

На правах рукописи
УДК 681.78



Жирнов Андрей Андреевич

**ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР НА ОСНОВЕ
ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ПО ЧАСТОТЕ ИЗЛУЧЕНИЯ
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ИТТЕРБИЙ-ЭРБИЕВОГО ЛАЗЕРА**

Специальность 05.11.07
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019

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, доцент

Официальные оппоненты: **Тихомиров Сергей Владимирович**,
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории метрологии малоинтенсивного лазерного излучения и волоконно-оптических систем Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений

Куликов Андрей Владимирович
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией научно-исследовательского центра световодной фотоники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное объединение Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»

Защита состоится «29» мая 2019 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при МГТУ им. Н.Э. Баумана 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>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «___» _____ 201_ г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук


Д.А. Семеренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Волоконная оптика за последние 30 лет совершила огромный шаг в своём развитии. За счёт совершенствования компонентной базы передача данных по волоконным линиям связи на данный момент имеет наибольшую скорость и пропускную способность. Благодаря совершенствованию технологий изготовления элементов волоконная оптика находит применение и в других областях, в частности активно развиваются волоконно-оптические датчики. Одно из их направлений: рефлектометры, работа которых основана на анализе определённой составляющей обратнорассеянного волоконным сенсором излучения – всё чаще применяются для контроля за состоянием протяжённых объектов и регистрации событий в их окрестности. Например, они позволяют наблюдать за температурой или регистрировать вибрационные сигналы от несанкционированных работ и перемещающихся рядом людей. На данный момент существует четыре основных типа волоконно-оптических рефлектометров: основанные на эффекте рассеяния Рэлея (обычного и высококогерентного излучения), на эффекте рассеяния Мандельштама-Бриллюэна, а также на эффекте комбинационного рассеяния света. Рефлектометр, анализирующий обратное рэлеевское рассеяние высококогерентного излучения, который также называют фазочувствительным, позволяет регистрировать сигналы акустический воздействий вдоль волоконного сенсора. Характерные расстояния до сенсора, на которых события могут быть зарегистрированы, составляют единицы метров для действий человека (шаги, раскопки) и десятки метров для работы или движения техники и автомобилей.

Исследования фазочувствительных рефлектометров были начаты в Техасском университете A&M под руководством Г.Ф. Тейлора. В России первые работы связаны с именами С.В. Шаталина и В.Н. Трещикова, являвшимися на тот момент сотрудниками ИРЭ РАН, а в дальнейшем ставшие лидерами разработки фазочувствительных рефлектометров в коммерческих фирмах Silixa и ООО «Т8», соответственно. Последние 10 лет системы на основе фазочувствительной рефлектометрии становятся всё более востребованными. Их начинают использовать для мониторинга трубопроводов крупные нефтегазовые компании, в том числе «Schlumberger» (группа учёных под руководством А. Хартога в сотрудничестве с группой Л.Б. Лиокумовича) и «Транснефть» (АО «Омега») создают свои собственные устройства. До настоящего времени сформированы постоянно занимающие данной тематикой научные группы в Китае (X. Zhang, Nanjing University), Японии (X. Изумита, Я. Коямада), Канаде (X. Bao, University of Ottawa), Испании (H.F. Martins, Universidad de Alcalá). Большое распространение данная технология получила в России. Наиболее известными группами являются: ИРЭ РАН (В.Т. Потапов, А.Э. Алексеев и другие), ООО «Т8» (В.Н. Трещиков, О.Е. Наний и другие), ИОФ РАН (Б.Г. Горшков).

Существует большое количество коммерческих фирм, предлагающих приборы данного типа.

Однако несмотря на большой объём проведённых исследований в данной области, фазочувствительный рефлектометр имеет особенности, которые затрудняют, а порой и просто делают невозможным корректное выполнение его функций. Например, одной из наиболее значительных проблем является то, что в процессе эксплуатации из-за старения фиксирующей конструкции может происходить случайное смещение полосы пропускания оптических фильтров от рабочей длины волны лазера. Величина смещения может составлять единицы нанометров, что приводит к падению уровня сигнала вплоть до нуля. Из-за этого уменьшается длина чувствительного участка сенсора и падает качество распознавания сигналов. Для решения данной проблемы в работе предлагается использовать контролируемую перестройку частоты лазерного источника в широком диапазоне, которая позволит подстраиваться под текущую рабочую длину волны фильтра.

Целью работы является разработка фазочувствительного рефлектометра на основе перестраиваемого по частоте излучения твердотельного иттербий-эрбиевого лазера, обеспечивающего согласование спектра излучения источника с полосой пропускания оптического фильтра при её отстройке, вызванной деградацией (старением) компонентов. Для этого были решены следующие **научно-технические задачи**:

1. Создана математическая модель формирования сигнала фазочувствительного рефлектометра, учитывающая влияние как перестройки, так и флуктуаций длины волны излучения лазерного источника на сигнал рефлектометра,

2. Обоснованы требования к флуктуациям длины волны излучения лазерного источника для получения сигнала с отношением сигнал/шум более 10 дБ,

3. Созданы и экспериментально исследованы макетные установки твердотельных лазерных источников на основе микрочипа и дискретной кюветы,

4. Создан и экспериментально исследован макет фазочувствительного рефлектометра на основе перестраиваемого по частоте излучения твердотельного иттербий-эрбиевого лазера,

5. Исследована вероятность правильного обнаружения событий в сигнале фазочувствительного рефлектометра с помощью различных алгоритмов обработки, учитывающих его нестационарность.

Объект исследования – фазочувствительный рефлектометр.

Предметом исследования является обоснование возможности повышения отношения сигнал/шум фазочувствительного рефлектометра путём подстройки длины волны источника излучения к полосе пропускания оптического фильтра.

Методы исследования. При решении прикладных и теоретических задач были использованы экспериментальные методы исследований: метод двух сечений, метод дифракционной спектрометрии, гомодинный метод анализа спектра, а также методы обработки сигналов, методы теории вероятностей, теории дифракции, теории управления, теория САПР, системный подход.

Научная новизна результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, состоит в следующем:

– Разработана методика расчёта отношения сигнал/шум фазочувствительного рефлектометра на основе лазера с заданной спектральной плотностью флуктуаций частоты при помощи математического моделирования процесса формирования сигнала, учитывающего нестабильность длины волны лазерного источника.

– Показано, что наименьший уровень случайных флуктуаций длины волны твердотельного лазерного источника на основе иттербий-эрбиевого стекла, обеспечивающий для фазочувствительного рефлектометра наибольшее отношение сигнал/шум (ОСШ), достигается в резонаторе, собранном по двухзеркальной схеме.

– Впервые в качестве узкополосного источника излучения фазочувствительного рефлектометра использован перестраиваемый твердотельный лазер на основе иттербий-эрбиевого стекла, обеспечивающий уровень отношения сигнал/шум, достаточный для регистрации вибрационных воздействий.

Основные положения, выносимые на защиту:

– Увеличение отношения сигнал/шум и ресурса работы фазочувствительного рефлектометра достигается за счёт согласования спектра излучения источника и полосы пропускания оптического фильтра при помощи перестройки частоты излучения лазера.

– Верхний уровень спектральной плотности флуктуаций частоты лазера для получения отношения сигнал/шум фазочувствительного рефлектометра, повышающего вероятность верного распознавания вибрационных воздействий, составляет 10^3 Гц²/Гц на частоте 10^3 Гц.

– Наибольшее отношение сигнал/шум фазочувствительного рефлектометра с перестраиваемым по частоте излучения твердотельным лазерным источником на основе иттербий-эрбиевого фосфатного стекла достигается при использовании двухзеркальной схемы резонатора с подавлением нерабочих мод внешним узкополосным фильтром.

Практическая ценность работы заключается в возможности применения её результатов при создании системы контроля активности для мониторинга железнодорожных путей.

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). Материалы научно-квалификационной работы использованы в учебном процессе кафедры

лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Реализация результатов работы подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные результаты работы были представлены на семи международных и одной всероссийской конференциях: «International Conference «Laser Optics» (Санкт-Петербург, 2016, 2018); «5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace» (Падуя, 2017); «4th International School and Conference «Saint-Petersburg OPEN 2017» (Санкт-Петербург, 2017); «14th IMEKO TC10 Workshop on Technical Diagnostics 2016: New Perspectives in Measurements, Tools and Techniques for Systems Reliability, Maintainability and Safety» (Италия, 2016); «2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)» (Тайпей, 2016); «Международной конференции по машиностроению, системотехнике и системам автоматического управления 2016» (Москва, 2016); «Всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение фотоники» (Москва, 2015).

Публикация результатов исследования. Основные результаты опубликованы в 16 статьях, включенных в перечень ВАК РФ, из них 13 входят в международную базу данных Scopus.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, трёх глав, общих выводов и списка литературы. Материал изложен на 151 странице машинописного текста и содержит 77 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 106 библиографических описаний.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проведённой работы и обоснован выбор системы на основе фазочувствительной рефлектометрии в качестве объекта исследований. Сформулированы цели, задачи, защищаемые положения, представлены ценность и практическое применение результатов. Также приведена структура диссертации.

Принцип работы фазочувствительного рефлектометра можно описать по схеме, представленной на Рисунке 1, он заключается в следующем.

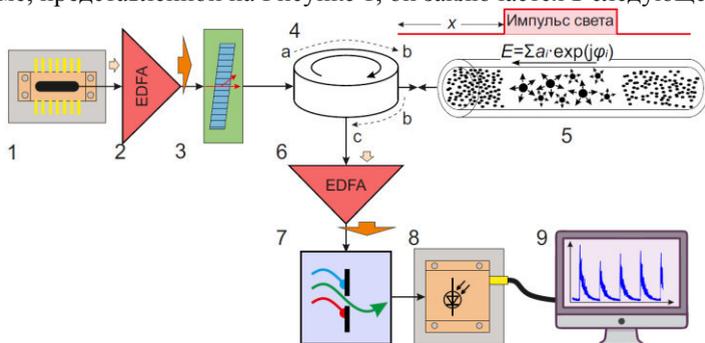


Рисунок 1. Схема фазочувствительного рефлектометра

Излучение от узкополосного источника (1) поднимается до необходимого уровня мощности в эрбиевом усилителе-бустере (2), далее из него акустооптическим модулятором (3) формируются зондирующие импульсы. Они с помощью циркулятора (4) направляются в сенсорное волокно (5), обратнорассеянный сигнал из которого также циркулятором перенаправляется для повышения оптической мощности на эрбиевый предусилитель (6), спонтанное излучение которого отсекается оптическим фильтром (7). Далее сигнал регистрируется фотоприёмником (8), переводится в цифровой вид на АЦП, обрабатывается на ПК оператора (9).

Данная сенсорная система является, по сути, модификацией обычного рефлектометра, применяемого для контроля целостности волоконно-оптической линии. И благодаря эффекту рассеяния высококогерентного света, который в его предшественнике служил лишь источником шумов, он позволяет получать информацию о колебаниях волокна на всём протяжении линии. Её длина определяется динамическим диапазоном устройства, а пространственное разрешение - длительностью зондирующего импульса. Факт воздействия определяется по изменению рефлектограммы, которое происходит только в области вокруг воздействия, сигнал с остальных участков при этом изменяется только на величину шума.

В первой главе проведен анализ развития систем на основе фазочувствительной рефлектометрии. Представлены результаты первых работ в данной области. Перечислены основные научные группы и компании, занимавшиеся исследованиями систем такого типа, описаны постепенные улучшения характеристик. Проведён обзор последних публикаций, посвящённых фазочувствительной рефлектометрии, выделено, что на текущий момент основными направлениями совершенствования являются:

- увеличение частоты опроса сенсора,
- увеличение длины сенсора,
- повышение чувствительности системы к воздействиям.

Сделан вывод, что даже при большом количестве преимуществ: большая длина чувствительного элемента, полностью пассивный сенсор, высокая степень автоматизации мониторинга – данная система всё ещё не является одним из основных решений в области мониторинга протяжённых объектов. Можно предположить, что потребителей не устраивает существующие возможности системы по обнаружению и распознаванию источников сигналов, а также наличия особенностей, которые затрудняют, а порой и просто делают невозможным корректное выполнение его функций. Например, в процессе эксплуатации происходит случайное смещение полосы пропускания оптических фильтров от рабочей длины волны лазера. Величина смещения может составлять единицы нанометров, что приводит к падению уровня сигнала вплоть до нуля. Для устранения данных недостатков в работе было предложено

применение в качестве источника перестраиваемого по частоте излучения источника, а также исследование алгоритмов идентификации сигналов.

На основе проведённого анализа требований к источнику излучения: генерация в области 1,55 мкм, узкая ширина оптического спектра, возможность перестройки на единицы нанометров, высокая стабильность длины волны, – был выбран твердотельный лазер на основе иттербий-эрбиевого фосфатного стекла. Рассмотрены его схемы на основе микрочипа и дискретной кюветы с двумя зеркалами.

В области идентификации сигналов были рассмотрены алгоритмы из области распознавания речи, поскольку обрабатываемые сигналы в обоих случаях имеют схожую природу и свойства.

Во второй главе приведено описание математической модели формирования сигнала фазочувствительного рефлектометра, учитывающей влияние перестройки и флуктуаций длины волны лазерного источника. Расчёт сформированного сигнала производится на основе заданных основных параметров сенсора, который представляется массивом центров рассеяния: амплитуды A_n , имеющей рэлеевскую плотность распределения вероятности, и расстояния до источника излучения L_n , равномерно возрастающего для каждого n -го центра, а также значений длины волны источника λ_t для каждой рефлектограммы. Тогда фазу обратнорассеянной волны можно рассчитать по формуле

$$\varphi_{n,t} = \frac{2\pi}{\lambda_t} L_n, \quad (1)$$

а уровень интенсивности, рассеиваемый назад импульсом, проходящим центры рассеяния с n_i по $n_i + n_{\text{имп}}/2$, который будет зарегистрирован приёмником излучения, получить из выражения

$$S_{t,n_i} = \left| \sum_{n=n_i}^{n_i+n_{\text{имп}}/2} A_n \cdot e^{j\varphi_{n,t}} \right|^2. \quad (2)$$

Для расчёта интенсивности с каждого регистрируемого положения зондирующего импульса необходимо учитывать его сдвиг, который выражается через число элементов $\Delta n_d = \frac{t_{\text{АЦП}} c}{2n_3 d_3}$ где $t_{\text{АЦП}}$ – период дискретизации АЦП, d_3 – размер одного моделируемого центра рассеяния, n_3 – показатель преломления сердцевины. В таком случае одну рефлектограмму из K отсчётов на АЦП можно вычислить по выражению:

$$R_{ind,t} = S_{t,n_i} \Big|_{i=(ind-1) \cdot \Delta n_d + 1}^{K \cdot \Delta n_d + 1}, \quad (3)$$

где ind - номер отсчёта рефлектограммы. Также можно получить данный результат путём выборки функцией *comb* нужных отсчётов из свёртки сигнала от каждого моделируемого центра рассеяния с функцией *rect*, задающей длину импульса в волокне:

$$R_{ind,t} = comb\left(\frac{i}{\frac{t_{\text{АЦП}}}{2n_3 d_3}}\right) \left(S_{t,n_i} \Big|_{i=1}^{\frac{L_{c3}}{d_3}} \otimes rect\left(\frac{i}{\frac{\tau_{\text{ИМП}}}{2n_3 d_3}}\right)\right). \quad (4)$$

Для окончательного формирования одной рефлектограммы в виде, котором она будет отображаться на экране, необходимо учесть полосу пропускания электрического усилителя фотодиодного приёмника. Так как самый высокочастотный сигнал (до 100 МГц) в системе содержит большую долю шумов, то обычно его отфильтровывают в диапазоне от 0 до 5 МГц фильтром электрического усилителя.

$$Rf_{ind,t} = R_{ind,t} \otimes h_{pr}(i) + N_{ind,t}, \quad (5)$$

где $h_{pr}(i)$ – импульсная функция электрического усилителя, а $N_{ind,t}$ – оставшиеся физические (от колебания центров рассеяния), оптические (от предусилителя) и электрические шумы системы.

Для моделирования воздействия на волокно, из-за сложности точного описания передачи вибрации от грунта к сенсорному кабелю, принимаются следующие допущения и упрощения:

1. Воздействие, происходящее в определённой точке, вызывает одиночное импульсное смещение центров рассеяния на величину ΔL_{max} ,

2. После получения начальной деформации центры рассеяния начинают колебаться с периодом $P(s)$, затухая с постоянной по времени $r_t(s)$, определяемым свойствами окружающей среды и волокна s ,

3. Также колебания распространяются от места начального воздействия со скоростью $v(s)$, затухая с постоянной по расстоянию $r_n(s)$.

Тогда воздействие, произошедшее в момент времени t_c на участке n_c сенсора, можно задать выражением:

$$\begin{aligned} & \Delta L_{n,t}(\Delta L_{max}, s, n_c, t_c) = \\ & = \begin{cases} \Delta L_{max} \cdot \exp\left(-\frac{|n - n_c|}{r_n(s)}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t - t_c}{r_t(s)}\right) \cdot \\ \cdot \sin\left(\frac{t - t_c - \frac{d_3 |n - n_c|}{v(s)}}{P(s)}\right) \text{ при } t \geq t_c \\ 0 \text{ в другом случае} \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

Основным преимуществом данной модели перед остальными является учёт зависимости сигнала от временной стабильности частоты источника излучения, которую можно задавать через спектральную плотность флуктуаций частоты S_v , [Гц²/Гц], эта характеристика обычно предоставляется производителем:

$$v_t = v_0 + \left| F^{-1} \left\{ \sqrt{S_v v_p^2 T} \right\} \right|, \quad (7)$$

где ν_0 – частота лазера в начальный момент времени, $F^{-1}\{\dots\}$ – обратное преобразование Фурье, $\nu_p = 1$ кГц – частота получения рефлектограмм, T, c – длительность моделируемого промежутка, $S_\nu, \text{Гц}^2/\text{Гц}$ – спектральная плотность флуктуаций частоты. Схематично её общий вид представлен на Рисунке 2,а.

Для проверки данной модели были собраны экспериментальные сигналы фазочувствительного рефлектометра с тремя лазерами, которые поочередно были источниками, причём параллельно часть их излучения через разветвитель отводилась на измеритель длины волны. На основе полученного массива значений длин волн были получены симулированные сигналы фазочувствительного рефлектометра, рассчитанные на основе вышеописанной модели. Результаты сравнения СКО по времени на участках с одинаковой средней интенсивностью на коротких (50 мс) и длинных (5 с) временных промежутках, а также внешний вид графиков последовательности рефлектограмм («водопад») экспериментальных и смоделированных данных дают большую степень совпадения, что подтверждает корректность предложенного описания зависимости формирования сигнала рефлектометра от нестабильности лазера.

Математическая модель была использована для симулирования сигнала фазочувствительного рефлектометра от лазеров, характеристика нестабильности которых, в соответствии со схемой на Рисунке 2,а, задавалась в диапазонах: $x_\nu = 10^2..10^6$ Гц, $y_\nu = 10^2..10^8 \text{Гц}^2/\text{Гц}$ (оба - с шагом по степени 0,33), $\alpha = -20..-30$ дБ/дек (с шагом 3,3 дБ/дек). При каждом численном расчёте задавалось одинаковое распределение амплитуд и фаз центров рассеяния, а также одинаковое воздействие на волокно с амплитудой 2 мкм. Из полученных данных вычислялось ОСШ для сигнала как отношение СКО участка с воздействием к полусумме СКО участков без воздействия с минимальным и максимальным математическими ожиданиями, как показано на Рисунке 2,б.

$$\text{ОСШ} = \frac{\text{СКО}_{\text{сиг}}}{0,5(\text{СКО}_{\text{шум-мин}} + \text{СКО}_{\text{шум-макс}})}, \quad (8)$$

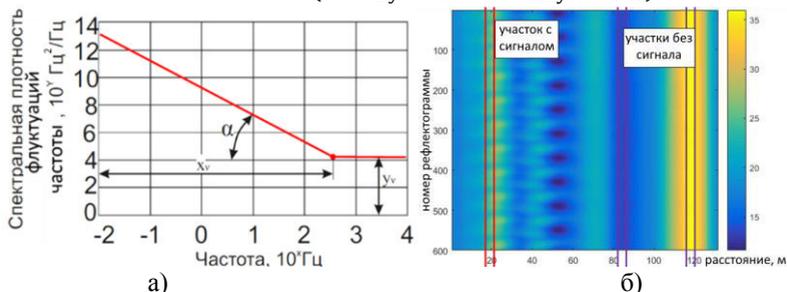


Рисунок 2. Моделирование сигнала фазочувствительного рефлектометра
 а) Схема определения параметров для моделирования,
 б) Обозначенные участками для определения ОСШ

Результаты, полученные для всех промоделированных лазерных источников с различной стабильностью длины волны, позволили построить цветовую карту, отображающую зависимость отношения сигнал/шум от параметров стабильности источника, представленную на Рисунке 3,а. Так как для работоспособности системы и качественной идентификации источников воздействия достаточно ОСШ=10 дБ, то данная величина была выбрана в качестве порога. На Рисунке 3,б выделена область источников, параметры стабильности которых обеспечивают качественный сигнал фазочувствительного рефлектометра, что также подтверждается попаданием в эту область источников, которые показали достаточное качество сигнала в экспериментах.

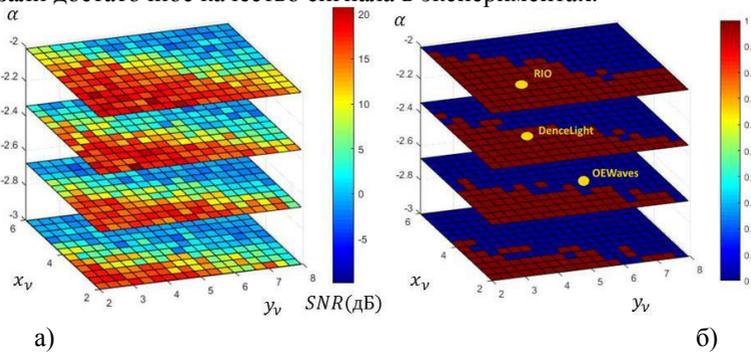


Рисунок 3. Результаты моделирования сигнала с разными лазерами
 а) График значений ОСШ, б) Область ОСШ более 10

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований предложенных схем лазера на иттербий-эрбиевом фосфатном стекле и алгоритмов определения источников сигналов, регистрируемых фазочувствительным рефлектометром.

В первой части приведены результаты, полученные при создании лазера с наиболее простой в реализации схемой: на микрочипе активной среды (Рисунок 4,а, изначально собиралась без цепи обратной связи).

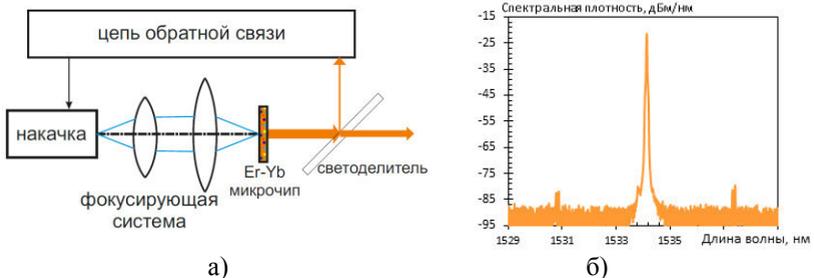


Рисунок 4. Лазерный источник на микрочипе иттербий-эрбиевого стекла: а) Схема, б) Спектр излучения

В оптическом спектре выходного излучения видна основная генерируемая мода, соседние расположены через 4 нм и имеют уровень интенсивности на 60 дБ меньше (Рисунок 4,б). Однако проявившимся недостатком данной схемы стали значительные релаксационные колебания, график которых представлен на Рисунке 5,а, которые негативно сказываются на формировании стабильной последовательности рефлектограмм. Для их подавления была собрана цепь обратной связи, показанная на Рисунке 4,а, которая в зависимости от изменения уровня выходной мощности лазера компенсировала его колебания, регулируя мощность накачки. За счёт этого удалось добиться, при оптимальном коэффициенте усиления в цепи, понижения пика релаксационных колебаний на 25 дБ, как это представлено на графиках Рисунка 5,б.

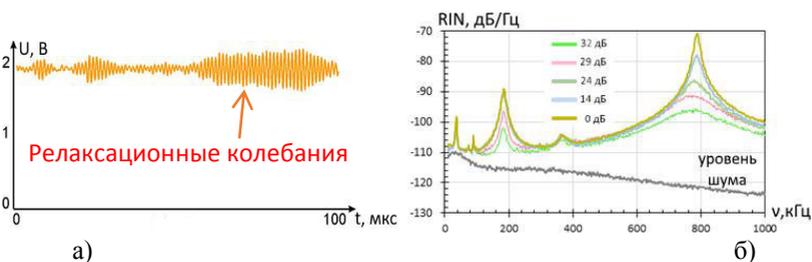


Рисунок 5. Релаксационные колебания лазера на микрочипе
 а) График выходной мощности лазера, б) Графики RIN при разных уровнях усиления в цепи обратной связи

Но так как обратная связь влияет на мощность накачки, а мощность накачки определяет центральную длину волны лазера на микрочипе, то это приводит к увеличению амплитуды флуктуаций длины волны источника.

На основе модели, представленной во второй главе, был сделан вывод, что схема обратной связи ухудшает ОСШ системы, а без неё ОСШ ухудшается из-за нестабильности интенсивности, вызванной релаксационными колебаниями.

Для компенсации вышеперечисленных недостатков была предложена схема построения лазера на основе дискретной кюветы, результаты экспериментального исследования которой приведены во второй части главы. Её изображение приведено на Рисунке 6. В ней применяется чип активной среды большей толщины – 1 мм, в котором за прямой и обратный проходы поглощается большая часть излучения накачки. Зеркалами лазера являются первая поверхность чипа (99,85% отражения на $\lambda=1550$ нм) и первая поверхность выходного зеркала (99,5% отражения на $\lambda=1550$ нм). Форма каустики лазерного пучка в данном резонаторе будет определяться радиусом и положением выходного вогнутого зеркала. Максимальная возможная длина кюветы равна этому радиусу, при этом диаметр перетяжки на глухом зеркале будет минимальным. При уменьшении расстояния между компонентами будет изменяться форма

пучка и увеличиваться радиус перетяжки. На Рисунке 7,а показано, как в таком случае при увеличении радиуса перетяжки и сохранении формы пучка накачки будет происходить формирование области с недостаточной инверсной населённостью. В ней ионы эрбия начинают поглощать проходящее излучение (спектр усиления показан на Рисунке 7,б), из-за чего создаются условия для генерации в области больших длин волн, чем пик излучения эрбия на 1535 нм. Это также позволяет работать в области низких шумов волоконных усилителей. На Рисунке 7,б представлены спектры излучения лазера, полученные при различных смещениях выходного зеркала вдоль оптической оси.

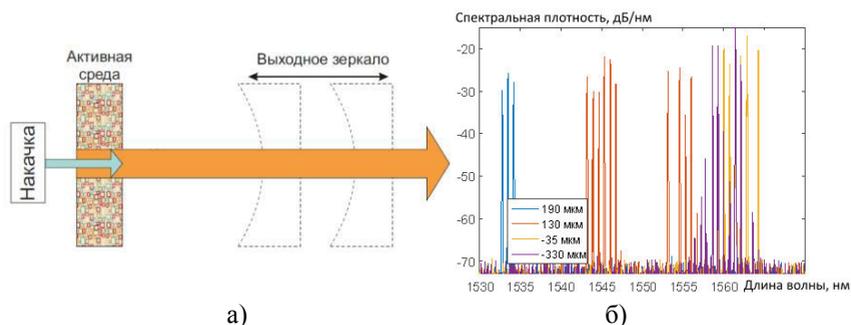


Рисунок 6. Лазер с дискретной кюветой

а) Схема, б) Спектры излучения при разной длине кюветы

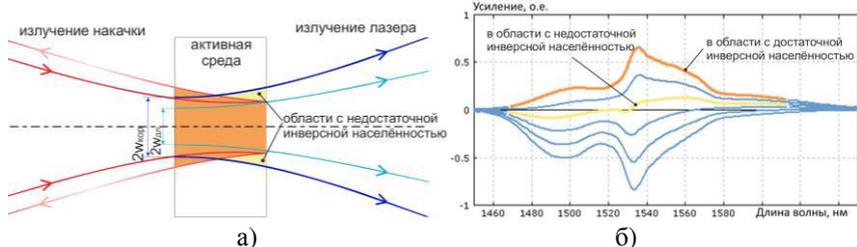


Рисунок 7. Формирование зон инверсной населённости в активной среде

а) Схема пластины б) Спектр усиления эрбия при различной интенсивности накачки

Видно, что уменьшение длины резонатора позволяет выбирать область генерации как в диапазоне от 1540 до 1550 нм, так и в более длинноволновом: от 1555 до 1565 нм.

Так как у лазера в новой схеме на два порядка возросла длина резонатора, то произошло смещение пика релаксационных колебаний от значения порядка 1 МГц до 100 кГц (Рисунок 8.а). При этом также произошло падение уровня этого пика до величины, которая на микрочипе достигалась лишь с применением обратной связи к диоду накачки. Таким образом в новой схеме был получен лучший уровень стабильности интенсивности выходного излучения лазера.

Излучение полученного лазерного источника было использовано в качестве исходного для построения фазочувствительного рефлектометра по схеме, представленной на Рисунке 8.б. Её модификациями по сравнению с исходной (Рисунок 1) является, во-первых, применение не узкополосного лазерного источника, а выделение одной спектральной линии из набора генерируемых при помощи фильтра 3, а во-вторых – применение этого же фильтра в обратном ходе для подавления спонтанного излучения предусилителя 9. На основе предложенной схемы реализован макет фазочувствительного рефлектометра на твердотельном иттербий-эрбиевом лазере, в котором оптимизирована и автоматизирована спектральная фильтрация в зондирующем и приёмных каналах за счёт использования единого фильтра. На Рисунке 9,а представлен сигнал от внешнего воздействия пьезоэлектрическим модулятором на участок сенсора длиной 20 м. Цветовая карта, отображающая последовательность рефлектограмм («водопад»), представлена на Рисунке 9,б. Видно, что стабильность источника достаточна для выделения сигнала на фоне шума, ОСШ в макетном образце составило 6 дБ.

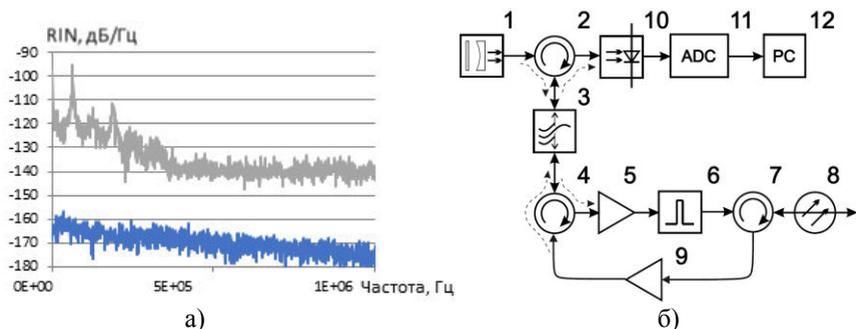


Рисунок 8. Твердотельный лазер с дискретной кюветой
 а) Относительный шум интенсивности, б) Модифицированная схема фазочувствительного рефлектометра

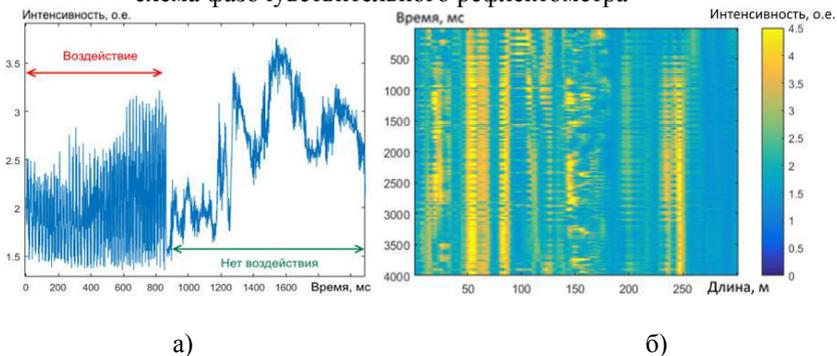


Рисунок 9. Сигнал с эталонным воздействием на волокно
 а) График сигнала с участка, б) Общий вид «водопада» от фазочувствительного рефлектометра

В третьей части главы приводятся результаты обработки полученных на полигоне Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана данных различными алгоритмами идентификации источников сигналов. Основной задачей было формирование вектора данных сигнала из большого потока входящих данных. Необходимо было выбрать его параметры (размеры по времени и отсчётам сенсора, прореживание и другие), а также определять порядок обработки. Некоторые из параметров сигнала, которые можно использовать для классификации, приведены в Таблице 1.

Численный эксперимент применения детерминированных признаков описаний на основе мел-кепстральных коэффициентов, метода главных компонент, логарифмов энергий фильтров и центров масс фильтров. Полученные с их помощью данные сравнивались после обработки алгоритмами «случайного леса» и линейной регрессии. В результате было получено, что наибольшую вероятность правильного обнаружения при выделении признаков с помощью логарифмов энергий фильтров с обработкой алгоритмом «случайного леса».

Таблица 1.

Примеры параметров различных сигналов

Параметр сигнала	Шаг	Удар лопатой	Авто	Фон
Периодичность	Да	Возможно	Нет	Нет
Наличие характерной частоты	Да	Да	Нет	Нет
Смещение вдоль сенсора	Иногда	Нет	Обычно да	Обычно нет
Длительность непрерывного одиночного воздействия	0,1..0,3 с	0,1..0,4 с	До 10 с	Не ограничена
Длина вдоль сенсора	До 15 м	До 20 м	До 60 м	Не ограничена
Уровень энергии в сигнале	Средний	Средний	Высокий	Низкий

Наиболее интересным с практической точки зрения является результат, полученный при применении метода смесей нормальных (гауссовских) распределений, которыми аппроксимируются параметры регистрируемых сигналов. То, к какому классу с наибольшей вероятностью относится сигнал, определяется с помощью алгоритма максимизации ожидания. Блок-схема представлена на Рисунке 10. Результаты верной идентификации в зависимости от объёма тестовой выборки приведены в Таблице 2.



Рисунок 10. Схема алгоритма классификации сигналов фазочувствительного рефлектометра на основе смесей гауссовских распределений

Таблица 2.

Результаты идентификации сигналов с помощью метода на основе смесей гауссовских распределений

Обучающая выборка	Тестовая выборка	Распознано верно, шт.	Распознано верно, %
35	141	103	73
52	124	103	83
70	106	91	85
88	88	82	93
114	62	56	90
123	53	50	94
140	36	32	88

Предложенные алгоритмы были реализованы и протестированы на ПК. Среднее время, затраченное на классификацию события, составило 1 мс, что является приемлемым для применения в системах охраны и мониторинга. Вероятность верного определения события составила 94%. На основе алгоритма создано программное обеспечение для макетного образца фазочувствительного рефлектометра.

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

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

– Показана возможность увеличения отношения сигнал/шум и ресурса работы фазочувствительного рефлектометра за счёт согласования спектра излучения источника и полосы пропускания оптического фильтра при помощи перестройки частоты излучения лазера.

– Предложены технические пути согласования рабочей длины волны лазерного источника и полосы пропускания оптического фильтра на основе волоконной брэгговской решётки, основанные на подстройке

частоты излучения лазера, обеспечивающей максимизацию отношения сигнал/шум.

– Создана математическая модель процесса формирования сигнала фазочувствительного рефлектометра, учитывающая влияние как перестройки, так и флуктуаций длины волны лазерного источника.

– Разработана методика расчёта отношения сигнал/шум фазочувствительного рефлектометра, использующая спектральную плотность флуктуаций частоты лазера и позволяющая сформировать требования к источнику излучения.

– Разработаны макетные установки твердотельных лазерных источников с иттербий-эрбиевой активной средой и экспериментально исследованы их характеристики: стабильность мощности и длины волны, что показало узость спектральных линий источников и наличие релаксационных колебаний.

– Показаны преимущества и недостатки способа подавления релаксационных колебаний твердотельного иттербий-эрбиевого лазера, основанного на внесении цепи обратной связи, для формирования сигнала фазочувствительного рефлектометра.

– Разработан алгоритм обработки сигналов фазочувствительного рефлектометра, основанный на аппроксимации сигналов гауссовскими распределениями с последующей максимизацией вероятности попадания события в определённый класс, обеспечивающий вероятность правильного обнаружения более 94%.

– Создана экспериментальная установка фазочувствительного рефлектометра на основе твердотельного иттербий-эрбиевого лазерного источника с дискретной кюветой, экспериментальные исследования которой подтвердили возможность получения достаточного для определения воздействия отношения сигнал/шум.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Mathematical analysis of marine pipeline leakage monitoring system based on coherent OTDR with improved sensor length and sampling frequency / Zhirnov A.A. [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Т. 584. №. 1. С. 012016. (0,69 п.л./0,12 п.л.)

2. Note: Gaussian mixture model for event recognition in optical time-domain reflectometry based sensing systems / Zhirnov A.A. [и др.] // Review of Scientific Instruments. 2016. Т. 87. №. 3. С. 036107. (0,35 п.л./0,05 п.л.)

3. Experimental study of influence of nonlinear effects on phase-sensitive optical time-domain reflectometer operating range / Zhirnov A.A. [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. 2015. Т. 584. №. 1. С. 012028. (1,16 п.л./0,2 п.л.)

4. Yb Er: glass Microlaser at 1.5 μm for optical fibre sensing: development characterization and noise reduction / Zhirnov A. [и др.] // АСТА ИМЕКО. 2016. Т. 5. №. 4. С. 24-28. (0,58 п.л./0,12 п.л.)

5. Er: Yb phosphate glass laser with nonlinear absorber for phase-sensitive optical time domain reflectometry / Zhirnov A.A. [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Т. 917. №. 5. С. 052032. (0,69 п.л./0,35 п.л.)
6. Minimizing Measurement Error of Phase Noise of a Narrow-Band Laser Using a Fiber-Based Mach-Zehnder Interferometer with Polarization Maintenance / Zhirnov A.A. [и др.] // Measurement Techniques. 2018. №. 5. С. 467-473. (0,81 п.л./0,13 п.л.)
7. Runways ground monitoring system by phase-sensitive optical-fiber OTDR / Zhirnov A.A. [и др.] // 2017 IEEE MetroAeroSpace. IEEE, 2017. С. 523-529. (0,81 п.л./0,25 п.л.)
8. Phase-sensitive optical time-domain reflectometry with pulse mode EDFA: Probe pulse preparation / Zhirnov A.A. [и др.] // 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS). IEEE, 2017. С. 2231-2236. (0,69 п.л./0,11 п.л.)
9. Adaptation of the Er-Yb microchip laser for use in phase-sensitive optical time domain reflectometry / Zhirnov A.A. [и др.] // 2016 International Conference Laser Optics. IEEE, 2016. С. R1-5. (0,12 п.л./0,03 п.л.)
10. Tunable Discrete-Cavity Solid-State Laser For Phase-Sensitive OTDR / Zhirnov A.A. [и др.] // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). IEEE, 2018. С. 31. (0,12 п.л./0,03 п.л.)
11. Possibility of distributed acoustic sensing (DAS) for geophysical problems solution / Zhirnov A.A. [и др.] // 24th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. EAGE, 2018. С. 46558. (0,81 п.л./0,1 п.л.)
12. Multipurpose monitoring system for icebreakers: Development, implementation, and testing / Zhirnov A. [и др.] // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2016. Т. 75. С. 04005. (0,46 п.л./0,06 п.л.)
13. Fiber-pumped Yb Er: glass microchip laser for coherent OTDR sensing / Zhirnov A. [и др.] // Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2016. IEEE, 2016. С. 1-5. (0,58 п.л./0,1 п.л.)
14. Измеритель фазовых шумов узкополосных лазеров, основанный на состоящем из РМ-волокна интерферометре Маха-Цендера // Патент России №2664692. Выд. 21.08.2018. / Жирнов А.А. [и др.]. (1,39 п.л./0,15 п.л.)
15. Волоконно-оптическое устройство большой протяжённости с источником малой мощности для регистрации вибрационных воздействий // Патент России №2589492. Выд. 10.07.2016. / Жирнов А.А. [и др.]. (1,39 п.л./0,17 п.л.)
16. Волоконно-оптический распределительный виброакустический датчик на основе фазочувствительного рефлектометра и способ улучшения его характеристик чувствительности // Патент России №2650853. Выд. 17.04.2018. / Жирнов А.А. [и др.]. (1,8 п.л./0,1 п.л.)