им. Н.Э. Баумана, компании Т8-сенсор и «БГ-оптикс»; зарубежные: Silixa, Optasense и др. На текущий момент существуют научные группы, занимающиеся данной тематикой, в Испании (Hugo F. Martins, Universidad de Alcala), Канаде (Bao, Xiaoqi University of Ottawa), Китае (Zhang, Xuping, Nanjing University), Японии (Hisashi Izumita и Yahei Koyamada). Основные направления проводимых работ посвящены проблемам увеличения дальности действия системы для использования на сверхпротяжённых объектах, таких как трубопроводы, и увеличению пространственного разрешения, требуемого для сейсмологии нефтяных скважин, но вопросу повышения акустической чувствительности уделяется недостаточно внимания. Однако для ряда приложений, требующих регистрации слабых сигналов, таких как обнаружение дефектов рельсового полотна и колёсных пар, пороговая акустическая чувствительность существующих систем недостаточна.

В этой связи одним из важных направлений исследований в области фазочувствительной рефлектометрии является исследование возможностей повышения акустической чувствительности ВОСС. Поэтому разработка методов и технических путей построения ВОСС на основе фазочувствительного

рефлектометра с повышенной акустической чувствительностью представляется актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка методов повышения акустической чувствительности волоконно-оптических сенсорных систем на основе фазочувствительного рефлектометра.

Для этого были решены следующие **научно-технические задачи**:

1. Проведено аналитическое исследование существующих волоконно-оптических систем, предназначенных для регистрации вибрационных и акустических воздействий на протяжённых участках, и предложены методы повышения акустической чувствительности.
2. Разработана математическая модель процесса формирования сигнала в волоконно-оптической сенсорной системе на основе фазочувствительного рефлектометра, позволяющая выполнять многовариантный анализ системы по методу повышения акустической чувствительности к локальным воздействиям за счёт увеличения протяжённости оптического волокна при кольцевой укладке кабеля, а также методу повышения акустической чувствительности при использовании слабоотражающих волоконных брэгговских решёток.
3. Разработана методика расчёта отношения сигнал/шум волоконно-оптической сенсорной системы на основе фазочувствительного рефлектометра для оценки уровня минимально регистрируемого воздействия.
4. Созданы макетные образцы приборов, использующие предложенные методы повышения акустической чувствительности, на которых проведены экспериментальные исследования с целью проверки основных теоретических положений диссертации.

Объект исследования – волоконно-оптическая сенсорная система на основе фазочувствительного рефлектометра.

Предметом исследования являются методы повышения акустической чувствительности волоконно-оптических сенсорных систем на основе фазочувствительного рефлектометра.

Методы исследований. При решении теоретических и прикладных задач использованы методы теории дифракции, теория распространения излучения в оптическом волокне, теория вероятности, теория проектирования, экспериментальные методы исследований, методы обработки сигналов.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, заключается в следующем:

- предложен новый метод повышения акустической чувствительности к локальным воздействиям за счёт увеличенной протяжённости оптического волокна при кольцевой укладке кабеля;
- предложен новый метод повышения акустической чувствительности волоконно-оптических сенсорных систем, основанный на использовании слабоотражающих волоконных брэгговских решёток;
- разработана математическая модель процесса формирования сигнала в волоконно-оптической сенсорной системе на основе фазочувствительного рефлектометра и в рамках указанной модели разработаны методики расчёта

значений основных конструктивных параметров этой системы, при которых обеспечивается максимальная пороговая акустическая чувствительность.

Основные положения, выносимые на защиту:

- разработанная математическая модель и созданные на её основе методики расчёта позволяют определить оптимальные значения конструктивных параметров распределённых ВОСС с повышенной акустической чувствительностью на основе фазочувствительной рефлектометрии;
- разработанный метод повышения акустической чувствительности на основе слабоотражающих волоконных брэгговских решёток позволяет снизить уровень минимального регистрируемого сигнала более чем в 5 раз;
- предложенная схема ВОСС на основе слабоотражающих волоконных брэгговских решёток с использованием двух приёмников, регистрирующих излучение с неравноплечего интерферометра Маха-Цендера, позволяет исключить влияние зон минимальной чувствительности датчика, что обеспечило регистрацию воздействия величиной 4 нм при периоде нанесения СОВБР 20 м.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения её результатов при создании распределённой волоконно-оптической системы с повышенной чувствительностью.

Реализация результатов. Результаты диссертационной работы внедрены и применены в АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО НИИАС) в рамках внедрения системы интервального регулирования движения поездов с использованием распределённых акустических датчиков. Реализация результатов работы подтверждается соответствующим актом внедрения.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждена согласованностью математического моделирования и экспериментальных исследований, проведенных в ходе выполнения данной диссертационной работы, а также использованием аттестованного оборудования.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на восьми международных конференциях: «XXX Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине» (Москва, 2019), «Offshore Mediterranean Conference and Exhibition 2019, OMC 2019» (Италия 2019), «International Conference «Laser Optics» 2018, ICLO 2018 (Санкт-Петербург, 2018), «XXIX Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине» (Москва, 2018), «Progress in Electromagnetics Research Symposium» (Санкт-Петербург, 2017), «International Conference «Laser Optics», LO 2016 (Санкт-Петербург, 2016), «International Conference on Measurement Instrumentation and Electronics, ICMIE 2016» (Германия, 2016), XXVI Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине» (Туапсе-Небуг, 2015).

Основные результаты изложены в 19 публикациях, включенных в перечень ВАК РФ, из них 11 входят в международную базу данных Scopus. По результатам работы получено 4 патента на изобретения.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные

работы. Во всех работах, выполненных в соавторстве, соискатель непосредственно участвовал в постановке задач, разработке методов их решения, получении, обработке и анализе результатов исследований. Все экспериментальные результаты, вошедшие в диссертационную работу, получены совместно с соавторами работ, опубликованных по теме диссертации.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, трёх глав, общих выводов и списка литературы. Материал изложен на 130 страницах машинописного текста и содержит 90 рисунков, 20 таблиц и список литературы из 114 библиографических описаний.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проведённой работы и обоснован выбор формируемого в волоконном кабеле сигнала от акустического воздействия в качестве объекта исследований. Сформулированы цели, задачи, защищаемые положения, представлены ценность и практическое применение результатов. Также приведена структура диссертации.

В первой главе проведен анализ волоконно-оптических сенсорных систем, способных регистрировать акустические воздействия на протяжённых участках. Представлены основные научные группы и компании, занимающиеся исследованием и созданием систем регистрации акустических воздействий на протяжённых участках. Выявлены наиболее перспективные для данной задачи системы, основанные на фазочувствительном рефлектометре.

Сделан вывод, что пороговой акустической чувствительности существующих систем недостаточно для обнаружения для регистрации слабых сигналов, таких как обнаружение дефектов рельсового полотна и колёсных пар, и рассмотрены известные методы повышения акустической чувствительности. Существующие методы обладают недостатками, которые не позволяют достаточно увеличить акустическую чувствительность без ухудшения других параметров системы, таких как пространственное разрешение и протяжённость контролируемого участка.

Предложены два метода повышения акустической чувствительности: метод повышения акустической чувствительности к локальным воздействиям на основе увеличенной протяжённости оптического волокна за счёт кольцевой укладки кабеля, а также метод повышения акустической чувствительности на основе слабоотражающих волоконных брэгговских решёток (СОВБР).

Как известно, для фазочувствительного рефлектометра амплитуды обратнорассеянных волн складываются с учётом фаз. Для одного зондирующего импульса сложение происходит на участке, длина которого эквивалентна полуширине импульса $\left(\Delta z = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{n} \cdot \tau_{\text{имп}}\right)$ – пространственному разрешению системы. Таким образом, из-за затухания акустической волны от внешнего источника, её вклад в результирующий интерференционный сигнал зависит не только от амплитуды, но и от протяжённости относительно пространственного разрешения. Если максимум акустической волны от внешнего источника будет воздействовать на участок волокна длиной не менее Δz (Рисунок 1), вклад от воздействия на результирующий интерференционный сигнал будет наибольшим. Повышение акустической чувствительности к локальным воздействиям на

основе увеличенной протяжённости оптического волокна за счёт кольцевой укладки кабеля достигается за счёт того, что амплитуда воздействия на всём интервале пространственного разрешения не уменьшается (Рисунок 2).

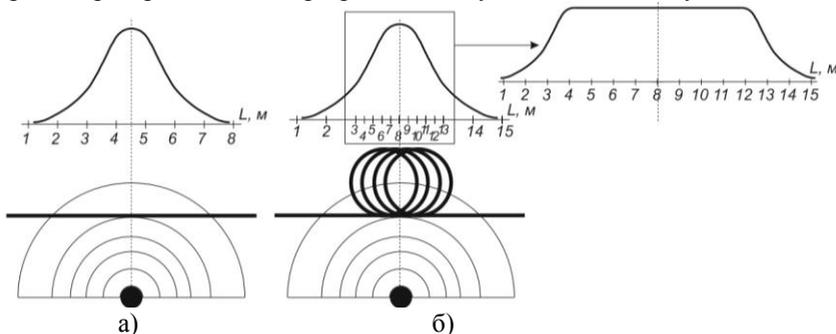


Рисунок 1. Схематичное представление отклика сигнала

а) при обычной прокладке кабеля, б) с использованием метода повышения акустической чувствительности к локальным воздействиям на основе увеличенной протяжённости оптического волокна за счёт кольцевой укладки кабеля

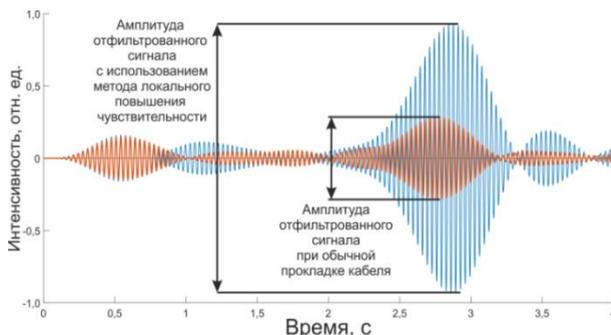


Рисунок 2. График интенсивности отфильтрованного смоделированного сигнала от времени

Повышение акустической чувствительности на основе использования СОВБР достигается за счёт увеличенной доли мощности приходящего на приёмник обратно-отражённого сигнала (10^{-3} для решётки с коэффициентом отражения 0,1 %, в то время как для рэлеевского рассеяния доля мощности составляет 10^{-6}), что приводит к отсутствию

необходимости использования оптического предусилителя, генерирующего основной шум в системе фазочувствительной рефлектометрии.

Описано отличие в формировании сигнала обратного рэлеевского рассеяния от сигнала, сформированного СОВБР.

В случае системы на рэлеевском рассеянии приходящий на приёмник сигнал представляется как результат сложения обратнорассеянных волн от всех неоднородностей в пределах полуширины длительности импульса. Каждая обратнорассеянная волна имеет случайную амплитуду с гауссовским распределением плотности вероятности и фазу, линейно зависящую от расстояния до рассеивающего центра. Таким образом, изменение фазы каждой волны из-за смещения рассеивающей неоднородности вносит нелинейный вклад в изменение итогового интерференционного сигнала. Данный процесс в упрощенном виде демонстрируется на Рисунке 3, на котором для наглядности

представлен результат сложения 10 волн до (сплошная линия) и во время механического воздействия Δl на волокно (пунктир). Каждому центру рассеяния соответствует свой цвет.

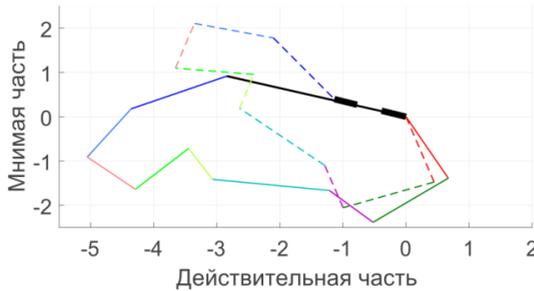


Рисунок 3. Результат моделирования обратнорассеянных волн для рефлектометрической системы

гармоническому закону. Смещение каждого центра рассеяния вносит вклад в изменение результата интерференции, который соответствует величине сигнала с участка сенсора. Но предсказать, приведёт это изменение к увеличению или уменьшению интенсивности сигнала, а также предсказать его монотонность и периодичность не представляется возможным.

Один из вариантов изменения результирующей интенсивности представлен на Рисунке 4.

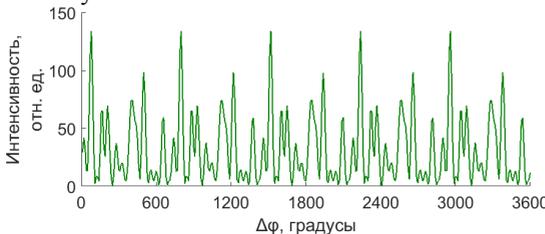


Рисунок 4. Изменение результирующей интенсивности обратнорассеянного сигнала в зависимости от величины деформации в случае системы с множеством случайно расположенных отражателей

Отражающие элементы и отличие в их изменении при растяжении или сжатии представлены на Рисунке 5. В фазочувствительном рефлектометре расстояние до каждого рассеивающего центра соответственно изменяется. Для СОВБР сигнал формируется за счёт интерференции всего двух волн, отражённых от соседних структур. В таком случае при любых периодических или монотонных деформациях волокна между ними будет происходить изменение сигнала от его минимального до максимального значения. На Рисунке 6 изображены отражённые волны от первой СОВБР ($\varphi_1 = \text{const}$) и от второй ($\Delta\varphi = \text{var}$), а также получающаяся результирующая волна. Данные графики представлены на комплексной плоскости, где по оси абсцисс и ординат откладываются, соответственно, действительная и мнимая компоненты световой волны, а стрелки обозначают складываемые отражённые компоненты: их модуль

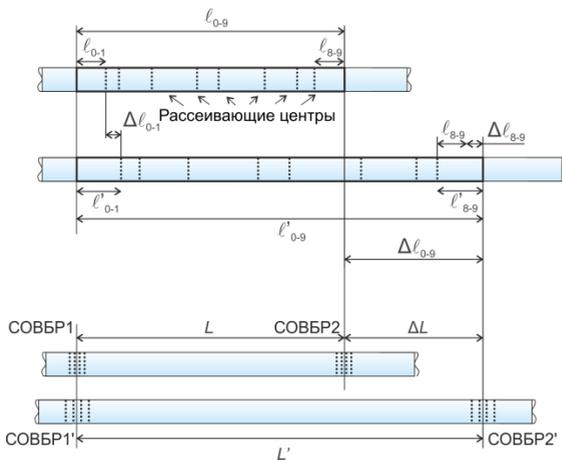


Рисунок 5. Схема изменения расстояния до отражателя в фазочувствительном рефлектометре на обратном рэлеевском рассеянии (сверху) и на основе СОВБР (снизу)

равен амплитуде волны, а угол с осью абсцисс – текущей фазе. Сложение нескольких волн в результирующий вектор в таком случае можно производить по правилам векторного сложения. Линейное изменение длины между двумя соседними СОВБР приводит к синусоидальному изменению суммарного сигнала. На Рисунке 7 показано изменение регистрируемой интенсивности в зависимости от величины изменения фазы между СОВБР.

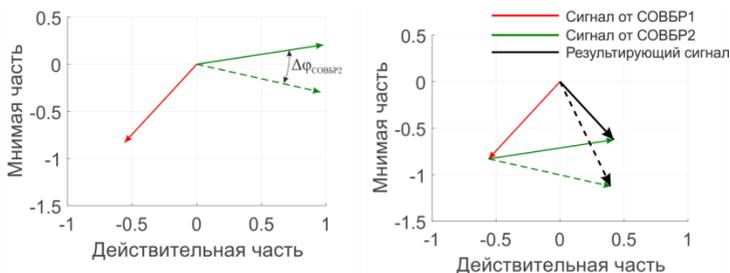


Рисунок 6. Схема формирования сигнала от двух СОВБР

Математически это выражается как сумма двух волн. Разностью амплитуд можно пренебречь, так как между соседними решётками она будет не более 1%.

$$E^2 = E_1^2 + E_1^2 + 2E_1E_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1)$$

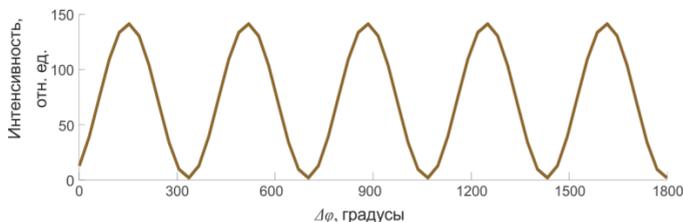


Рисунок 7. Изменение регистрирующей интенсивности обратноотражённого сигнала в зависимости величины изменения фазы между соседними СОВБР в самом участке. При этом фаза второй решётки из-за воздействия изменяется на величину $\Delta\varphi$:

Для описания формирования обратноотражённого сигнала от соседних СОВБР можно принять $\varphi_1 = const$, поскольку любые деформации волокна до измеряемого участка не влияют на разность фаз сигнала

$$E^2 = E_1^2 + E_1^2 + 2E_1E_2 \cos((\varphi_2 + \Delta\varphi) - \varphi_1). \quad (2)$$

Данное выражение показывает, что при линейном изменении фазы сигнал системы будет изменяться как функция синуса. При этом сама величина изменения фазы будет определяться общим изменением длины волокна между рѣтками:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi(L + \Delta L)}{\lambda}. \quad (3)$$

Во второй главе приведено описание математической модели формирования сигнала фазочувствительного рефлектометра, и в рамках указанной модели разработаны методики расчѣта основных параметров приборов, основанных на методе повышения акустической чувствительности к локальным воздействиям на основе увеличенной протяжѣнности оптического волокна за счѣт кольцевой укладки кабеля, а также методе повышения акустической чувствительности на основе СОВБР.

Итоговым параметром, на основе которого проводится анализ, является регистрируемая приёмником для каждой точки с координатой x вдоль кабеля интенсивность, рассчитываемая по Формуле (4).

$$I_{Receiver}(x) = \left| \int_x^{x + \frac{\tau_{ИМП} \cdot c}{2 \cdot n}} A_0 \cdot \exp(-2x\alpha) \cdot p(a) \cdot \exp\left(i \frac{4\pi n(x + \Delta x)}{\lambda}\right) \right|^2 \otimes F^{-1} \left\{ \exp\left(-\left[\frac{v}{v_{ЗДБ}}\right]^2\right) \right\}. \quad (4)$$

В качестве воздействия Δx смоделировано изменение длины определенного участка оптического волокна, как если бы данный участок был намотан на пьезокерамический цилиндр, на который подаѣтся напряжение известной формы и амплитуды. Вид задаваемого воздействия приведен Рисунке 8.

Предложена методика расчѣта отношения сигнала к шуму (ОСШ), заключающаяся в следующем:

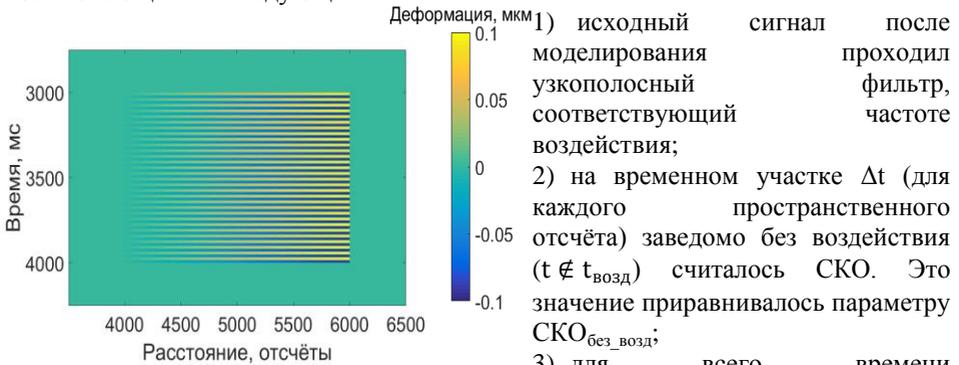


Рисунок 8. Вид задаваемого воздействия Δx

$$4) \text{ОСШ}_{\text{СКО}}(i) = \frac{\text{СКО}(i)}{\text{СКО}_{\text{без_возд}}},$$

$$5) \text{ОСШ} = \max(\text{ОСШ}_{\text{СКО}}(i)).$$

Из-за случайного характера поведения системы, величина $\text{СКО}_{\text{без_возд}}$ для каждой реализации варьируется в определённом диапазоне, что приводит к различным значениям $\text{ОСШ}_{\text{СКО}}$. И случай $\text{ОСШ}_{\text{СКО}} > 1$ не всегда определяет наличие воздействия. В дальнейшем моделировании выбрано, что условием стабильного распознавания наличия воздействия считается, когда наибольшее значение в массиве $\text{ОСШ}_{\text{СКО}}(i)$ выполняет условие: $\text{ОСШ} \geq 5$.

Блок схема методики расчёта ОСШ представлена на Рисунке 9.

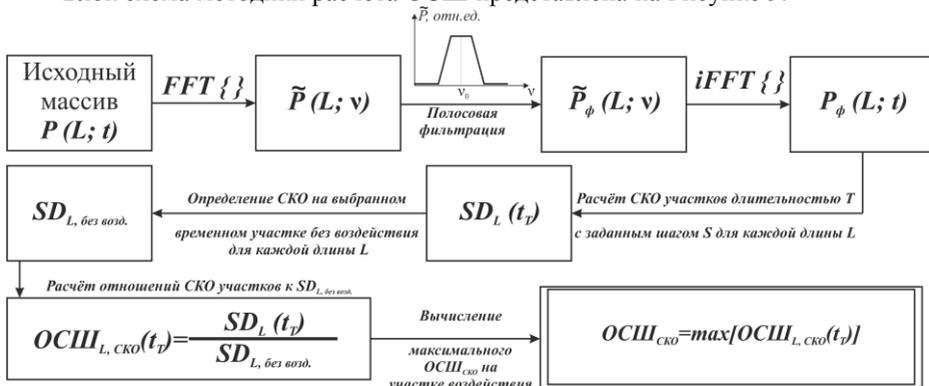


Рисунок 9. Блок схема методики расчёта ОСШ

Для более точной оценки системы было проведено моделирование 1000 реализаций её поведения для каждой амплитуды воздействия. Критерием работы системы была выбрана вероятность обнаружения 90 %, т.е. для 90 % реализаций $\text{ОСШ} > 5$. Численное моделирование проведено для трёх видов систем: для обычного рэлеевского рассеяния; для системы, использующей метод повышения акустической чувствительности к локальным воздействиям на основе увеличенной протяжённости оптического волокна за счёт кольцевой укладки кабеля; а также для системы, основанной на методе повышения акустической чувствительности на основе СОВБР.

На Рисунках 10 – 12 приведены гистограммы полученных значений ОСШ для воздействия различной амплитуды. В Таблицах 1 – 2 приведены результаты моделирования.

Таблица 1.

Результаты моделирования при использовании увеличенной до длины пространственного разрешения (10 м) протяжённости оптического волокна

	Кольцевая укладка кабеля	Кабель
Максимум распределения, ОСШ	8,37	3,45
Кол-во реализаций ОСШ < 5	21	807
Вероятность обнаружения	97,9 %	19,3 %

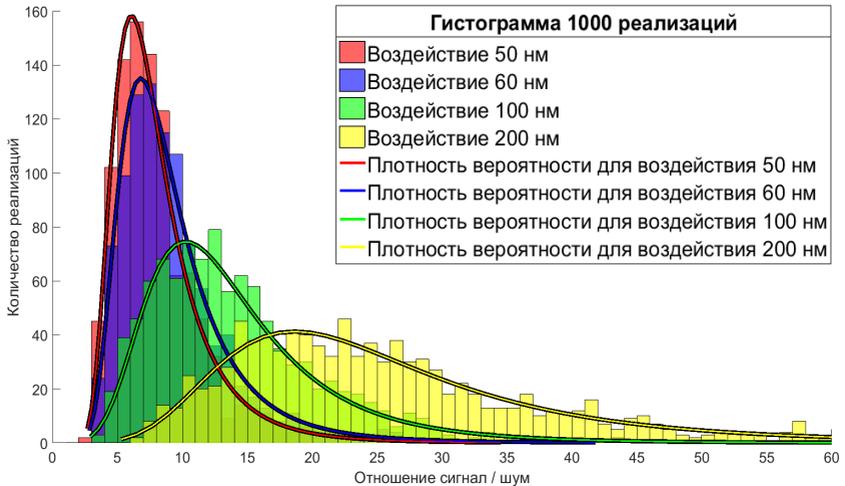


Рисунок 10. Гистограммы полученных значений ОСШ для воздействия различной амплитуды для обычного рэлеевского рассеяния

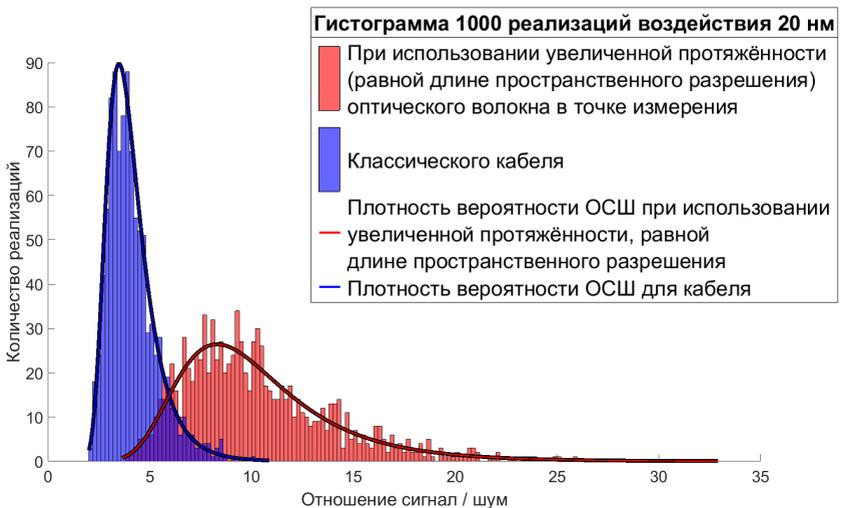


Рисунок 11. Гистограммы полученных значений ОСШ для случая классической укладки кабеля и с использованием метода повышения акустической чувствительности к локальным воздействиям на основе увеличенной протяжённости оптического волокна за счёт кольцевой укладки кабеля

Использование увеличенной до длины пространственного разрешения (10 м) протяжённости оптического волокна за счёт кольцевой укладки кабеля позволило увеличить ОСШ в 2,5 раза, что привело к увеличению вероятности обнаружения более 90 %.

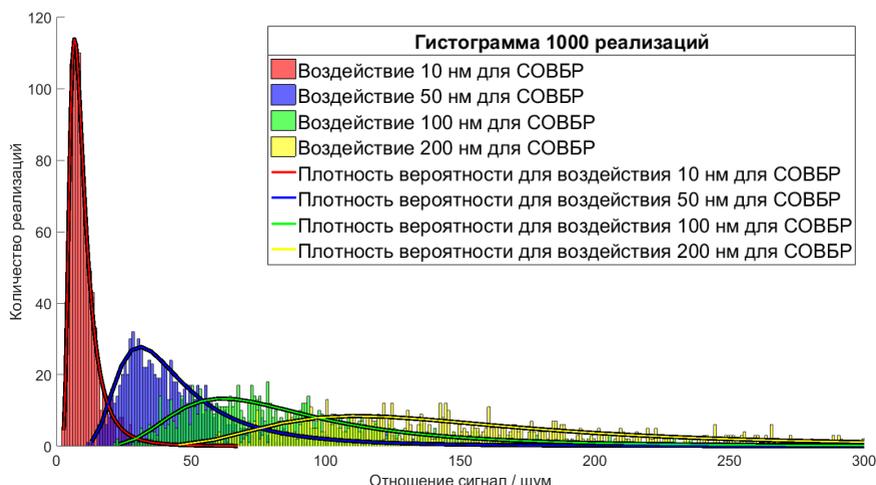


Рисунок 12. Гистограммы распределения ОСШ для пары СОВБР при различных амплитудах воздействия

Таблица 2.

Сравнение рассчитанных в ходе математического моделирования ОСШ различных конфигураций системы

Амплитуда воздействия, нанострейн	Центр распределения ОСШ для СОВБР	Вероятность обнаружения для СОВБР (по критерию ОСШ > 5)	Центр распределения ОСШ классического датчика	Вероятность обнаружения для классического датчика (по критерию ОСШ > 5)
10 нε	109,90	1000/1000	18,67	1000/1000
5 нε	59,97	1000/1000	10,03	97,8 %
3 нε			6,77	90,3%
2,5 нε	31,52	1000/1000	6,22	85,1 %
0,5 нε	6,59	90,8 %	Ниже порога обнаружения	Ниже порога обнаружения

Рассчитанные параметры показывают увеличение ОСШ системы на СОВБР по сравнению с классической системой более чем в 5 раз, а также снижение уровня минимального регистрируемого сигнала в 6 раз.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований предложенных метода повышения акустической чувствительности к локальным воздействиям на основе увеличенной протяжённости оптического волокна за счёт кольцевой укладки кабеля и метода повышения акустической чувствительности на основе СОВБР.

Экспериментальная часть работы по методу локального увеличения чувствительности проводилась на опытном полигоне Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана и в ходе испытаний чувствительности охранной системы. В ходе эксперимента кабель оптического волокна был закопан в траншею глубиной от 30 до 50 см, что соответствует стандартной глубине укладки кабеля для распределённых вибро-акустических систем. В эксперименте

использовалась одна марка оптического кабеля для разных конфигураций его укладки. Схема эксперимента представлена на Рисунке 13.

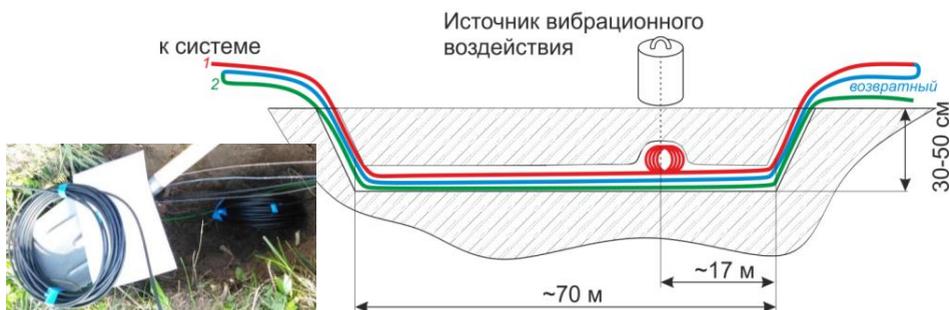


Рисунок 13. Схема расположения кабелей во время экспериментального исследования метода повышения акустической чувствительности к локальным воздействиям на основе увеличенной протяжённости оптического волокна за счёт кольцевой укладки кабеля

В Таблице 3 указаны значения параметров системы, используемых во время эксперимента.

Таблица 3.

Используемые во время эксперимента параметры

АЦП	100 МГц (дискретизация 2 м)
Длительности импульса	100 нс
Разрешение системы	10 м
Частота вибрационных воздействий	38 Гц, 55 Гц, 101 Гц
Расстояние источника воздействия до кабеля	Над кабелем, 2 м, 4 м

В Таблице 4 приведены значения полученных значений ОСШ, найденных для каждого эксперимента.

Таблица 4.

Полученные ОСШ

	Кабель	Катушка 10 м	
Среднее значение ОСШ на частоте 38 Гц (Количество экспериментов, для которых ОСШ > 5)			Увеличение ОСШ, раз
Над кабелем	15,75 (10 из 10)	39,37 (10 из 10)	2,50
2 м от кабеля	8,64 (7 из 10)	27,09 (10 из 10)	3,13
4 м от кабеля	8,09 (9 из 10)	18,8 (10 из 10)	2,25
Среднее значение ОСШ на частоте 55 Гц			
Над кабелем	15,27 (10 из 10)	33,03 (10 из 10)	2,16
2 м от кабеля	4,66 (5 из 10)	13,18 (10 из 10)	2,83
4 м от кабеля	3,98 (1 из 10)	4,88 (5 из 10)	1,23
Среднее значение ОСШ на частоте 101 Гц			
Над кабелем	7,66 (7 из 10)	9,96 (9 из 10)	1,30
2 м от кабеля	1,82 (0 из 10)	4,14 (3 из 10)	ОСШ < 5
4 м от кабеля	1,93 (0 из 10)	2,03 (0 из 10)	ОСШ < 5

Использование увеличенной до длины пространственного разрешения (10 м) протяжённости оптического волокна за счёт кольцевой укладки кабеля позволило в среднем увеличить ОСШ в 2,2 раза, что составило разницу с результатами моделирования 12 %.

Экспериментальное исследование метода повышения акустической чувствительности волоконно-оптических систем фазочувствительной рефлектометрии на основе СОВБР проводилось в лабораторных условиях с использованием волокна с записанными СОВБР, имеющими следующие параметры:

- расстояние между решётками $L_{реш}=20$ м,
- коэффициент отражения 0,3 %,
- ширина спектра решётки по уровню 3 дБ 1,2 нм,
- центральная длина волны 1550,12 с точностью 0,3 нм.

Для сравнительного анализа в начале экспериментов была определена чувствительность обычного оптического волокна на вибрационные воздействия (схема эксперимента приведена на Рисунке 14).

На Рисунке 15 изображены рассчитанные в главе 2 плотности вероятности распределения ОСШ для воздействий соответствующих амплитуд, среднее значение плотности распределения, а также средние значения полученных экспериментальных данных.

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными хорошо согласуется. Погрешность вызвана ограниченным количеством экспериментов, а также флуктуациями рабочей точки, обусловленными нестабильностью длины волны источника излучения, температурой вдоль кабеля и другими параметрами. Средняя относительная погрешность от средних значений плотности распределения и экспериментальных данных составила $\Delta_{срРэлРасс} = 13$ %.

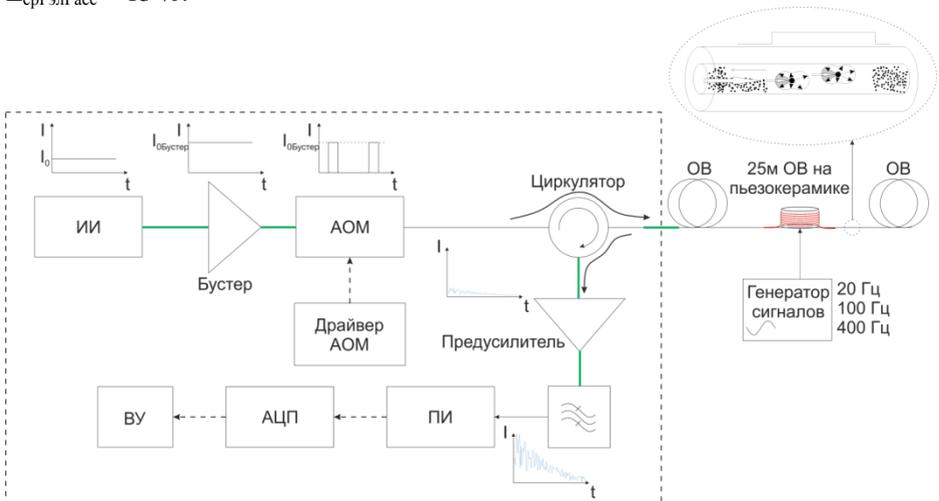


Рисунок 14. Схема эксперимента определения чувствительности системы на основе обратного рэлеевского рассеяния

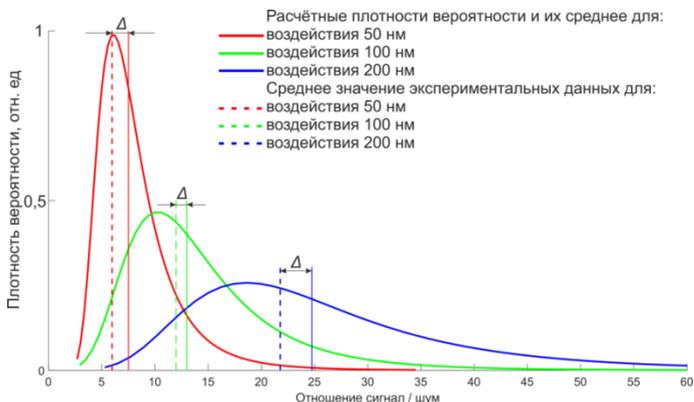


Рисунок 15. Графики рассчитанных плотностей вероятности ОСШ и полученные экспериментальные данные для системы на обратном рэлеевском рассеянии

Далее была определена чувствительность системы фазочувствительной рефлектометрии на основе СОВБР (схема эксперимента приведена на Рисунке 16).

Для экспериментальных данных системы на СОВБР также было проведено сопоставление с рассчитанными в главе 2 результатами (Рисунок 17).

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными для системы на СОВБР также хорошо согласуется. Средняя относительная погрешность от средних значений плотности распределения и экспериментальных данных составило $\Delta_{\text{срСОВБР}} = 28\%$.

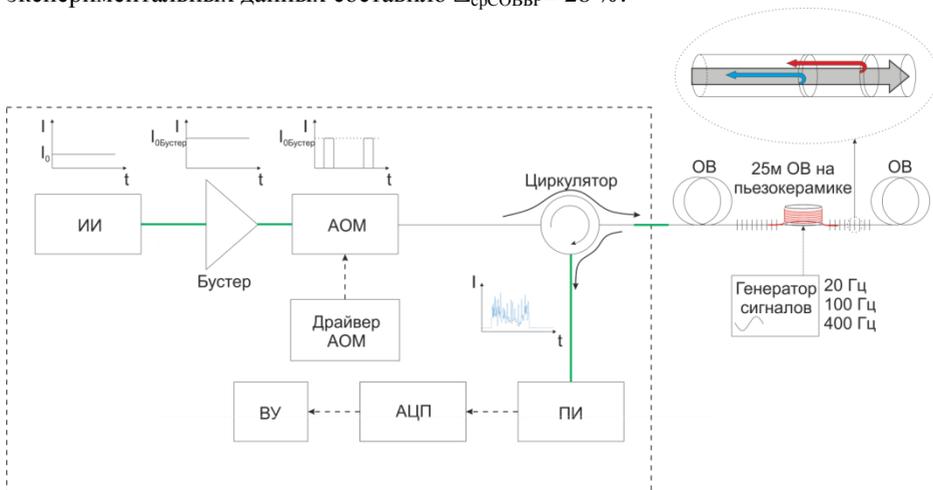


Рисунок 16. Схема эксперимента определения чувствительности системы на основе СОВБР

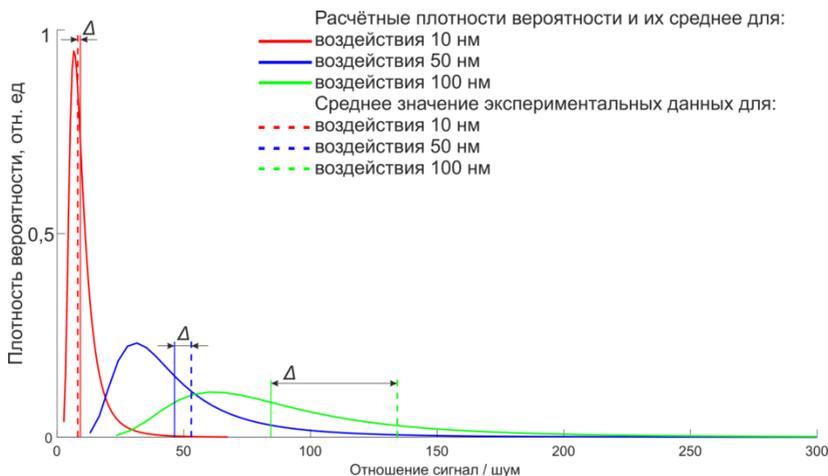


Рисунок 17. Графики рассчитанных плотностей вероятности ОСШ и полученные экспериментальные данные для системы на СОВБР

Задав критерий минимального регистрируемого сигнала как ОСШ равное 5, можно сделать следующие выводы. Полученные результаты показывают, что на значениях подаваемого напряжения 50 мВ, то есть амплитуде воздействия 50 нм, что является минимумом регистрации для волокна без использования СОВБР, для волокна с использованием СОВБР ОСШ составляет не менее 20. А минимальная амплитуда воздействия, при котором по заданному критерию регистрируется сигнал с использованием СОВБР, равняется 5 нм.

Особенностью формирования сигнала в волоконно-оптической системе на основе фазочувствительного рефлектометра являются флуктуации рабочей точки, обусловленные нестабильностью длины волны источника излучения, температуры вдоль кабеля и другими параметрами. Из-за этого эффекта возможно резкое снижение ОСШ при регистрации воздействий в зоне минимальной чувствительности.

Для устранения данного эффекта была предложена схема и создан экспериментальный образец системы с использованием двух приёмников. Для этого приёмная часть системы была модифицирована, как показано на Рисунке 18. В данном случае, непосредственно перед приёмниками излучения был установлен неравноплечий интерферометр Маха-Цендера, вход излучения в который осуществлялся разветвителем 1x2, одно из плеч имело дополнительно 10 м волокна, а выход излучения был направлен на разветвитель 3x3 (использованы были только два входа и выхода). Использование разветвителя 3x3 на выходе интерферометра позволит сместить фазу излучения на соседних приёмных каналах на $2\pi/3$, что приведёт к случаю, когда если на одном канале сигнал попадает в зону нечувствительности, в другом канале, наоборот, в рабочую зону. Результаты для частоты воздействия 100 Гц в Таблице 5.

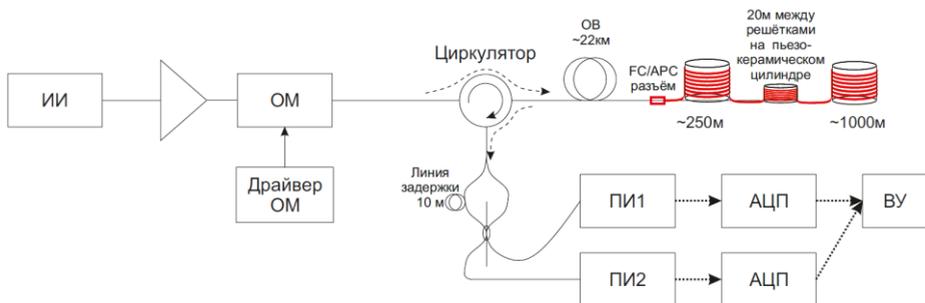


Рисунок 18. Схема эксперимента определения чувствительности системы на основе СОВБР с регистрацией на двух приёмниках

Таблица 5.

Полученные ОСШ для эксперимента с регистрацией на двух приёмниках на частоте 100 Гц

Величина воздействия, нм	5 000	2 000	1 000	500	200	100	50	20	10	5	4
Канал 1	76,3	399,8	241,3	542,9	283,2	88,1	70,1	23,8	11,4	7,0	6,3
Канал 2	150,6	118,7	336,3	233,7	295,1	61,3	79,9	14,0	14,3	<u>4,2</u>	<u>3,2</u>

Эксперименты подтвердили, что использование двух приёмников излучения, регистрирующих сигналы со смещёнными фазами, позволяет добиться результатов, когда хотя бы на одном приёмнике получаемые ОСШ удовлетворяют заданному, равному 5.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения работы.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- Создана математическая модель процесса формирования сигнала в волоконно-оптических сенсорных системах на базе фазочувствительного рефлектометра и на её основе разработана методика расчёта и проектирования ВОСС с повышенной акустической чувствительностью.
- Разработана методика расчёта отношения сигнал/шум ВОСС на основе фазочувствительного рефлектометра для оценки уровня минимально регистрируемого воздействия.
- Предложены два оригинальных метода повышения акустической чувствительности ВОСС, основанные на увеличенной протяжённости оптического волокна за счёт кольцевой укладке кабеля и на использовании СОВБР.
- Предложена схема и создан экспериментальный образец системы с использованием двух приёмников, регистрирующих излучение с неравноплечего интерферометра Маха-Цендера, которая позволяет исключить влияние зон минимальной чувствительности датчика.
- Созданы макетные образцы приборов, использующие предложенные методы повышения акустической чувствительности, на которых проведены

экспериментальные исследования, подтверждающие основные теоретические положения.

– Экспериментально получены характеристики чувствительности ВОСС на основе фазочувствительного рефлектометра с использованием СОВБР, обеспечивающие регистрацию воздействия величиной 4 нм при периоде нанесения СОВБР 20 м.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Stepanov K. V. [et al.] The Sensitivity Improvement Characterization of Distributed Strain Sensors Due to Weak Fiber Bragg Gratings // *Sensors*. 2020. Т. 20. №. 22. P. 6431. (2,19 п.л./1,10 п.л.)

2. Степанов К. В. [и др.] Влияние дрейфа частоты лазера в фазочувствительной рефлектометрии // *Оптика и спектроскопия*. 2019. Т. 127. №. 10. С. 603-610. (0,92 п.л./0,46 п.л.)

3. Степанов К. В. [и др.] Перспективы использования распределенных волоконно-оптических датчиков для контроля железнодорожного транспорта // *Автоматика, связь, информатика*. 2019. № 9. С. 11-13. (0,36 п.л./0,18 п.л.)

4. Степанов К. В. [и др.] Минимизация погрешности измерения фазовых шумов узкополосного лазера с помощью интерферометра Маха–Цендера на основе волокна с сохранением поляризации // *Измерительная техника*. 2018. №. 5. С. 37-42. (0,81 п.л./0,13 п.л.)

5. Stepanov K. V. [et al.] Yb, Er: glass Microlaser at 1.5 μm for optical fibre sensing: development, characterization and noise reduction // *АСТА ИМЕКО*. 2016. Т. 5. №. 4. P. 24-28. (0,58 п.л./0,12 п.л.)

6. Stepanov K. V. [et al.] Adaptation of the Er-Yb microchip laser for use in phase-sensitive optical time domain reflectometry // 2016 International Conference Laser Optics. IEEE, 2016. P. R1-5. (0,12 п.л./0,03 п.л.)

7. Stepanov K. V. [et al.] Note: Gaussian mixture model for event recognition in optical time-domain reflectometry based sensing systems // *Review of Scientific Instruments*. 2016. Т. 87. №. 3. P. 036107. (0,35 п.л./0,05 п.л.)

8. Stepanov K. V. [et al.] Mathematical analysis of marine pipeline leakage monitoring system based on coherent OTDR with improved sensor length and sampling frequency // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Т. 584. №. 1. P. 012016. (0,69 п.л./0,12 п.л.)

9. Stepanov K. V. [et al.] Experimental study of influence of nonlinear effects on phase-sensitive optical time-domain reflectometer operating range // *Journal of Physics: Conference Series*. 2015. Т. 584. №. 1. P. 012028. (1,16 п.л./0,2 п.л.)

10. Степанов К. В. [и др.] Волоконно-оптическое устройство регистрации вибрационных воздействий с восстановлением фазы с уменьшением влияния нестабильностей регистрирующего интерферометра // Патент России №2730887. Выд. 26.08.2020. (1,4 п.л./0,4 п.л.)

11. Степанов К. В. [и др.] Измеритель фазовых шумов узкополосных лазеров, основанный на состоящем из РМ-волокна интерферометре Маха–Цендера // Патент России №2664692. Выд. 21.08.2018. (1,39 п.л./0,15 п.л.)