



Петров Александр Викторович

**Демодуляция сигналов межмодового волоконного
интерферометра**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Работа выполнена в Высшей школе прикладной физики и космических технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Научный руководитель

Котов Олег Иванович

доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной физики и космических технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Официальные оппоненты:

Дудкин Валентин Иванович

доктор физико-математических наук, профессор кафедры фотоники и линий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А.Бонч-Бруевича

Филатов Юрий Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерных измерительных и навигационных систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Ведущая организация –

Акционерное общество «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «23» декабря 2021 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета У.01.04.03 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корпус 2, аудитория 347).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Автореферат разослан «__» ноября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Кандидат физико-математических наук, доцент,
Медведев Андрей Викторович

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Волоконно-оптические интерференционные датчики на протяжении последних 30 лет являются постоянно развивающейся областью научных исследований и активно применяются для решения широкого класса научных и промышленных задач. Привлекательность таких датчиков обусловлена тем, что они обладают рядом преимуществ, таких как малые габариты и масса, электромагнитная нейтральность, способность работать в агрессивных химических средах и в условиях высоких и низких температур, большой потенциал для реализации распределенных или удаленных измерений.

Быстро развивающимся направлением волоконно-оптических интерферометрических датчиков являются датчики на основе межмодового волоконного интерферометра (МВИ). Волоконно-оптические датчики на основе МВИ обладают рядом преимуществ (относительная простота конструкции, широкие возможности для вариации чувствительности к внешнему воздействию, возможность введения в многомодовый волоконный световод (МВС) высокой оптической мощности), чем обуславливается интерес к данному классу датчиков.

Однако, существует ряд сложностей, серьезно затрудняющих использование МВИ в измерительных целях. Во-первых, принципиальная сложность возбудить в многомодовом волокне детерминированный набор мод с определенными амплитудами и фазами. Во-вторых, при изменении условий окружающей среды фазы мод могут изменяться, что будет приводить к произвольному изменению амплитуды (т.е. к федингу) сигнала МВИ. Также контраст и интенсивность принимаемого интерференционного сигнала сильно зависят от выбранной координаты в спекл-картине на выходном торце многомодового световода.

Таким образом, сигнал МВИ непредсказуемым образом зависит от условий возбуждения интерферометра и является подверженным федингу при любых изменениях внешних условий, что делает невозможным его непосредственное использование для измерений внешних воздействий.

В связи с этим для получения отклика МВИ на внешнее воздействие, величина которого будет корректно зависеть от величины внешнего воздействия и будет стабильной при различных условиях окружающей среды, необходимо проводить обработку сигнала МВИ. Следует отметить, что эта задача может быть успешно решена при условии того, что частоты «паразитного» воздействия на МВС заметно меньше частотных составляющих полезного сигнала.

Наиболее часто встречающимися способами такой обработки являются методы, связанные с многоканальным приемом изменяющейся спекл-картины и последующей демодуляцией, обеспечивающей преобразование пространственных изменений спекл-картины в детерминированный и стабильный отклик МВИ на внешнее воздействие.

Несмотря на то, что вышеприведенные методы позволяют обеспечить стабильный отклик МВИ на внешнее воздействие, они обладают рядом недостатков,

ограничивающих их использование для демодуляции сигналов МВИ. Основной их недостаток заключается в том, что зависимость получаемого отклика от внешнего воздействия является нелинейной, что не позволяет использовать данные методы в тех случаях, когда необходимо определить не только величину, но и форму внешнего воздействия.

В связи с вышеизложенным, разработка новых методов теоретического и экспериментального получения обобщенной передаточной функции МВИ и методов демодуляции сигналов МВИ для получения стабильного и линейного отклика на внешнее воздействие является актуальной.

Цель работы: разработка новых методов демодуляции сигналов межмодового волоконного интерферометра для измерения внешних воздействий на интерферометр с обеспечением стабильного и линейного отклика.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить **следующие основные задачи:**

- 1) Разработать физико-математическую модель для спектральной передаточной функции межмодового волоконного интерферометра для двух вариантов его опроса – сканированием оптической частоты и возбуждением некогерентным источником с последующей регистрацией излучения оптическим спектроанализатором.
- 2) Разработать метод расчета и экспериментального получения обобщенной передаточной функции, позволяющей производить оценку чувствительности и динамического диапазона измерительной схемы на основе межмодового волоконного интерферометра, возмущаемого внешним воздействием.
- 3) Рассмотреть применение корреляционной обработки спектральных передаточных функций межмодового волоконного интерферометра для демодуляции его сигнала с получением стабильного и линейного отклика на внешнее воздействие.
- 4) Рассмотреть возможность осуществления демодуляции сигнала с использованием корреляционной обработки спектральных передаточных функций для случая межмодового волоконного интерферометра при его возбуждении источником некогерентного излучения.
- 5) Провести экспериментальную апробацию применения разработанных методов получения обобщенных передаточных характеристик межмодового волоконного интерферометра и демодуляции его сигнала для получения стабильного и линейного отклика на внешнее возмущение интерферометра.

Научная новизна диссертации состоит в том, что в ней **впервые:**

- 1) Получены аналитические выражения для амплитудных характеристик, усредненных по ансамблю, по длинной реализации и по сканируемой частоте излучения лазера. Выполнены модельные расчеты усредненных амплитудных характеристик для разных параметров световода и разных условий возбуждения. Соответствующие амплитудные характеристики были получены экспериментально и сопоставлены с проведенными модельными расчетами.
- 2) Разработана физико-математическая модель спектральных передаточных функций для двух вариантов реализации межмодового волоконного интерферометра - со

сканируемым по оптической частоте лазером и с некогерентным возбуждением. Разработан метод корреляционной обработки спектральных передаточных функций МВИ, получены аналитические выражения, учитывающие параметры многомодового световода, параметры источника света и условия возбуждения.

- 3) Введены обобщенные критерий контраста, определяющий границы когерентного и некогерентного режима работы интерферометра, и критерий фединга, позволяющий оценить стабильность отклика интерферометра с данными параметрами. Проведены модельные расчеты, показывающие, что метод корреляционной обработки может обеспечить демодуляцию сигнала межмодового волоконного интерферометра для получения стабильного и линейного отклика на внешнее воздействие.
- 4) Экспериментально реализованы два варианта измерительной схемы на основе МВИ – со сканированием по частоте и с некогерентным возбуждением. Экспериментально была произведена демодуляция сигнала предложенных измерительных схем, произведена оценка динамического диапазона, проведено исследование стабильности отклика интерферометра в сильно изменяющихся внешних условиях. Показано, что использование предложенного метода демодуляции с использованием корреляционной обработки спектральных передаточных функций обеспечивает получение стабильного и линейного отклика на внешнее воздействие.

Научная и практическая значимость диссертации.

Теоретическая значимость результатов диссертации состоит в разработке математического аппарата, позволяющего производить расчет обобщенной передаточной функции межмодового волоконного интерферометра в зависимости от его параметров и проводить численные оценки основных параметров демодулированного отклика межмодового волоконного интерферометра – его амплитуды, формы, стабильности в зависимости от параметров интерферометра и величины внешнего воздействия.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработаны и реализованы методы получения обобщенной передаточной функции, позволяющей определить величину отклика интерферометра в зависимости от величины внешнего воздействия, оценить динамический диапазон и чувствительность измерительной схемы на базе межмодового волоконного интерферометра. Предложены и экспериментально реализованы измерительные схемы с межмодовым волоконным интерферометром со сканированием оптической частоты и с некогерентным возбуждением. Показано, что корреляционная обработка спектральных передаточных функций в таких схемах обеспечивает демодуляцию их сигналов со стабильным и линейным откликом на внешнее воздействие. Предложенные методы усреднения и демодуляции сигналов МВИ могут быть применены при разработке и создании многомодовых волоконных измерительных устройств с улучшенными характеристиками.

Научные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, позволили сформулировать следующие **научные положения, выносимые на защиту:**

- 1) Обобщенная передаточная функция может быть получена путем усреднения амплитудной характеристики межмодового волоконного интерферометра и

позволяет производить корректную оценку чувствительности и динамического диапазона интерферометра, используемого для измерения внешних воздействий.

- 2) Получены выражения, позволяющие получить обобщенную передаточную функцию на основе корреляционной характеристики спектральных передаточных функций межмодового волоконного интерферометра.
- 3) Предложенный метод корреляционной обработки спектральных передаточных функций межмодового волоконного интерферометра обеспечивает демодуляцию сигнала межмодового волоконного интерферометра с получением стабильного и линейного отклика на внешнее воздействие.
- 4) Теоретически и экспериментально показано, что корреляционная обработка спектральных передаточных функций может быть применена для демодуляции сигналов двух вариантов опроса межмодового волоконного интерферометра: со сканированием оптической частоты и с некогерентным возбуждением и спектроанализатором.

Апробация работы

Материалы, представленные в диссертации, прошли апробацию на 7 конференциях различных уровней: всероссийской конференции «Неделя Науки ИФНиТ» (2020г., Санкт-Петербург), научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (2018-2019гг., Санкт-Петербург), международной конференции «SPIE Optics + Optoelectronics» (2019г., Прага), а также международной конференции молодых учёных YETI (2019-2020гг., Санкт-Петербург).

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 11 работ, из них 4 статьи в ведущих рецензируемых журналах, входящих в базы Scopus, Web of Science и перечень ВАК РФ, 3 – в сборниках материалов международных конференций, индексируемых в Scopus и Web of Science, 4 – в сборниках материалов конференций, входящих в список РИНЦ.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка литературы, содержащего 119 наименований. Объем работы составляет 168 страниц, включая 3 таблицы и 79 рисунков.

Содержание работы

Во введении к работе дается характеристика работы с точки зрения новизны, практической и теоретической значимости, кратко описывается объект исследования, а также поставленные цели и решаемые задачи. Кроме того, приводятся защищаемые положения.

Первый раздел представляет собой обзор существующих на настоящий момент методов демодуляции сигналов МВИ. В п. 1.1-1.2 приведены основные сведения о многомодовых волоконных световодах и базовые сведения электромагнитной теории.

В п.п. 1.3-1.4 приведены основные сведения о межмодовом волоконном интерферометре, демодуляции сигналов которого посвящена настоящая работа. Структурная схема МВИ представлена на рис. 1.

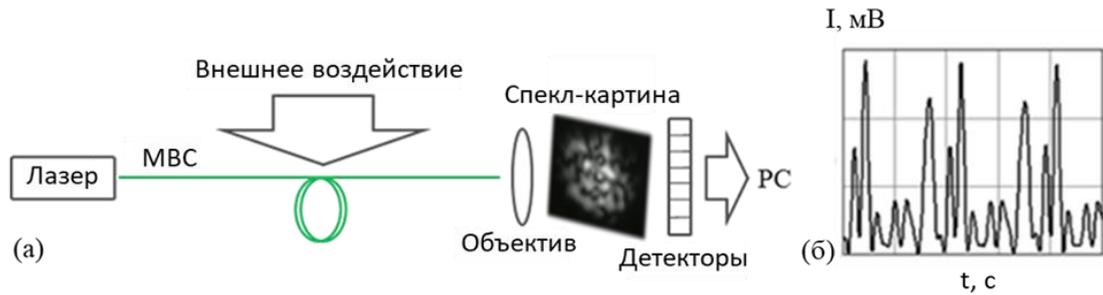


Рис. 1. Принципиальная схема МВИ (а); сигнал МВИ, вызванный внешним воздействием (б).

Принцип работы МВИ заключается в следующем. Источником когерентного оптического излучения в МВС возбуждается некоторый набор модовых групп. В результате прохождения модовых групп через МВС на его выходном торце формируется интерференционная картина (спекл-картина). Внешние воздействия на волокно, вызывающие изменения фаз возбужденных модовых групп, приводят к изменению конфигурации спекл-картины. Пространственные изменения спекл-картины могут быть преобразованы в изменения интенсивности путем регистрации оптического излучения с отдельной области спекл-картины (пространственное диафрагмирование). Получаемые таким образом изменения интенсивности оптического излучения являются сигналом МВИ. В п. 1.4 показано, что сигнал МВИ подвержен федингу – т.е. непредсказуемым изменениям его амплитуды в результате изменения условий окружающей среды, что делает невозможным использование сигнала МВИ для проведения измерений без его дополнительной обработки. В п. 1.5 рассмотрены основные существующие на настоящий момент способы демодуляции сигналов МВИ. В основном, они связаны с пространственной обработкой спекл-картин – их усреднением или их корреляционным анализом. Данные методы обеспечивают существенное подавление фединга сигнала МВИ, однако они не обеспечивают линейности получаемого отклика интерферометра на внешнее воздействие – т.е. форма получаемого отклика отличается от формы внешнего воздействия. В заключительном пункте подводятся итог приведённого обзора, и приводится обоснование цели и задач диссертации.

Во втором разделе введен подход обобщенных передаточных функций, позволяющий численно характеризовать зависимость отклика МВИ на внешнее воздействие от величины внешнего воздействия. Сигнал МВИ описывается в виде выражения для интенсивности на выходном торце МВС

$$I(M, x, \delta L) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (a_k)^2 (E_k(x))^2 + \frac{1}{M^2 - M} \sum_{i=2}^M \sum_{k=1}^{i-1} a_k a_i E_k(x) E_i(x) \cos[\Delta\beta_{ki}(L + \delta L) + \Delta\varphi_{ki}] \quad (1)$$

где $E_k(x)$ - модовая функция k -ой модовой группы, a_k , β_k , – амплитуда и постоянная распространения k -ой модовой группы, x – обобщенная пространственная

координата, M – число распространяющихся модовых групп, L – длина световода, $\Delta\varphi_{ki}$ – разность случайных фазовых сдвигов между k -ой и i -ой модовой группой, вызванный стационарными продольными неоднородностями световода и взаимодействием мод на них, а δL – приращение длины волокна (детерминированное значение) в результате внешнего воздействия.

В п. 2.3 показано, что обобщенная передаточная функция МВИ может быть получена путем усреднения **амплитудной характеристики (АХ)**, представляющей собой зависимость величины среднеквадратичного изменения сигнала МВИ от величины внешнего воздействия.

$$AX(\delta L) = \frac{\sigma(\delta L)}{\sigma(\delta L_{\max})} \quad (2)$$

где δL_{\max} – величина удлинения, превышающая максимальную длину биений соседних модовых групп.

Предложены и теоретически рассмотрены три способа усреднения амплитудных характеристик – по ансамблю, по длинной реализации и по сканируемой оптической частоте лазера. В п.п. 2.3.1 – 2.3.4 получены аналитические выражения, позволяющие проводить расчет усредненных амплитудных характеристик и учитывающие важнейшие параметры МВИ – параметры МВС и условия его возбуждения (рис. 2).

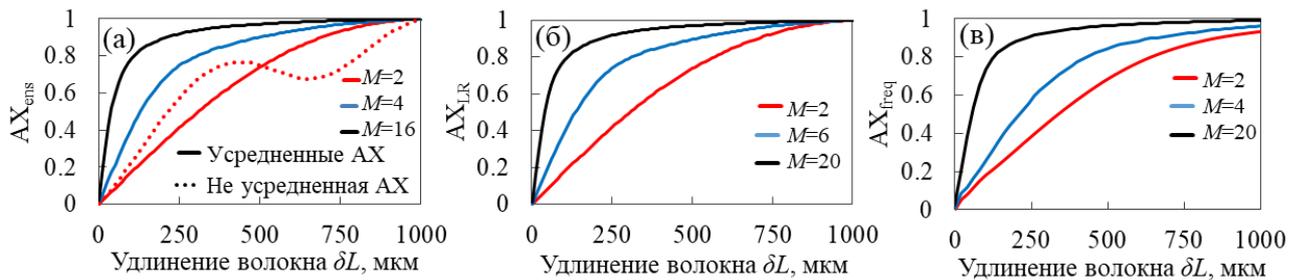


Рис. 2. Обобщенные передаточные функции МВИ, полученные путем усреднения АХ по ансамблю (а), по длинной реализации (б) и по сканируемой частоте лазера (в).

Для каждого из методов усреднения АХ получены аналитические выражения, зависящие от параметров МВС и от условий его возбуждения источником излучения. Показано, что выражения для АХ, усредненных всеми тремя способами, сводятся к одному виду (выражение 3) при условии достаточной величины характеризующего усреднение параметра (количество членов ансамбля, длина реализации и диапазон сканирования частоты лазера соответственно).

$$AX(\delta L) = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=2}^M \sum_{k=1}^{i-2} \frac{a_i^2 a_k^2 E_i^2(x) E_k^2(x)}{M^2 - M} \left[1 - \frac{\sin^2(0.5\Delta\beta_{ik}\delta L)}{(0.5\Delta\beta_{ik}\delta L)^2} \right]} \quad (3)$$

Предложенные в диссертации аналитические выражения, описывающие усредненные АХ, представляют собой удобный инструмент для численного анализа МВИ как измерительной схемы и позволяют путем простого расчета осуществить подбор параметров МВИ, обеспечивающих требуемые его характеристики как измерительной схемы – чувствительность и динамический диапазон измеряемых внешних воздействий.

В третьем разделе представлен и теоретически рассмотрен метод корреляционного анализа спектральных передаточных функций для демодуляции сигналов МВИ.

Спектральная передаточная функция (СПФ) – это зависимость интенсивности сигнала МВИ от оптической частоты вводимого в МВС излучения. Получить СПФ интерферометра можно путем осуществления его спектрального опроса. В диссертации рассмотрены два способа опроса интерферометра – сканированием оптической частоты лазера (СМВИ – сканируемый межмодовый волоконный интерферометр) и возбуждением МВС источником некогерентного излучения с последующей его регистрацией оптическим спектроанализатором (БСМВИ – белосветный межмодовый волоконный интерферометр).

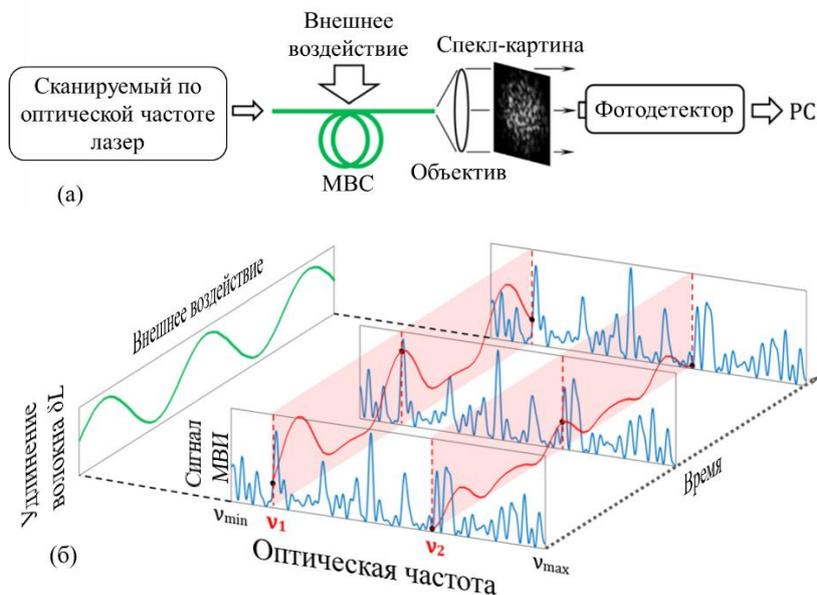


Рис. 3. Схема СМВИ (а); Иллюстрация принципа работы СМВИ (б).

В п. 3.2 теоретически рассмотрен метод корреляционного анализа СПФ для демодуляции сигналов СМВИ (рис. 3). Получено аналитическое выражение, описывающее зависимость интенсивности сигнала МВИ от оптической частоты (т.е. выражение для СПФ). Показано, что в отсутствие каких-либо внешних воздействий СПФ остаются неизменными, в то время как при внешнем воздействии на МВС они видоизменяются.

Видоизменение СПФ в результате внешнего воздействия наглядно проиллюстрировано на рис. 4.

Данное явление открывает возможность получения стабильного отклика МВИ на внешнее воздействие путем расчета коэффициента корреляции между СПФ, снятой в отсутствие внешнего воздействия и СПФ, полученной под внешним воздействием.

Получено аналитическое выражение, определяющее зависимость коэффициента корреляции от величины внешнего воздействия.

$$K(\delta L) = \sum_{i=2}^M \sum_{k=1}^{i-1} \frac{(a_i a_k)^2}{2M^2} \left[\cos(\Delta\beta_{ik} \delta L) + \frac{\sin(\Delta t_{ik} \Delta \nu)}{\Delta t_{ik} \Delta \nu} \cos(\Delta\beta_{ik} (2L_0 + \delta L) + \Delta t_{ik} \Delta \nu + 2\Delta\phi_{ik}) \right] \quad (4)$$

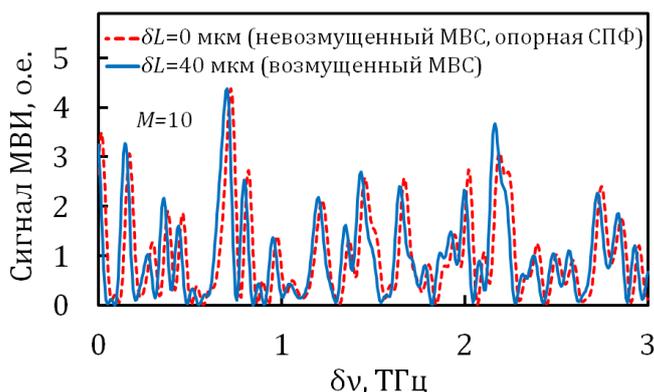


Рис. 4. Спектральная передаточная функция СМВИ при сканировании частоты лазера в диапазоне $\Delta\nu_{span} = 3$ ТГц. Длина МВС 50 метров, количество модовых групп $M=10$, профиль показателя преломления МВС $\alpha=2$.

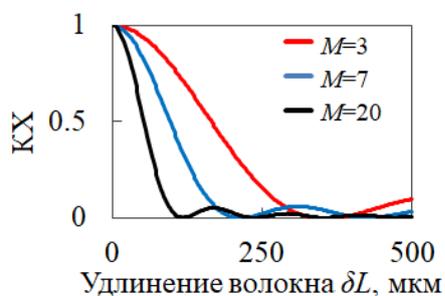


Рис. 5. Корреляционные характеристики СМВИ для трех значений числа возбужденных модовых групп

Оно зависит от параметров МВС и от условий его возбуждения источником излучения, что делает его удобным инструментом для анализа СМВИ. Для дальнейшего анализа СМВИ введена корреляционная характеристика (КХ) – зависимость коэффициента корреляции, нормированного на свое максимальное значение, от величины внешнего воздействия (рис. 5). Видно, что ширина КХ зависит от числа возбужденных модовых групп.

В п. 3.2.3 показано, что амплитудная характеристика СМВИ связана с корреляционной характеристикой СМВИ через структурную функцию. Таким образом, амплитудная характеристика СМВИ может быть выражена из корреляционной характеристики в соответствии с выражением (5).

$$AX_{СПФ}(\delta L, \Delta\nu_{span}) = \sqrt{1 - \frac{K(\delta L, \Delta\nu_{span})}{K(\delta L=0, \Delta\nu_{span})}} \quad (5)$$

Выражение (5) представляет собой обобщенную передаточную функцию СМВИ. Из этого следует, демодуляция сигнала СМВИ может быть проведена путем расчета коэффициентов корреляции между опорной СПФ, полученной в отсутствии внешнего воздействия, и СПФ, полученной под воздействием, с последующим их преобразованием в отклик интерферометра в соответствии с выражением (5).

На рис. 6(а) представлена рассчитанная в соответствии с выражением (5) $AX_{СПФ}$. На рис. 7(а) представлен отклик МВИ на гармоническое внешнее воздействие, полученный путем расчета из выражения (5). Видно, что амплитуда полученного отклика прямо пропорциональна амплитуде внешнего воздействия, однако форма полученного отклика представляет собой модуль внешнего воздействия.

В п. 3.2.5 предложен метод линеаризации полученного отклика путем введения частотного смещения диапазона сканирования оптической частоты при получении опорной СПФ. Показано, что амплитудная характеристика, полученная с использованием частотного смещения, сдвигается на пропорциональную ему величину, из чего следует, что можно подобрать величину частотного смещения таким образом, чтобы преобразование внешнего воздействия в отклик СМВИ происходило на линейном участке передаточной функции (рис. 7(б)).

Получено выражение для расчета коэффициента корреляции с учетом смещения диапазона сканирования оптической частоты при получении опорной СПФ.

$$K_{\zeta}(\delta L, \Delta v_{span}, \zeta) = \sum_{i=2}^M \sum_{k=1}^{i-1} \frac{(a_i a_k)^2}{M^2} \left[\cos(\Delta \beta_{ik} \delta L - \Delta t_{ik} \zeta) + \frac{\sin(\Delta t_{ik} \Delta v_{span})}{\Delta t_{ik} \Delta v_{span}} \cos(\Delta \beta_{ik} (2L + \delta L) + \Delta t_{ik} (\Delta v_{span} + \zeta) + 2\Delta \varphi_{ik}) \right] \quad (6)$$

где ζ – величина смещения диапазона сканирования оптической частоты при получении опорной СПФ.

Таким образом, с учетом (6) получено выражение для смещенной амплитудной характеристики.

$$CA_{X_{СПФ}}(\delta L, \Delta v_{span}, \zeta) = \sqrt{1 - \frac{K_{\zeta}(\delta L, \Delta v_{span}, \zeta)}{K(0, \Delta v_{span})}} \quad (7)$$

На рис. 6(б) представлена рассчитанная в соответствии с выражением (7) $CA_{X_{СПФ}}$. На рис. 7(б) представлен отклик МВИ на гармоническое внешнее воздействие, полученный путем расчета из выражения (7). Видно, что амплитуда полученного отклика прямо пропорциональна амплитуде внешнего воздействия и форма полученного отклика полностью соответствует форме внешнего воздействия. Таким образом показано, что предложенный метод корреляционного анализа спектральных передаточных функций обеспечивает демодуляцию сигнала МВИ с получением стабильного и линейного отклика на внешнее воздействие.

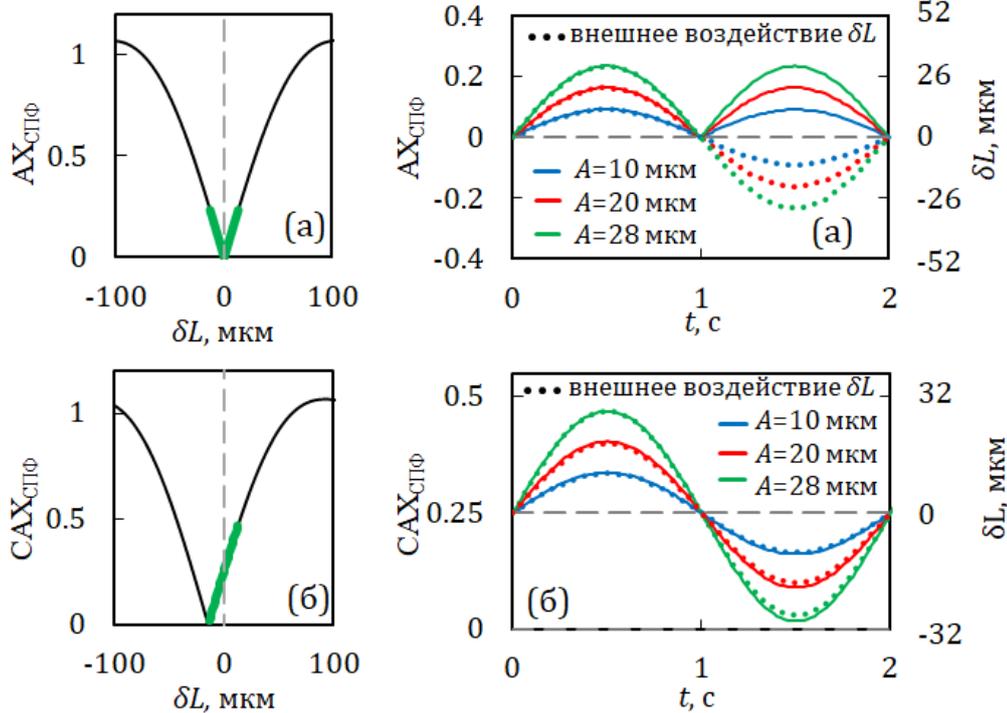


Рис. 6. AX (а) и CA_{X} (б).

Серой пунктирной линией обозначено значение δL , при котором проводился расчет опорной СПФ. Зеленой линией обозначена траектория движения рабочей точки при амплитуде модуляции длины волокна $A = 28$ мкм.

Рис. 7. Зависимость величины отклика МВИ от времени при модуляции длины волокна по синусоидальному закону с частотой $\Omega = 0.5$ Гц, полученная для трех амплитуд воздействия (сплошные линии, ось Y слева) и зависимость величины удлинения волокна δL от времени (пунктирные линии, ось Y справа).

В п. 3.3 теоретически рассмотрен метод корреляционного анализа спектральных передаточных функций для демодуляции сигналов МВИ с источником некогерентного излучения и спектроанализатором (БСМВИ).

Показано, что СПФ такой схемы также видоизменяются при оказании на МВИ внешнего воздействия, что дает возможность применять представленный в п. 3.2 метод демодуляции для получения стабильного и линейного отклика на внешнее воздействие.

В п. 3.3.3 показано, что контраст СПФ определяется параметрами БСМВИ, в том числе длиной МВС и шириной аппаратной функции спектроанализатора Δv_a (рис. 8). На рис. 8 представлены СПФ, полученные расчетом для двух различных длин МВС L . Видно, что при $L=10$ км контраст и амплитуда СПФ заметно меньше, чем при $L=0.5$ км. Кроме того, форма СПФ при $L=10$ км ближе к синусоидальной, чем в случае $L=0.5$ км. Это говорит о том, что при длине МВС $L=10$ км нарушаются условия интерференции модовых групп высших типов с низшими вследствие того, что длина когерентности становится меньше разности прихода между модами на конце волокна. Поэтому в интерференцию вносят вклад в основном моды с близкими постоянными распространения (соседние моды), чем объясняется низкий контраст и «синусоидальная» форма соответствующей СПФ. Из этого следует вывод о необходимости выбора параметров БСМВИ таким образом, чтобы обеспечивался когерентный режим его работы. Для численной оценки границы когерентного и некогерентного режимов работы МВИ аналитически получен обобщенный коэффициент контраста.

$$C_r(L, \Delta v_a) = \frac{1}{I_0 M} \cdot \sum_{i=2}^M \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\sin\left(\frac{\Delta t_{ik} \Delta v_a}{2}\right)}{\frac{\Delta t_{ik} \Delta v_a}{2}} \quad (8)$$

Будем считать, что значения контраста $C_r \geq 0.5$ соответствуют когерентному режиму работы интерферометра, а значения контраста $C_r < 0.5$ соответствуют некогерентному режиму. Значение контраста $C_r = 0.5$ является граничным между когерентным и некогерентным режимом работы интерферометра (рис.9)).

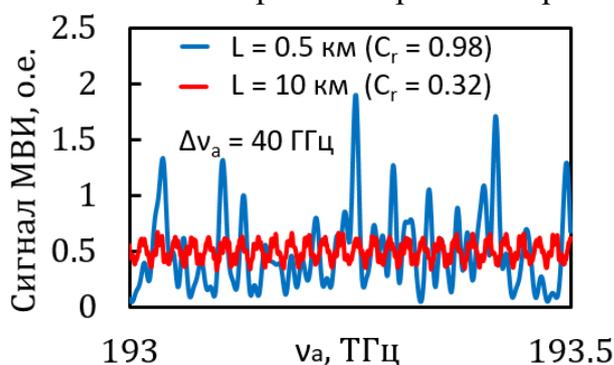


Рис. 8. СПФ, полученные при двух различных длинах волокна, соответствующим значениям величины контраста больше граничного (синяя линия) и меньше граничного (красная линия).

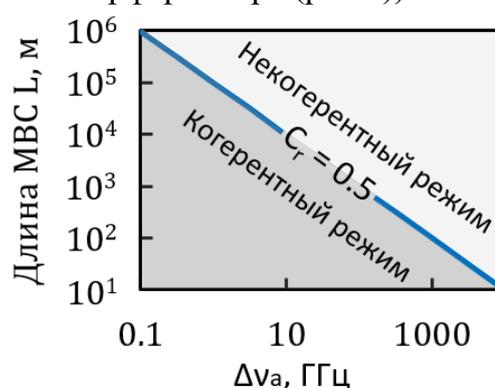


Рис. 9. Зависимость длины МВС L от ширины аппаратной функции Δv_a , при которых коэффициент контраста $C_r = 0.5$.

Выражение (8) зависит от параметров МВС, от числа возбужденных модовых групп и от ширины аппаратной функции спектроанализатора Δv_a , что позволяет использовать его для оценки условий когерентного режима работы БСМВИ в зависимости от его параметров. Для примера, на рис. 9 представлена диаграмма, определяющая зависимость длины БСМВИ от ширины аппаратной функции Δv_a , при которых будет выполняться условие когерентной работы МВИ.

В п. 3.3.4 показано, что условием для существенного подавления фединга сигнала МВИ при его демодуляции предложенным в настоящей работе методом является достаточно большой диапазон оптической частоты Δv_{span} , в котором происходит спектральный опрос БСМВИ. На рис. 10 представлены корреляционные характеристики, рассчитанные при недостаточном и при достаточном для подавления фединга значении величины Δv_{span} . Для численной оценки требуемой величины Δv_{span} , обеспечивающей подавление фединга сигнала БСМВИ с данными параметрами введен обобщенный коэффициент фединга.

$$C_F(L, \Delta v_{span}) = \sum_{i=2}^M \sum_{k=1}^{i-1} \frac{(a_i a_k)^2}{2M^2} \cdot \frac{\sin(\Delta t_{ik} \cdot \Delta v_{span})}{\Delta t_{ik} \cdot \Delta v_{span}} \quad (9)$$

Для определенности выберем в качестве граничного значения $C_F = 10^{-2}$ и будем считать, что большие значения C_F соответствуют случаю наличия фединга выходного сигнала, а меньшие значения – случаю подавленного фединга выходного сигнала. На рис. 11 приведены диаграммы, отражающие зависимость длины МВС от Δv_{span} , при которых коэффициент контраста $C_F = 0.01$. По аналогии с рис. 9, область выше прямой соответствует стабильному режиму работы БСМВИ (с существенным подавлением фединга), область ниже прямой – нестабильному режиму работы (с недостаточным подавлением фединга).

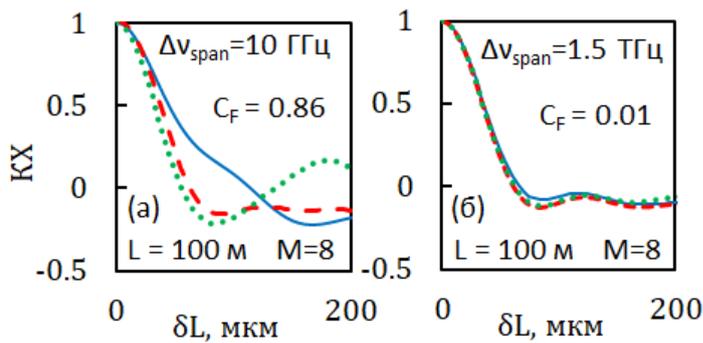


Рис. 10. Корреляционная характеристика БСМВИ при удлинении волокна, рассчитанная для трех наборов случайных фаз модовых групп (синяя, красная и зеленая линии) при величине ширины полосы спектроанализатора Δv_{span} , соответствующей большому (а) и граничному (б) значению величины C_F .

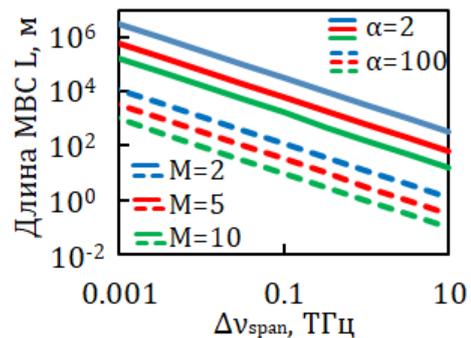


Рис. 11. Зависимости длины МВС L от ширины полосы спектроанализатора Δv_{span} , при которых $C_F = 0.01$, построенные для разного числа модовых групп и разного параметра профиля показателя преломления.

Таким образом, предложенное выражение для коэффициента фединга позволяет путем численного расчета определить параметры МВС, условия его возбуждения и

ширину аппаратной функции спектроанализатора, при которых обеспечивается существенное подавление фединга сигнала БСМВИ.

В четвертом разделе представлена экспериментальная апробация представленных в работе методов демодуляции сигналов МВИ. В параграфе 4.1 проведено экспериментальное исследование метода получения обобщенной передаточной функции МВИ путем усреднения амплитудных характеристик. В п. 4.1.1 приведена схема экспериментальной установки и описание методов экспериментального исследования. В п.п. 4.1.2-4.1.4 приведены экспериментально полученные амплитудные характеристики, усредненные по ансамблю, по длинной реализации и по сканируемой частоте излучения лазера. Показано, что крутизна АХ увеличивается с ростом числа мод, что соответствует полученным в результате моделирования результатам. Также проведено исследование зависимости эффективности усреднения АХ от числа членов ансамбля, от длины реализации и от диапазона сканирования оптической частоты. Приведены численные оценки данных величин, при которых обеспечивается получение стабильных АХ.

В параграфе 4.2 проведено экспериментальное исследование демодуляции сигнала СМВИ и БСМВИ. На рис. 12 и рис. 13 приведены схемы экспериментальных установок.

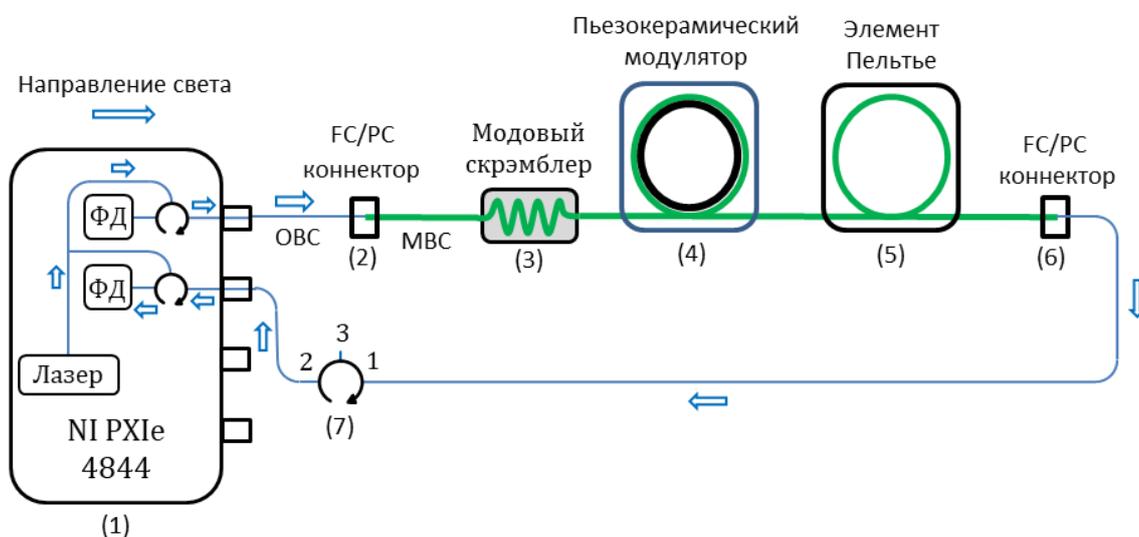


Рис. 12. Экспериментальная схема МВИ со сканированием частоты лазера (СМВИ).

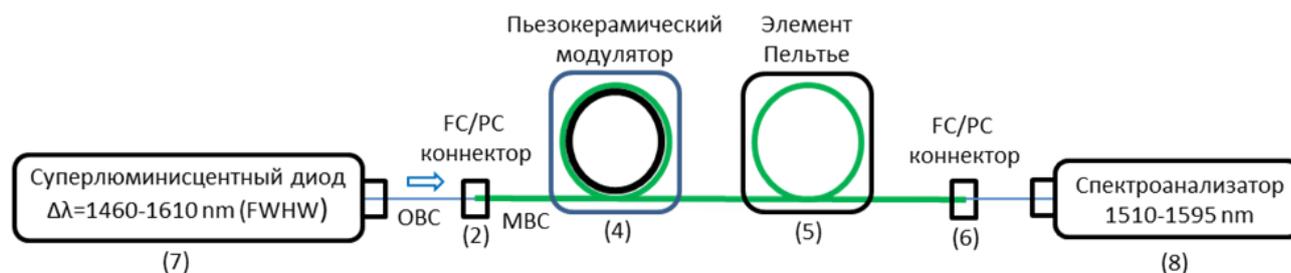


Рис. 13. Экспериментальная схема МВИ с некогерентным возбуждением (БСМВИ).

В схеме МВИ со сканированием частоты (СМВИ, рис. 12) в качестве сканирующего источника света использовался первый канал четырехканального интеррогатора NI PXIe 4844 (1). Параметры сканирования оптической частоты следующие: диапазон сканирования по длине волны 1510–1590 нм, частота сканирования 10 циклов в секунду. Между одномодовым волоконным световодом (ОВС) на выходе интеррогатора и МВС устанавливался модовый скрэмблер Arden Photonics ModCon (3), обеспечивающий возбуждение максимально возможного количества модовых групп в СМВИ. В качестве фотоприемника использовался второй канал интеррогатора NI PXIe 4844. В схеме МВИ с некогерентным возбуждением (БСМВИ, рис. 13) в качестве источника излучения использовался суперлюминисцентный светодиод Exalos EXS210066-01 (7). Для реализации многомодового режима возбуждения использовалось продольное рассогласование торцов волокна в FC/PC коннекторе (2) – стыки соединяемых ОВС и МВС располагались не вплотную друг к другу, а на некотором расстоянии друг от друга. Для реализации спектрального опроса БСМВИ и формирования временной последовательности СПФ использовался оптический спектроанализатор I-MON 512 USB (8) (диапазон сканирования 1510-1595 нм, спектральное разрешение 160 пм, скорость сканирования 1000 спектров/с).

Остальные элементы экспериментальной установки являются идентичными для обоих вариантов МВИ. Свет вводился в МВС через FC/PC коннектор (2). Основная часть МВС (50 метров) была намотана на пьезокерамический модулятор (4), использующийся для реализации внешнего воздействия - модуляции длины МВС по определенному закону. Для получения линейного удлинения МВС в большом диапазоне использовался элемент Пельтье (5), на котором размещена часть МВС длиной 3 метра. После прохождения МВС свет пространственно фильтровался соединением выходного торца МВС и ОВС при помощи FC/PC коннектора (6).

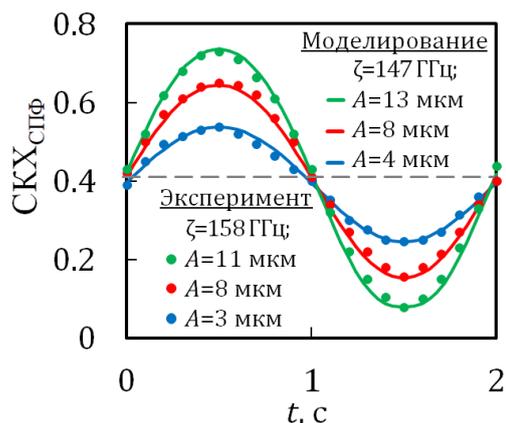


Рис. 14. Отклик СМВИ на внешнее воздействие (изменение длины МВС по гармоническому закону с частотой $\Omega=0.5$ Гц) для трех разных амплитуд воздействия, полученный путем демодуляции сигнала МВИ с использованием смещенной корреляционной характеристики.

В п. 4.2.2 представлены экспериментально полученные отклики СМВИ на внешнее воздействие (изменение длины МВС по гармоническому закону) и проведено сравнение с результатами моделирования на основании представленных в разделе 3 выражений (рис. 14). Показано, что предложенный метод корреляционной обработки спектральных передаточных функций обеспечивает демодуляцию сигнала СМВИ с получением стабильного отклика на внешнее воздействие. Также показано, что рассмотренный в п. 3.2.5 метод частотного смещения диапазона сканирования

оптической частоты при получении опорной СПФ обеспечивает линейризацию полученного отклика.

В п. 4.2.3 экспериментально получены корреляционные характеристики БСМВИ для разного числа мод и проведено их сопоставление с рассчитанными по представленной в разделе 3 математической модели. Экспериментально показано, что стабильная корреляционная характеристика может быть получена при условии достаточно большого диапазона оптических частот $\Delta\nu_{\text{span}}$. В п. 4.2.4 проведено исследование динамического диапазона измерительной схемы на основе БСМВИ. Показано, что в области слабых внешних воздействий динамический диапазон ограничивается преимущественно шумами, в частности, собственными шумами спектроанализатора, шумами, связанными с возникновением паразитного интерферометра Фабри-Перо между стыками оптических волокон и т.д. Верхняя граница динамического диапазона определяется нелинейными искажениями, связанными с нелинейностью передаточной функции при достаточно больших значениях амплитуды внешнего воздействия. В результате проведенного экспериментального исследования показано, что БСМВИ, сигналы которого демодулируются предложенным в работе методом, обеспечивает линейный отклик на внешнее воздействие с амплитудой от 1 мкм до 260 мкм с отношением сигнал/шум SNR не менее 10 дБ и коэффициентом гармоник THD не более 3%.

В п. 4.2.5 проведено исследование стабильности получаемого отклика БСМВИ при сильно изменяющихся условиях окружающей среды. Для этого в схему экспериментальной установки был включен участок МВС длиной 3 м, который линейно нагревался за 200 с от 40 до 80 °С – таким образом имитировались изменения условий окружающей среды. Одновременно с этим на БСМВИ подавалось высокочастотное сигнальное воздействие - модуляция длины волокна по гармоническому закону с амплитудой $\delta L=70$ мкм и частотой $\Omega=10$ Гц.

На рис. 15 представлены необработанный сигнал БСМВИ и демодулированный отклик БСМВИ на промежутке времени 5 с, что соответствует изменению температуры волокна на 1 °С. Видно, что амплитуда необработанного сигнала меняется в 100 раз. В то время амплитуда демодулированного отклика остается неизменной.

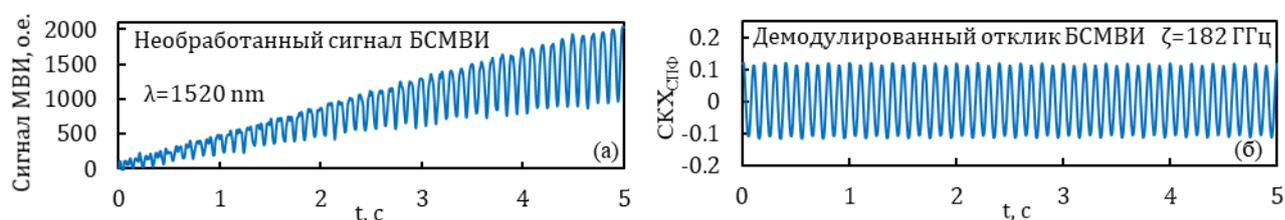


Рис. 15. Необработанный сигнал БСМВИ, полученный регистрацией интенсивности сигнала интерференции на длине волны $\lambda=1520$ нм (а) и отклик БСМВИ, полученный путем демодуляции сигнала интерферометра через смещенную корреляционную характеристику (б). Амплитуда внешнего воздействия $\delta L=70$ мкм, частота внешнего воздействия 10 Гц, диапазон изменения температуры 1 °С.

На рис. 16 продемонстрировано, как изменяются амплитуды необработанного сигнала БСМВИ и демодулированного отклика БСМВИ для диапазона изменения температуры от 40 до 80 °С.

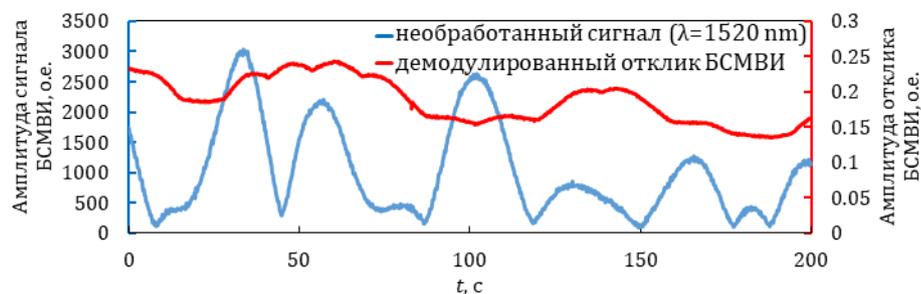


Рис. 16. Сравнение амплитуды необработанного сигнала БСМВИ и амплитуды отклика, полученного путем демодуляции сигнала БСМВИ. Амплитуда внешнего воздействия $\delta L = 70$ мкм, частота внешнего воздействия 10 Гц, диапазон изменения температуры 40 °С.

На рис. 16 видно, что амплитуда необработанного сигнала БСМВИ изменяется в 200 раз во всем диапазоне изменения температуры, в то время как амплитуда демодулированного отклика изменяется не более чем в 1.6 раза. Кроме того, на рис. 15 видно, что форма необработанного сигнала может значительно изменяться в результате сильных изменений условий окружающей среды, в то время как форма демодулированного сигнала остается неизменной и соответствует форме внешнего воздействия.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

- 1) Предложены три метода усреднения амплитудных характеристик – по ансамблю, по длинной реализации и по сканируемой частоте лазера. Получены аналитические выражения, позволяющие производить расчет усредненных амплитудных характеристик для разных параметров МВС и разных условий его возбуждения. Амплитудные характеристики, усредненные тремя предложенными способами, получены экспериментально. Экспериментально продемонстрирована зависимость эффективности усреднения от числа членов ансамбля, от длины длинной реализации и от диапазона сканирования оптической частоты лазера. Показано, что предложенные усредненные АХ можно рассматривать как обобщенные передаточные функции МВИ, так как они позволяют корректно характеризовать величину отклика МВИ на внешнее воздействие в зависимости от величины внешнего воздействия. Данные характеристики представляются полезными и могут использоваться для оценки и настройки основных параметров МВИ в измерительном режиме (чувствительность и динамический диапазон).
- 2) Представлена математическая модель, описывающая спектральные передаточные функции МВИ при его возбуждении сканируемым по частоте лазером и при его возбуждении источником некогерентного излучения с последующей регистрацией излучения оптическим спектроанализатором. Получены аналитические выражения, описывающие СПФ МВИ в зависимости от параметров МВС, от условий его возбуждения, от ширины диапазона частотного сканирования и от величины

ширины аппаратной функции. Представлен обобщенный коэффициент контраста, позволяющий производить оценку границ когерентного и некогерентного режимов работы МВИ в зависимости от его параметров. Представлен обобщенный коэффициент фединга, позволяющий производить оценку стабильности получаемого отклика на внешнее воздействие в зависимости от параметров МВИ.

- 3) Представлен метод демодуляции сигнала МВИ путем корреляционной обработки спектральных передаточных функций. Показано и теоретически обосновано, что обобщенная передаточная функция МВИ может быть получена из корреляционной характеристики спектральных передаточных функций.
- 4) Показано, что предложенный метод демодуляции сигналов МВИ, основанный на корреляционной обработке СПФ, обеспечивает получение стабильного отклика на внешнее воздействие. Линеаризации получаемого отклика можно добиться путем введения смещения диапазона сканирования оптической частоты при получении опорной СПФ относительно СПФ, снятых под внешним воздействием.
- 5) Предложенный корреляционный подход к демодуляции сигналов МВИ был экспериментально исследован для двух вариантов спектрального опроса МВИ – при сканировании оптической частоты (СМВИ) и при некогерентном возбуждении с последующим приемом излучения спектроанализатором (БСМВИ). Произведена демодуляция сигнала данных схем и получен стабильный и линейный отклик на внешнее воздействие (периодическое изменение длины оптического волокна). Экспериментально подтверждена возможность линеаризации получаемого отклика путем введения смещения диапазона сканирования оптической частоты при получении опорной СПФ. Проведена оценка динамического диапазона измерительной схемы на основе БСМВИ. Проведена экспериментальная оценка стабильности получаемого отклика, показано, что предложенный метод демодуляции сигнала обеспечивает существенное подавление фединга.

Основное содержание диссертационного исследования опубликовано в следующих работах:

Статьи в журналах из Перечня изданий, рецензируемых ВАК и включенных в международные базы данных (Scopus, Web of Science):

1. Петров А.В., Чапало И.Е., Бисярин М.А., Котов О.И. Межмодовый волоконный интерферометр на основе широкополосного источника света и анализатора оптического спектра для измерения внешних воздействий // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – №.23. – С. 8-11.
2. Petrov A.V., Chapalo I.E., Bisyarin M.A., Kotov O.I. Intermodal fiber interferometer with frequency scanning laser for sensor application // Applied Optics. – 2020. – Т. 59. – №. 33. – С. 10422-10431.
3. Chapalo I., Petrov A., Bozhko D., Bisyarin M., Kotov O. Averaging methods for a multimode fiber interferometer: experimental and interpretation // Journal of Lightwave Technology. – 2020. – Т. 38. – №. 20. – С. 5809-5816.

4. Kotov O.I., Bisyarin M.A., Chapalo I.E., Petrov A.V. Simulation of a multimode fiber interferometer using averaged characteristics approach //JOSA B. – 2018. – Т. 35. – №. 8. – С. 1990-1999.

Материалы международных конференций, индексируемые в Scopus и Web of Science

1. Petrov A., Chapalo I., Kotov O. Intermodal Fiber Interferometer with Scanning Laser and Correlation Signal Processing: An Experimental Study //International Youth Conference on Electronics, Telecommunications and Information Technologies. – Springer, Cham, 2021. – С. 307-316.
2. Petrov A.V., Chapalo I.E., Kotov O.I. Theoretical analysis of averaging methods for intermodal fiber interferometer //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1326. – №. 1. – С. 012023.
3. Chapalo I., Petrov A., Kotov O., Bisyarin M., Bozhko D. Methods of signal averaging for a multimode fiber interferometer: an experimental study //Optical Sensors 2019. – International Society for Optics and Photonics, 2019. – Т. 11028. – С. 110282Q.

Материалы конференций, входящие в список РИНЦ

1. Пелевин И.Д., Котов О.И., Петров А.В. Сигналы многомодового волоконного интерферометра при модуляции частоты излучения лазера //Неделя науки ИФНиТ. – 2020. – С. 184-187.
2. Карамышева А.Р., Петров А.В., Чапало И.Е., Котов О.И. Оценка качества усреднения сигналов МВИ //Неделя науки СПбПУ. – 2019.
3. Карамышева А.Р., Петров А.В., Чапало И.Е., Котов О.И. Статистические характеристики многомодовых интерферометров: эргодические свойства сигналов //Неделя науки СПбПУ. – 2018. – С. 88-91.
4. Карамышева А.Р., Петров А.В., Чапало И.Е., Котов О.И. Корреляционные характеристики сигналов межмодового волоконного интерферометра в случае изменения длины световода и частоты излучения лазера //Неделя науки СПбПУ. – 2018. – С. 128-132.