

На правах рукописи

УДК 681.78

ГРИЦЕНКО ТАТЬЯНА ВАСИЛЬЕВНА

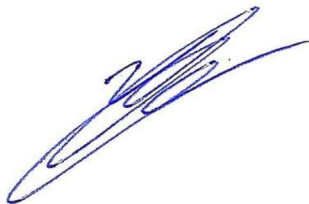
**РАСПРЕДЕЛЁННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ДВОЙНОГО
ВСТРЕЧНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА САНЬЯКА СО СПЕКТРАЛЬНЫМ
РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ**

Специальность – 2.2.6. «Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук



Москва – 2025

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

Научный руководитель: **Карасик Валерий Ефимович**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры лазерных и оптико-
электронных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Ушаков Николай Александрович**
доктор физико-математических наук,
профессор Высшей школы прикладной физики и
космических технологий, в. н. с. лаборатории
«Волоконная оптика» Санкт-Петербургского
политехнического университета Петра Великого

Никитин Сергей Петрович
кандидат физико-математических наук,
начальник отдела разработки лазеров ООО «Т8»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт радиотехники и
электроники им. В. А. Котельникова Российской
академии наук, г. Москва

Защита состоится «14» мая 2025 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.331.07 при Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана, расположенном по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Д.Г. Денисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современные акустические волоконно-оптические датчики (АВОД) получают всё более широкое распространение и активно используются в качестве охранных систем, позволяющих с высокой точностью определять местоположение нежелательных воздействий на протяжённый периметр, а также в качестве систем контроля состояния и охраны скважин, трубопроводов, железнодорожных путей, кабелей, в том числе подводных. Для этого применяются различные схемы распределённых АВОД и алгоритмы обработки сигналов на их выходе, среди которых можно выделить две основные группы: на основе рефлектометров и на основе интерферометров. Работы в этой области ведутся как в РФ (МГТУ им. Н. Э. Баумана, ИОФ РАН, ПФИЦ УрО РАН, ИАиЭ СО РАН, компании ПетроФайбер, Т8 и др.), так и за рубежом: в Китае (университет Фудань и др.), Саудовской Аравии (университет Принца Султана), а также в Нови-Садском университете в Сербии и Мариборском университете в Словении. Приведённые исследования демонстрируют перспективность датчиков на основе интерферометра Саньяка (ИС), благодаря их преимуществам по сравнению как с рефлектометрами, так и с АВОД на основе других интерферометров: высокой стабильности выходного сигнала, большой протяжённости контура, простоте оптической схемы без дорогостоящих оптических компонентов, в том числе, узкополосных лазеров и, следовательно, низкой стоимости. Большинство современных АВОД обеспечивают длину сенсора не более 80 км, а погрешность распределённых АВОД на основе интерферометров составляет порядка сотен метров. Основные направления проводимых за последнее время работ посвящены проблемам разработки новых схем и алгоритмов обработки данных для обеспечения высокой точности определения координат акустических воздействий порядка десятков метров и увеличения протяжённости сенсора для обеспечения высокой дальности действия системы на протяжённых объектах до 150 км. Однако, на сегодняшний день не предложены схема АВОД и алгоритм обработки данных, которые одновременно обеспечивали бы погрешность определения координаты воздействий не более 0,05 % при высокой протяжённости сенсора в реальных условиях. Кроме того, недостаточно

изученной остаётся проблема возникновения в сенсорах на основе ИС мёртвых зон, что оставляет пробелы в понимании возможностей и ограничений применения АВОД на основе ИС. В этой связи, весьма актуальной представляется проблема, связанная с анализом возникновения мёртвых зон в АВОД на основе ИС и возможности их устранения или компенсации.

Целью диссертационной работы является создание высокоточного распределённого АВОД на основе ИС для определения координат источников акустических воздействий с погрешностью не более 0,05% от длины контура протяжённостью до 150 км с компенсацией негативного влияния мёртвых зон на точность определения координат. Для достижения поставленной цели были решены следующие научно-технические **задачи**:

- Проведен анализ существующих схем построения волоконно-оптических датчиков акустических воздействий, в результате чего научно обоснована и разработана оригинальная схема распределённого АВОД на основе двойного встречного интерферометра Саньяка со спектральным разделением каналов.
- Создана математическая модель процесса формирования сигнала в АВОД на основе двойного встречного интерферометра Саньяка со спектральным разделением каналов.
- Разработан оригинальный алгоритм адаптивного порога для определения координаты источника акустического воздействия с применением двойного встречного интерферометра Саньяка.
- Получены расчётные соотношения, позволяющие определять положение и протяжённость мёртвых зон в АВОД на основе ИС, предложены и экспериментально верифицированы методы их устранения вдоль сенсорного волокна.
- Разработана методика расчёта погрешности определения координат в АВОД на основе ИС.
- Выполнено численное моделирование и экспериментальная верификация основных параметров разработанного распределённого АВОД.

- Создан макетный образец распределённого АВОД на основе двойного встречного интерферометра Саньяка со спектральным разделением каналов и лабораторные установки для верификации его основных параметров.

Объектом исследования является распределённый акустический волоконно-оптический датчик на основе интерферометра Саньяка.

Предметом исследования является обоснование возможности применения интерферометра Саньяка для регистрации акустических воздействий с погрешностью не более 0,05 % от протяжённости сенсорного волокна без мёртвых зон.

Методы исследования. В диссертационной работе использованы общенаучные методы, такие как анализ, идеализация, формализация, эксперимент, а также специальные методы: математическое моделирование, методы, основанные на теории распространения излучения в оптическом волокне, методы восстановления фазы сигнала, методы статистического анализа данных, цифровой обработки сигналов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана оригинальная схема АВОД на основе двойного встречного интерферометра Саньяка со спектральным разделением каналов (патент РФ 2752686 С1), обеспечивающая определение координат акустических воздействий с погрешностью не более 0,05 % от длины сенсора и устраняющая влияние мёртвых зон на точность измерений.
2. Создана математическая модель процесса формирования сигнала в распределённом АВОД на основе двойного встречного интерферометра Саньяка со спектральным разделением каналов, и на её основе проведено численное моделирование основных параметров АВОД.
3. Исследован и обоснован в научных публикациях механизм возникновения мёртвых зон в интерферометре Саньяка. Предложены принципы и технические пути построения аппаратуры, обеспечивающие устранение их влияния на погрешность определения координат акустических воздействий.
4. Разработан оригинальный алгоритм адаптивного порога для определения координат акустических воздействий в распределённых интерферометрических АВОД,

позволяющий достигнуть погрешности определения координат источников акустических воздействий менее 0,05% от протяжённости сенсора.

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная оригинальная схема волоконно-оптического датчика акустических воздействий на основе интерферометра Саньяка с двумя встречными контурами и спектральным разделением каналов позволяет определять координаты акустических воздействий на волоконные контура протяжённостью до 150 км с погрешностью менее 0,05 % от длины контура.

2. Созданная математическая модель, описывающая процесс формирования сигнала в распределённом волоконно-оптическом датчике акустических воздействий на основе двойного встречного интерферометра Саньяка и механизм возникновения мёртвых зон, позволяет провести проектирование высокоточного распределённого датчика для мониторинга протяжённых объектов, включая описание влияния мёртвых зон.

3. Применение алгоритма адаптивного порога, предложенного в работе и реализованного для анализа сигналов на выходе распределённых волоконно-оптических датчиков акустических воздействий позволяет достигнуть погрешности определения координат акустических воздействий на контур менее 0,05 % от его длины.

4. Предложенный оригинальный метод подавления влияния мёртвых зон, основанный на установке в середине контура компенсационных катушек длиной 1 км, позволяет полностью исключить их влияние на погрешность определения координат акустических воздействий с частотой выше 2 кГц вдоль всего сенсорного волокна распределённого волоконно-оптического датчика акустических воздействий.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в возможности применения полученных результатов при создании распределённых волоконно-оптических датчиков акустических воздействий на основе волоконных интерферометров для систем удалённого мониторинга протяжённых объектов, а также для улучшения характеристик существующих распределённых АВОД, в том числе, основанных на методе оптической рефлектометрии во временной области. Полученный в результате выполнения работы макет распределённого АВОД на основе ИС может применяться в качестве охранной системы.

Достоверность работы полученных результатов диссертационной работы основана на использовании ранее разработанных методов проведения численного моделирования и экспериментов, представленных в отечественных и зарубежных источниках, и подтверждается согласованностью результатов экспериментальных исследований с теоретическими положениями и расчётными соотношениями, полученными в работе, а также с результатами численного моделирования.

Реализация и внедрение результатов исследований. Основные результаты диссертационной работы внедрены в рабочий процесс ПАО «МГТС» при выполнении пилотных тестирований распределённых волоконно-оптических датчиков для мониторинга дорожной обстановки и охраны критической инфраструктуры, что подтверждается соответствующим актом внедрения. Научные исследования в рамках диссертационной работы поддержаны грантом РНФ № 22-29-01577, а также проводились в рамках выполнения Государственного задания № FSN-2029-0009. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана для актуализации лекционных занятий, домашних заданий и лабораторных работ в рамках дисциплины «Лазерные оптико-электронные приборы специального назначения» по специальности 12.05.01 «Оптико-электронные приборы и системы специального назначения».

Апробация результатов работы. Основные результаты работы были представлены на 13 ведущих научно-технических конференциях, в том числе: XIX, XX и XXI международные конференции «International Conference Laser Optics» (Санкт-Петербург, Россия, 2020, 2022 и 2024 гг.); XXXI, XXXII и XXXIII Международные конференции «Лазеры в науке, технике, медицине» (Москва, Россия, 2020, 2021 и 2023 гг.), Международная конференция «Photon-ics and Electromagnetics Research Symposium» (Ханчжоу, Китай, 2021 г.); VIII Всероссийская конференция по волоконной оптике (Пермь, Россия, 2021 г.); Международная конференция «Optical reflectometry, metrology and sensing» (Пермь, Россия, 2023 г.); два доклада на Всероссийской диановской конферен-ции по волоконной оптике (Пермь, Россия, 2023 г.); VIII Всероссийский форум

«Наука будущего – наука молодых» (Орел, Россия, 2023 г.), работа удостоена I места в научной секции «Транспортные системы, машиностроение и энергетика».

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 15 научных работах, в том числе, 6 трудов, входящих в перечень ВАК РФ или международные базы цитирования Web of Science: 3 статьи и 3 патента на изобретение, а также 5 тезисов конференций общим объемом авторского вклада 5,77 п. л.

Личный вклад автора заключается в разработке оригинальной схемы распределённого АВОД на основе двойного встречного ИС со спектральным разделением каналов, создании математических моделей протекающих в нём процессов и методик расчёта погрешности определения координат и измерения требуемой мощности источников и согласования их спектров, создании оригинального алгоритма обработки сигналов и новых способов устранения мёртвых зон, разработке лабораторных установок и проведении экспериментальных исследований основных параметров распределённого АВОД на основе двойного встречного ИС со спектральным разделением каналов. Содержание диссертационной работы 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 диссертационной работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников из 150 библиографических описаний. Материал изложен на ____ страницах машинописного текста и содержит 96 рисунков, 27 таблиц, 138 формул.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость. Приведены структура диссертации, формы апробации и практическая применимость результатов.

В первой главе изложены методы построения распределённых АВОД, проведена классификация схем построения сенсорной части существующих распределённых АВОД на основе рефлектометров и интерферометров Маха-Цендера, Майкельсона и Саньяка и проведён их анализ на основе сформулированных требований к характеристикам распределённого АВОД. Выявлены наиболее перспективные для данной задачи системы, основанные на ИС и создана их классификация. Показано, что ИС не требуют использования узкополосного лазера, что позволяет реализовать большую протяжённость контура из-за более высокого порога возникновения нелинейных эффектов, при этом выходной сигнал стабилен и не зависит от изменения температуры и давления окружающей среды, как видно из (1).

$$\Delta\varphi_{\text{ИС}}(t) = d\varphi\left(t - \frac{d_1 n}{c}\right) - d\varphi\left(t - \frac{(L-d_1)n}{c}\right) + \Omega + \frac{2\pi}{3} \quad (1)$$

где d_1 – координата воздействия на сенсор, n – показатель преломления волокна, c – скорость света, Ω – угловая скорость вращения ИС.

Выделено две основные группы схем на основе ИС: одноконтурные и двухконтурные. Одноконтурные демонстрируют высокую протяжённость сенсора, однако в них невозможно устранить мёртвые зоны (МЗ) и обеспечить достаточную точность определения координат, в отличие от двухконтурных схем, которые обеспечивают высокую точность и в ряде случаев – большую протяжённость сенсора и возможность компенсации МЗ. Однако, на сегодняшний день не представлено схемы, которая отвечала бы всем критериям. В результате проведённого анализа схема распределённого АВОД на основе двойного встречного ИС с мультиплексированием по состоянию поляризации была выделена как наиболее перспективная, но не обладающая достаточной протяжённостью контура и погрешностью определения координат. В этой связи была научно обоснована новая схема распределённого АВОД на основе двойного встречного ИС, оригинальность которой связана с введением спектрального разделения каналов с помощью мультиплексирования по длине волны с разреженным спектральным уплотнением (CWDM), представленная на Рисунке 1. Она включает в себя два контура ИС одинаковой длины, расположенные встречно для обеспечения возможности локализации воздействий: в первом контуре распространяется и интерферирует

излучение с длиной волны λ_1 , а во втором – с длиной волны λ_2 . За счёт введения спектрального разделения каналов появляется возможность увеличить длину сенсорного волокна, снизить погрешность определения координат, существенно уменьшить стоимость по сравнению с аналогами, а также создаются условия для компенсации мёртвых зон вдоль сенсорного волокна.

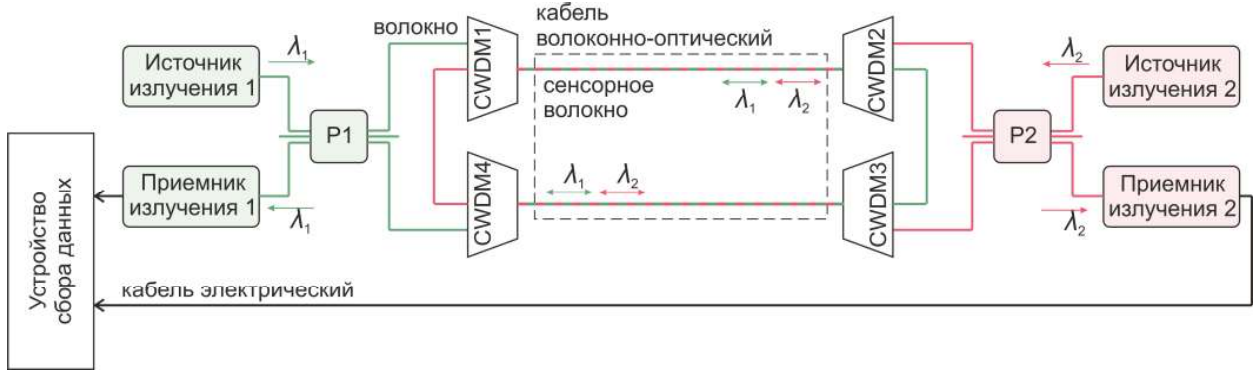


Рисунок 1. Оригинальная схема распределённого АВОД на основе двойного встречного ИС со спектральным разделением каналов

Вторая глава посвящена разработке математической модели процесса формирования сигнала в разработанной структурно-функциональной схеме АВОД. В ходе разработки математической модели проведён анализ сигналов на выходе двух встречных контуров во временной, формулы (2) – (5), и в спектральной, формула (6), области при наличии акустического воздействия.

$$\Delta\varphi_1(t, \Delta\tau_1) = \varphi_{\lambda_1}(t) - \varphi_{\lambda_1}(t - \Delta\tau_1) + \frac{2\pi}{3} + \frac{2\Omega_3 L^2 n}{\lambda_1 c}; \quad (2)$$

$$\Delta\varphi_2(t) = \varphi_{\lambda_2}(t - \Delta\tau) - \varphi_{\lambda_2}(t - \Delta\tau - \Delta\tau_2) + \frac{2\pi}{3} + \frac{2\Omega_3 L^2 n}{\lambda_2 c}; \quad (3)$$

$$I_1(t, \Delta\tau_1) = 2I_0 \cdot [1 + \cos(\Delta\varphi_1(t, \Delta\tau_1))]; \quad (4)$$

$$I_2(t - \Delta\tau, \Delta\tau_2) = 2I_0 \cdot [1 + \cos(\Delta\varphi_2(t - \Delta\tau, \Delta\tau_2))]. \quad (5)$$

$$\mathcal{F}\{\Delta\varphi(v_t, \tau)\} = \mathcal{F}\{\varphi(v_t)\} \cdot [1 - \cos(2\pi v_t \tau)] + \frac{2\pi}{3} \delta(v_t) \quad (6)$$

Выходные сигналы (зависимость интенсивности от времени) сдвигаются на величину $\Delta\tau = \frac{(d_2 - d_1)n}{c}$. На основе этого свойства вычисляется координата воздействия

$d_1 = \frac{L}{4} - \frac{\Delta\tau c}{n}$. При анализе сигнала в спектральной области показано, что при определённых (нулевых) частотах v_{null} в спектре формируются области с низкой

спектральной плотностью, по положению которых может быть вычислена координата воздействия $d_1 = \frac{1}{2} \left(L - \frac{c}{n \cdot v_{null,1}} \right)$.

Существующие алгоритмы обработки данных АВОД на основе интерферометров применяют одно из этих свойств. В результате проведённого анализа существующих алгоритмов впервые для ИС была показана возможность применения алгоритма общего порога и обоснован оригинальный алгоритм адаптивного порога, пороговый уровень TH в котором устанавливается и регулируется автоматически, что позволяет обеспечить малую погрешность определения координат и универсальность.

На основе созданной математической модели разработана методика расчёта погрешности определения координат. Выделены четыре её основных составляющие, формула (7) и показано, что систематические (определяемые неодинаковостью длины контуров Δz_L и дисперсией оптического волокна Δz_D) могут быть взаимно скомпенсированы, и основное влияние будут оказывать случайные составляющие: зависящие от отношения сигнал-шум (ОСШ) $\sigma_{z,OCШ}$ и частоты дискретизации АЦП $\sigma_{z,АЦП}$.

$$\Delta z_{\Sigma} = 1,4 \cdot \sqrt{\sigma_{z,АЦП}^2 + \sigma_{z,OCШ}^2} + \Delta z_L + \Delta z_D \quad (7)$$

Проведено численное моделирование (ЧМ) для каждой из данных составляющих отдельно. В ходе ЧМ погрешности определения координаты в зависимости от ОСШ для каждого из них было сформировано 100 реализаций при длине контура $L = 150$ км и фиксированной частоте дискретизации АЦП v_D при наличии или отсутствии низкочастотной составляющей. Каждая реализация была обработана с помощью трёх алгоритмов: адаптивного и общего порога, а также нулевых частот. По полученным результатам определения координаты построены и аппроксимированы распределением Гаусса гистограммы, по которым вычислена погрешность определения координаты, Рисунок 5. В ходе численного моделирования погрешности определения координаты в зависимости от частоты дискретизации АЦП было также сформировано и обработано данными алгоритмами 100 реализаций, но для фиксированного ОСШ и различных значениях v_D при тех же начальных условиях. Полученные зависимости для обоих

случаев согласуются с теоретическими выражениями. Пороговые алгоритмы обеспечивают в 10 раз меньшую погрешность определения координат, по сравнению с алгоритмом нулевых частот, при этом алгоритм адаптивного порога позволяет получить более чем в 3 раза меньшую погрешность: до 8 м при длине сенсора 150 км (менее 0,006 % от длины контура).

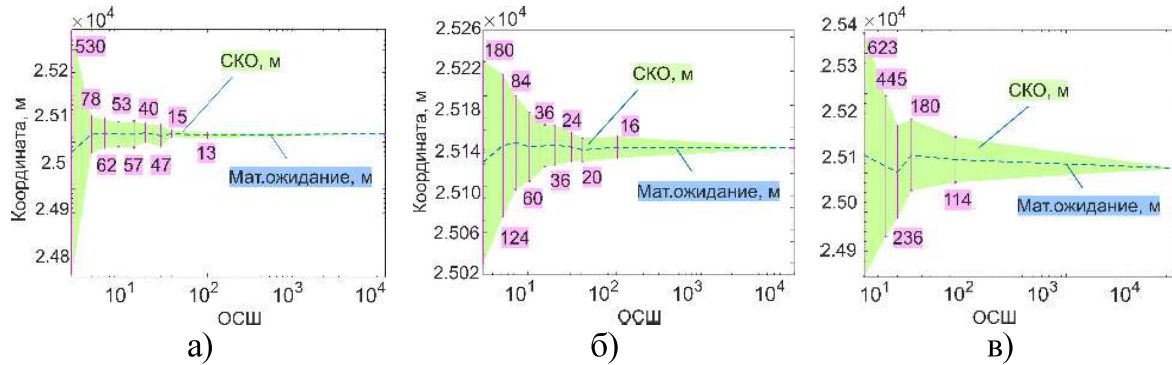


Рисунок 5. Зависимость погрешности определения координаты от ОСШ в распределённом АВОД на основе двойного встречного ИС при обработке данных по алгоритму адаптивного порога (а), общего порога (б) и нулевых частот (в)

В ходе исследования механизма формирования МЗ в АВОД на основе ИС выделены и проанализированы два основных параметра: динамический диапазон (ДД) разности фаз $\Delta\Phi(t)$ и порог чувствительности (ПЧ) $\Delta\varphi_{\text{П}}$. Показано, что МЗ в ИС формируется, когда ДД разности фаз на выходе контура меньше ПЧ. На основе соотношений, полученных в результате создания математической модели процесса формирования сигнала в ИС показано, что контур ИС характеризуется переменной чувствительностью (11), минимумы и максимумы которой распределены по уравнению гиперболы (12), а в середине контура всегда присутствует МЗ, и её протяженность зависит от f_t . Это подтверждают результаты численного моделирования, Рисунок 7. На Рисунке 7, а длина МЗ составила 600 м.

$$\Delta\varphi_{1,2}(t) = \sin(2\pi f_t t) \cdot A(t) - \sin\left(2\pi f_t \left[t - \frac{(L-2d_{1,2})n}{c}\right]\right) \cdot A\left(t - \frac{(L-2d_{1,2})n}{c}\right) \quad (11)$$

$$f_t = \frac{cN}{n(L-2d_1)} \text{ и } f_t = \frac{cN}{n(2d_2-L)} \quad N \in Z, \quad d_1 \leq \frac{L}{2}, \quad d_2 \geq 0 \quad (12)$$

В результате предложены способы компенсации МЗ в распределённом АВОД на основе ИС. Первый оригинальный способ предполагает включение дополнительного канала на третьей длине волны так, чтобы весь контур был поделён на три равных части

$L/3$. Как показало численное моделирование, данный способ полностью устраняет мёртвую зону, однако из-за особенностей его конструктивной реализации и увеличения стоимости схемы его применимость на практике весьма ограничена. В связи с этим, впервые применительно к распределённым АВОД на основе интерферометров был предложен второй способ сдвига МЗ за пределы сенсорного волокна с помощью компенсационных катушек. Это простой, легко реализуемый и дешёвый способ, который, как показало численное моделирование, позволяет полностью устранить мёртвую зону вдоль сенсорного волокна АВОД, что представлено на Рисунке 7, б.

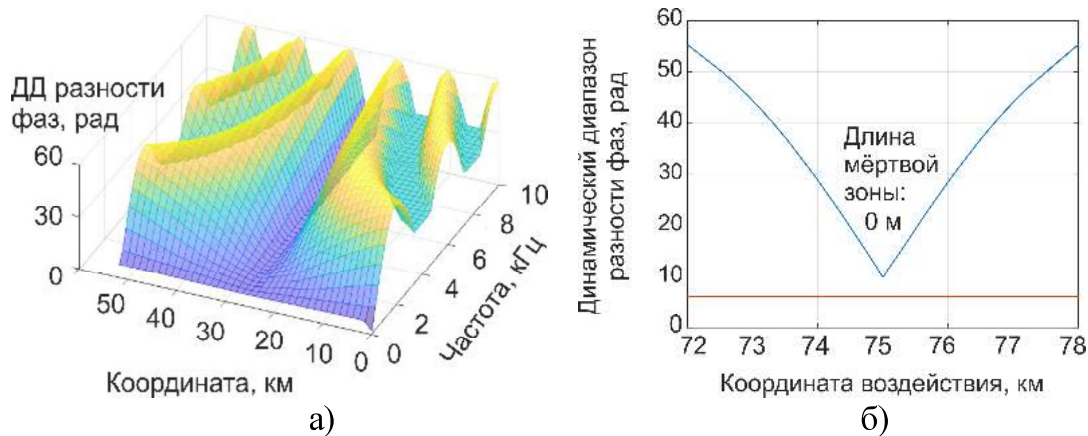


Рисунок 7. Численное моделирование зависимости ДД разности фаз от координаты и частоты воздействия (а) и от координаты воздействия при частоте 11 кГц и устранении МЗ с помощью компенсационных катушек (б)

В третьей главе разработан макетный образец нового распределённого АВОД для проведения экспериментальные исследования его основных характеристик и верификации основных положений и расчётных соотношений. Общий вид макетного образца представлен на рис. 9.

Созданы две авторские методики, необходимые для обеспечения достаточного уровня мощности на выходе датчика, что гарантирует его высокоточную работу: методика измерения степени согласования спектров источника со спектрами пропускания каналов CWDM и измерения требуемой мощности источников.

Для экспериментальной верификации по лученной зависимости ДД разности фаз от координаты и частоты воздействия, а также подтверждения эффективности способов

устранения МЗ были выполнены экспериментальные исследования с помощью специально разработанной установки.

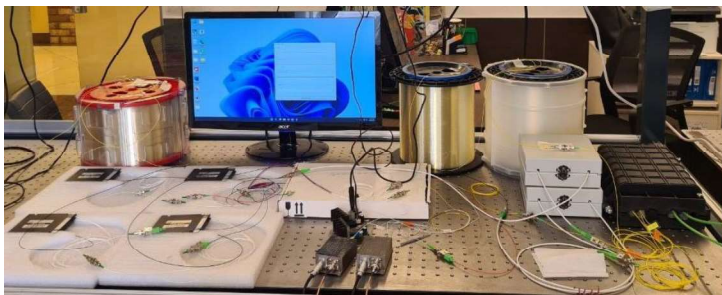


Рисунок 9. Макетный образец распределённого АВОД на основе двойного встречного ИС со спектральным разделением каналов.

протяжённость МЗ в середине контура составила 800 м, что согласуется с теоретическим значением 600 м. На рис. 11в показана зависимость после включения в контуры компенсационных катушек длиной 1 км, что подтверждает полное устранение МЗ.

Для серийных образцов распределённых АВОД на основе интерферометров типовая погрешность определения координат составляет 0,5 % от протяжённости сенсора. В связи с чем задачей экспериментальных исследований погрешности определения координаты являлась верификация высокой точности нового АВОД. Для этого была реализована сенсорная часть длиной 50 км, и акустическое воздействие оказывалось на расстоянии 25450 м от начала

Результат экспериментально измеренной зависимости в сравнении с полученной в результате численного моделирования представлен на рис. 11а,б: полученные зависимости совпадают, а измеренная

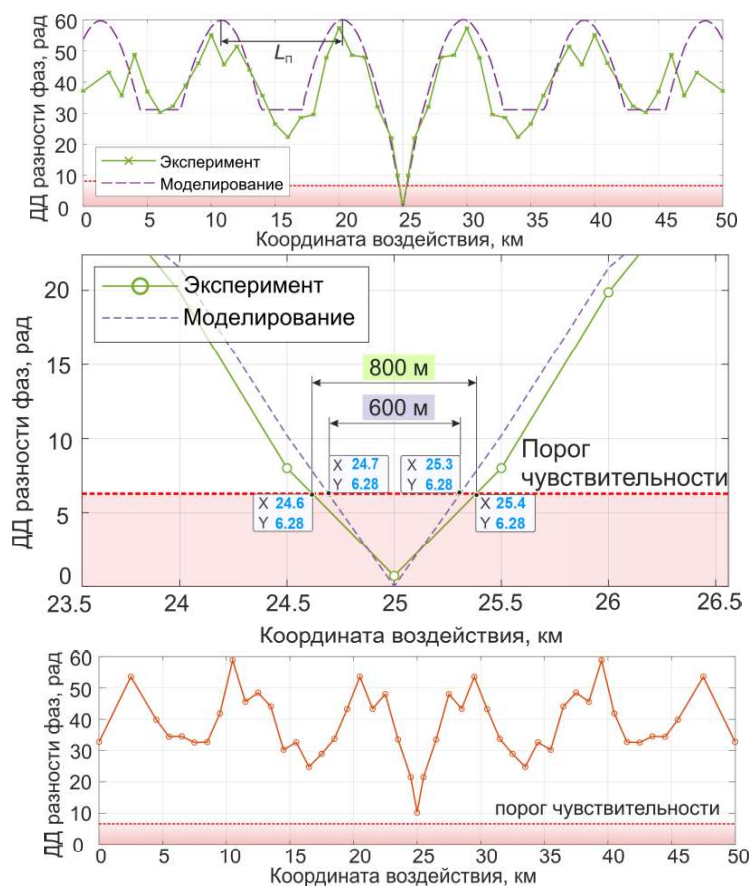


Рисунок 11. Измеренное распределение ДД разности фаз вдоль контура ИС и длина МЗ: а) вдоль контура без устранения МЗ, б) протяжённость МЗ, в) вдоль контура после включения L_K .

первого контура в два этапа. Для тех же условий, что были промоделированы численно, с помощью имитатора эталонного воздействия были записаны 100 реализаций данных с известными параметрами воздействия, каждая – обработана при помощи алгоритмов общего и адаптивного порогов и результаты представлены в виде гистограммы и аппроксимированы распределением Гаусса. Результаты экспериментальных исследований погрешности определения координаты воздействия согласуются с результатами численного моделирования, что видно из Таблицы 1. При частоте дискретизации АЦП 25 МГц значения несколько отличаются от результатов численного моделирования: 19 м (0,038 %) по сравнению с 8 м (0,016 %), что связано с тем, что в ходе численного моделирования не учитывалось влияние поляризации на процесс формирования сигнала. В обоих случаях алгоритм адаптивного порога позволяет получить меньшую погрешность определения координаты менее 0,05 % от длины контура.

Таблица 1. Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов определения координаты воздействия на контур

Параметры		Численное моделирование		Результат эксперимента
Алгоритм	ν_D , МГц	Теор., м	Погрешность, м (%)	
ОП	1	200	305 (0,610 %)	426 (0,852 %)
АП			253 (0,506 %)	250 (0,500 %)
ОП	5	40	103 (0,206 %)	60 (0,120 %)
АП			159 (0,318 %)	36 (0,072 %)
ОП	10	20	35 (0,070 %)	33 (0,066 %)
АП			33 (0,066 %)	23 (0,046 %)
ОП	25	8	28 (0,056 %)	21 (0,040 %)
АП			8 (0,016 %)	19 (0,038 %)

Заключительным этапом экспериментальных исследований была верификация работоспособности распределённого АВОД в реальных условиях. В данных экспериментах из-за ограничений оборудования были записаны реализации данных с частотой дискретизации АЦП $\nu_{\text{АЦП}} = 10$ МГц. Воздействия были успешно зарегистрированы и в результате обработки с помощью алгоритма адаптивного порога координата определена с погрешностью 55 м (0,1 %), что подтверждает применимость разработанного датчика в качестве охранной системы.

Таким образом, в третьей главе, подтверждена правильность основных теоретических положений и расчётных соотношений второй главы и можно сделать вывод о том, что разработанный АВОД на основе двойного встречного ИС со спектральным разделением каналов успешно работает в условиях, приближенных к реальным и обеспечивает высокоточное определение координаты воздействий вдоль сенсорного волокна без мёртвых зон, что демонстрирует перспективность его применения для решения задач охраны и мониторинга протяжённых объектов.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложена и научно обоснована оригинальная схема распределённого АВОД со спектральным разделением каналов, обеспечивающая определение координат акустических воздействий с погрешностью не более 0,05% от протяжённости сенсорного волокна длиной до 150 км.
2. Создана математическая модель процесса формирования сигнала, на основе которой разработана методика оценки погрешности датчика и определения положения и протяжённости мёртвой зоны вдоль контура, а также проведено численное моделирование основных параметров АВОД.
3. Предложен новый надёжный и универсальный алгоритм определения координат на основе адаптивного порога, позволяющий снизить погрешность до 0,05 % от длины контура, и проведена его верификация в результате численного моделирования и экспериментальных исследований.
4. Впервые применительно к распределённым интерферометрическим АВОД предложены способы устранения мёртвой зоны в середине контура ИС с помощью дополнительного спектрального канала или компенсационных катушек.
5. На основе математической модели разработаны методики расчёта погрешности определения координат, измерения требуемой мощности источников излучения и согласования их спектров, используемые при проектировании распределённых АВОД со спектральным разделением каналов.
6. Разработан макетный образец и проведены экспериментальные исследования его характеристик. Полученные результаты экспериментальных исследований согласуются с

результатами численного моделирования, что подтверждает правильность основных теоретических положений и расчётных соотношений.

Дальнейшее исследование распределённых АВОД на основе ИС остаётся актуальным и может быть направлено на проектирование систем с увеличенной надёжностью для эксплуатации в сложных климатических, в том числе, арктических, условиях, создание новых алгоритмов для распознавание типов воздействий и исследование способов регистрации множественных воздействий на контур.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. A distributed acoustic sensor based on dual-Sagnac interferometer with counter loops / Gritsenko (Choban) T. V. [et al.] // Photonics and Electromagnetics Research Symposium, IEEE. 2021. P. 2922 – 2928. (0,69 п.л./0,46 п.л.)
2. Distributed acoustic sensor using a double Sagnac interferometer based on wavelength division multiplexing / Gritsenko (Choban) T.V. [et al.] // Sensors. 2022. V. 22, № 7. is. 2772. (2,19 п.л./1,73 п.л.)
3. Study of sensitivity distribution along the contour of a fiber-optic sensor based on a Sagnac interferometer / Gritsenko T. V. [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. 2023. V. 66, № 5. P. 788-794. (0,81 п.л./0,69 п.л.)
4. Распределённый датчик акустических воздействий на основе интерферометра Саньяка с опросом по методу «нулевых частот» / Гриценко (Чобан) Т. В. // Фотон-Экспресс. 2021. Т. 2, № 170. С. 14-17. (0,46 п.л./0,35 п.л.)
5. Распределенный волоконно-оптический акустический датчик на основе интерферометра Саньяка с регистрацией воздействия по пороговому уровню сигнала / Гриценко (Чобан) Т. В. // Политехнический Молодежный Журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2021. Т. 9. №. 62. С. 1 – 10 (1,16 п.л./1,16 п.л.)
6. Распределённый волоконно-оптический датчик вибрации на основе интерферометра Саньяка / Гриценко (Чобан) Т.В. [и др.] // XXXI Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине»: сборник научных трудов конференции. 2020. Т. 31. С. 99 – 104. (0,58 п.л./0,35 п.л.)

7. Влияние источников излучения на шумы сигнала в распределённом волоконно-оптическом сенсоре на основе интерферометра Саньяка / Гриценко (Чобан) Т.В. [и др.] // Фотон-Экспресс-Наука. 2021. Т. 6. С. 260 – 261. (0,23 п.л./0,12 п.л.)
8. Sensitivity of distributed acoustic sensor based on Sagnac interferometer / Gritsenko (Choban) T.V. [et al.] // IEEE Xplore Proceedings of 2022 International Conference Laser Optics. 2022. P. 01 – 01. (0,12 п.л./0,06 п.л.)
9. Устранение мёртвых зон в распределённом волоконно-оптическом акустическом датчике на основе интерферометра Саньяка / Гриценко Т. В. [и др.] // XXXIII Международная конференция «Лазеры в науке, технике, медицине»: сборник научных трудов конференции. 2022. Т. 33. С. 197 – 200. (0,46 п.л./0,35 п.л.)
10. Патент № 2752686 С1 Российская Федерация, G01H 9/00 (2006.01), G01D 5/353 (2006.01). Основанный на интерферометре Саньяка распределённый датчик регистрации вибрационных воздействий с повышенной точностью определения координаты воздействия: № 2020144053: заявл. 29.12.2020: опубл. 29.07.2021 / Жирнов А. А., Гриценко (Чобан) Т. В., Степанов К. В., Чернуцкий А. О., Хан Р. И., Кошелев К. И., Карасик В. Е., Пнев А. Б., заявитель Жирнов А. А. – 12 с. (1,39 п.л./0,92 п.л.)
11. Патент № 2730887 С1 Российская Федерация, G01H 9/00 (2006.01). Волоконно-оптическое устройство регистрации вибрационных воздействий с восстановлением фазы с уменьшением влияния нестабильностей регистрирующего интерферометра: № 2019142777 заявл. 19.12.2019: опубл. 26.08.2020 / Пнев А. Б., Степанов К. В., Жирнов А. А., Чернуцкий А. О., Шелестов Д. А. Кошелев К. И., Гриценко (Чобан) Т. В., Карасик В. Е., заявитель Степанов К. В. – 12 с. (1,39 п.л./0,23 п.л.)
12. Патент № 2824433 С1 Российская Федерация, G01D 5/353 (2006.01). Волоконно-оптическое устройство регистрации вибрационных воздействий с основанной на внутриволоконных интерферометрах компенсацией нестабильности длины волны: № 2023127054: заявл. 18.10.2023: опубл. 07.08.2024 / Гриценко Т. В., Жирнов А. А., Степанов К. В., Чернуцкий А. О., Хан Р. И., Кошелев К. И., Карасик В. Е., Пнев А. Б., Бутов О. В., Лопунов А. И., заявитель Гриценко Т. В. – 12 с. (1,39 п.л./0,69 п.л.)