

**Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук**

Пермская научно-производственная приборостроительная компания

**II ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ОПТИЧЕСКАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ – 2018»**

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Пермь – 2018

II Всероссийская конференция «Оптическая рефлектометрия – 2018» 29-31 мая 2018 г., г. Пермь. Сборник тезисов докладов. – Пермь: ООО «М'Арт», 2018. - 93 с.

В сборник включены тезисы докладов по оптической рефлектометрии, представленные на II Всероссийской конференции «Оптическая рефлектометрия – 2018», прошедшей 29-31 мая 2018 года в г. Пермь (Россия). Доклады сделаны учеными, инженерами, разработчиками – представителями академической и вузовской науки, научно-исследовательских институтов, а также сотрудниками других организаций. Конференция организована Лабораторией фотоники Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН при содействии Пермской научно-производственной приборостроительной компании.

Редакционная коллегия: Ю.А. Константинов, Р.И. Петрова, Е.Ю. Филиппова, А.Г. Вотинова, И.А. Лобач, А.С. Смирнов

СО-ПРЕДСЕДАТЕЛИ КОНФЕРЕНЦИИ:

Горшков Борис Георгиевич, д.т.н., в.н.с. (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва)

Бурдин Владимир Александрович, д.т.н., проректор по науке и инновациям (ПГУТИ, Самара)

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ:

Бурдин Антон Владимирович, д.т.н., профессор (ПГУТИ, Самара) – председатель

Лобач Иван Александрович, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией (Лаборатория фотоники ПФИЦ УрО РАН, Пермь), с.н.с. (ИАиЭ СО РАН, Новосибирск) – заместитель председателя

Беловолов Михаил Иванович, к.ф.-м.н., в.н.с. (НЦВО РАН, Москва)

Горшков Борис Георгиевич, д.т.н., в.н.с. (ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва)

Шардаков Игорь Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий Лабораторией интеллектуального мониторинга (ИМСС УрО РАН, Пермь)

Фотиади Андрей Александрович, к.ф.-м.н., профессор (Université de Mons, Бельгия)

Пономарев Роман Сергеевич, к.ф.-м.н., доцент (ПГНИУ, Пермь)

Крюков Игорь Иванович, к.т.н., зам. директора "Завода оптоволоконных компонентов" (ПНППК, Пермь)

Свинцов Анатолий Геннадьевич, к.т.н., главный редактор (журнал «Фотон-экспресс», Москва)

Дашков Михаил Викторович, к.т.н., доцент (ПГУТИ, Самара)

Акопов Сергей Георгиевич, к.ф.-м.н., технический директор (ООО "Корнинг СНГ", Москва)

Барков Фёдор Леонидович, к.ф.-м.н., с.н.с. (Лаборатория фотоники ПФИЦ УрО РАН, Пермь)

Бурдин Владислав Викторович, к.ф.-м.н., доцент, с.н.с. (ПНИПУ, Лаборатория фотоники ПФИЦ УрО РАН, Пермь)

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1 – «РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ДАТЧИКИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКОННОЙ И ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ»

Горшков Б.Г. НОВОЕ В ФИЗИКЕ РЭЛЕЕВСКОГО РАССЕЯНИЯ: ИНИЦИИРОВАНО КОНФЕРЕНЦИЕЙ ОР-2016.....	8
Бурдин В.А., Бурдин А.В., Дашков М.В. ИЗМЕРЕНИЯ КРИВИЗНЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В КАБЕЛЕ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ.....	10
Богачков И.В. ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА – БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ «PANDA».....	12
Богачков И.В., Горлов Н.И., Токарева И.А. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В КАНАЛАХ ПАССИВНЫХ СЕТЯХ ДОСТУПА.....	16
Горшков Б.Г., Таранов М.А. РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И НАПРЯЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПО СПЕКТРАМ РАССЕЯНИЯ РЭЛЕЯ. ОГРАНИЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗА СЧЁТ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ.....	17
Горшков Б.Г., Таранов М.А., Горшков Г.Б. ОДНОВРЕМЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ СПОНТАННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА.....	21
Алексеев А.Э., Тезадов Я.А., Потапов В.Т. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВОЛОКОННОГО КОГЕРЕНТНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИСТОЧНИКОМ.....	24
Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Мороз Е.А., Погоньшев А.О., Савкин К.Б., Тихомиров С.В. МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ OFDR РЕФЛЕКТОМЕТРОВ.....	26
Жуков К.М., Симикин Д.Е., Таранов М.А. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОДОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКАХ.....	28
Кривошеев А.И., Носова Е.А., Лобач И.А., Клод Д., Константинов Ю.А., Барков Ф.Л. НАБЛЮДЕНИЕ «ОТРАЖАЮЩИХ СОБЫТИЙ» НА УЧАСТКАХ МИКРОИЗГИБНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОДНОМОДОВОГО СВЕТОВОДА ПРИ ПОМОЩИ СПЕЦИАЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ РЭЛЕЕВСКОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА.....	30
Паршаков О.С., Кормициков Д.С. ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОВОЛОКОННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ.....	33

Пономарев Р.С., Шевцов Д.И. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ.....	35
Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Мороз Е.А., Подюкова Л.В., Савкин К.Б., Тихомиров С.В. РАБОТЫ ВНИИОФИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ.....	36
Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Прохоров Д.В., Донченко С.С. ОПТИЧЕСКИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ – СХЕМА И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	38
Алексеев А.Э., Вдовенко В.С., Горшков Б.Г., Потапов В.Т., Симикин Д. Е. СНИЖЕНИЕ ЗАМИРАНИЙ СИГНАЛА В ФАЗОВОЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ОПТИЧЕСКОМ РЕФЛЕКТОМЕТРЕ С МНОГОМОДОВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ВОЛОКНОМ.....	40
Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г. АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ РЕШЕТКИ С ЕДИНОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ БРЭГГА.....	43
Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г., Нуреев И.И., Кузнецов А.А., Пуртов В.В., Казаров В.А., Феофилактов С.В., Мисбахов Р.Ш., Алексеев В.Н., Иваненко В.А. АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ: КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ДАТЧИКИ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ.....	45
Фролов И.В. ТОЧНОСТЬ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ.....	48
Будылин Г.С., Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Жуков К.М., Парамонов В.М., Симикин Д.Е. АКТИВНЫЙ БРИЛЛЮЭНОВСКИЙ ФИЛЬТР В СХЕМЕ ОПТИЧЕСКОГО БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА.....	50
Шубин А.В., Гейдер Р.Ф., Якубович А.А., Смирнов В.С., Греков М.В., Фотиади А.А. РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДАВЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОЕ БРИЛЛЮЭНОВСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ С СОХРАНЕНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ.....	52
Бурдин А.В., Бурдин В.А., Дельмухаметов О.Р., Желудков М.А., Зайцева Е.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЕЙВЛЕТОВ ХААРА И ГАУССА 1 ^{ГО} ПОРЯДКА ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ «СОБЫТИЙ БЕЗ ОТРАЖЕНИЯ», СООТВЕТСТВУЮЩИХ СВАРНЫМ СОЕДИНЕНИЯМ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН.....	55
Дашков М.В. СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОПТИЧЕСКОМ КАБЕЛЕ.....	57
Богачков И. В. ИЗУЧЕНИЕ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА – БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ, ЛЕГИРОВАННОМ ЭРБИЕМ.....	60

СЕКЦИЯ 2 – «ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕНСОРИКИ»

Трегубов А.В., Новиков С.Г., Светухин В.В., Алексеев А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ АРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СО ВСТРОЕННЫМИ ВОЛОКОННО- ОПТИЧЕСКИМИ СЕНСОРАМИ ДЕФОРМАЦИИ.....	63
---	----

Москалев Д.Н., Салгаева У.О., Пономарев Р.С. РАЗРАБОТКА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ С АПОДИЗАЦИЕЙ НА НИТРИДЕ КРЕМНИЯ С ПИКОМ ОТРАЖЕНИЯ НЕ БОЛЕЕ 2 НМ.....	65
---	----

СЕКЦИЯ 3 – «СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ»

Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г., Нуреев И.И., Кузнецов А.А., Куликов Е.В., Феофилактов С.В., Мисбахов Р.Ш. АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ: МАЛОСЕНСОРНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ.....	68
--	----

Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г., Нуреев И.И., Кузнецов А.А., Пуртов В.В., Казаров В.А., Феофилактов С.В., Мисбахов Р.Ш., Алексеев В.Н., Иваненко В.А. АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ: МНОГОСЕНСОРНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ.....	71
--	----

Богачков И.В., Иниватов Д.П., Киреев А.П., Горлов Н.И. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПО БРИЛЛЮЭНОВСКИМ РЕФЛЕКТОГРАММАМ.....	74
---	----

Богачков И.В., Трухина А.И. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗГИБОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА БРИЛЛЮЭНОВСКИЕ РЕФЛЕКТОГРАММЫ.....	77
---	----

Богачков И.В., Горлов Н.И., Квиткова И.Г., Шайгараева Т.Н. РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ.....	80
--	----

Бурдин А.В., Бурдин В.А., Морозов О.Г., Василец А.А., Барашкин А.Ю., Евтушенко А.С., Казаков В.С., Кармолин А.С., Минаева А.Ю., Соколов Е.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОМОДОВЫХ РЕЖИМОВ МНОГОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С НАНЕСЕННЫМИ ПРЕЦИЗИОННЫМИ МАКРОСТРУКТУРНЫМИ ДЕФЕКТАМИ И ВОЛОКОННЫМИ РЕШЕТКАМИ БРЭГГА.....	81
--	----

Митченкова О.Г. МОНИТОРИНГ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В СЕТЯХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ.....	84
---	----

Минкин А.М., Созонов Н.С., Фадеев К.М., Шевцов Д.И. МИНИАТЮРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО.....	86
---	----

Гордеев К.Е., Дураев В.П., Шестаков А.А., <u>Шестаков А.В.</u> ИМПУЛЬСНЫЕ СУБНАНОСЕКУНДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД.....	89
<i>Авторский указатель.....</i>	91

«РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ДАТЧИКИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЛОКОННОЙ И ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОПТИКИ»

**НОВОЕ В ФИЗИКЕ РЭЛЕЕВСКОГО РАССЕЯНИЯ:
ИНИЦИИРОВАНО КОНФЕРЕНЦИЕЙ ОР-2016**

Горшков Б.Г.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, ул. Вавилова, 38

Аннотация

В связи с возникшей на конференции ОР-2016 дискуссией о природе неустраимых «шумов» обычных рефлектограмм, используемых для оценки затухания оптических волокон, нами проведены экспериментальные исследования, показавшие неустраимость такого рода «шумов», а также факт «вмороженности» оптических неоднородностей в структуру волокна. Более детальные исследования показали, что эта «вмороженность» является условной, и при сдвигах зондирующего излучения на полную ширину спектра картина распределения условных неоднородностей не повторяется. Сделан вывод о чисто статистической природе «шумов» при отсутствии в волокне каких-либо макроскопических неоднородностей структуры, за исключением замороженных термодинамических флуктуаций показателя преломления. Понимание физики процесса позволило за счет использования перестраиваемого по частоте низкокогерентного излучения получить распределенный датчик, обладающий одновременно высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном при высоком пространственном разрешении. Продемонстрировано измерение температурного распределения и распределения механических деформаций. Разработанный подход в большинстве ситуаций по характеристикам превосходит бриллюэновскую рефлектометрию.

Оптическая рефлектометрия является важнейшим методом измерения потерь в оптических волокнах. При использовании в качестве регистрируемого параметра интенсивности рэлеевского рассеяния света метрологические свойства приборов тем лучше, чем менее зашумленными являются полученные рефлектограммы. В частности, при измерении потерь, номинируемых в дБ/км, шум не позволяет точно оценить потери при малых длинах волокон, измеряемых десятками и сотнями метров. Известны два механизма «зашумления» рэлеевских рефлектограмм. Первый обусловлен поляризационными эффектами. Обычно источник излучения, как правило, лазерный диод, дает линейно поляризованное излучение, которое при распространении по волокну, не сохраняющему поляризацию, произвольно изменяет поляризационное состояние. При рассеянии излучения трансформации поляризации не происходит, обратно рассеянное излучение через формально поляризационно-нечувствительные элементы (ответвитель или циркулятор) поступает на фотоприемник. Эти элементы, тем не менее, характеризуются поляризационно-зависимыми потерями, которые типично составляют 0,03 – 0,2 дБ, что и вызывает поляризационный шум. Использование различных известных методов деполяризации (как в среднем по спектру, так и с усреднением по времени – скремблирования) позволяет поляризационный шум практически устранить.

На рисунке 1 приведен фрагмент рефлектограммы, полученной с использованием широкополосного деполяризованного зондирующего излучения (10 нм) с длительностью импульса 5 нс [1].

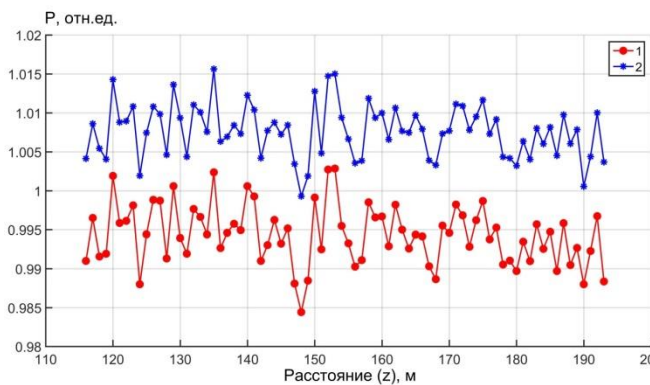


Рис. 1

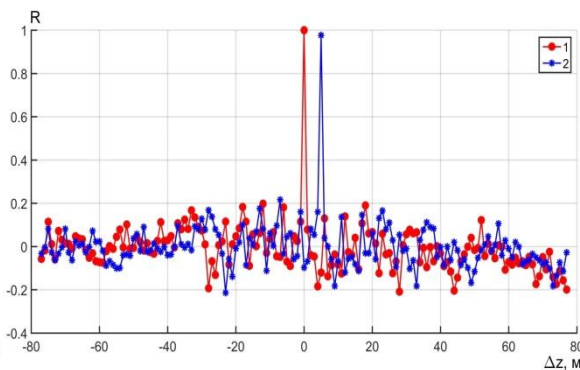


Рис. 2

Рефлектограммы 1 и 2 получены с разностью во времени 12 часов. Они до деталей повторяют одна другую. Кроме того, установлено, что малые изменения температуры и механические напряжения не оказывают существенного влияния на вид этих рефлектограмм. В этом смысле можно говорить о «вмороженности» оптических неоднородностей в структуру волокна. Дополнительное доказательство «вмороженности» неоднородностей приведено на рисунке 2, где показаны автокорреляционная (1) и взаимокорреляционная функции для рефлектограмм, одна из которых сдвинута на 5,1 м путем сваривания дополнительного отрезка волокна. Все неоднородности сдвинулись ровно на длину этого отрезка. В конечном счете нам стало ясно, что это поведение волокон объясняется исключительно одним фундаментальным механизмом, т.е. рэлеевским рассеянием на замороженных термодинамических флуктуациях показателя преломления без привлечения иных гипотез. Следовательно, имеется фундаментальное ограничение точности измерения затухания в оптических волокнах, если использовать упругое рассеяние. Изученный «шум» легко устраняется использованием неупругого рассеяния, например, комбинационного (стоксова, мало зависящего от температуры), см. рисунок 3, где 1 – фрагмент рэлеевской рефлектограммы, 2 и 3 – стокс и антистокс рамановского рассеяния.

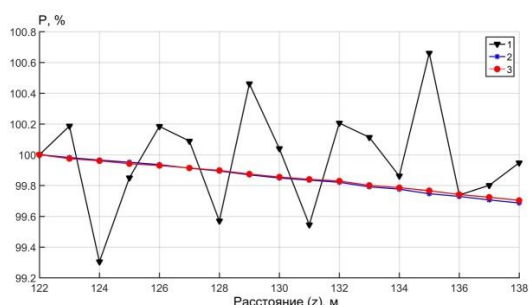


Рис. 3

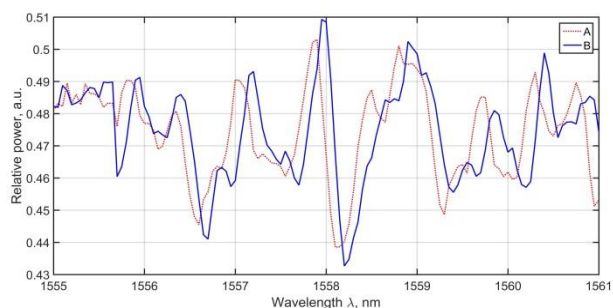


Рис. 4

Дальнейшие исследования показали, что вышеупомянутый «шум» рэлеевской рефлектограммы несет в себе очень много информации, которая может быть использована для создания нового подкласса распределенных датчиков. Речь идет о получении в каждом виртуальном канале дальности спектров рэлеевского рассеяния, понимаемых в том же смысле, как определяется, например, спектр отражения брэгговской решетки. Для получения таких спектров необходимо производить плавную перестройку частоты зондирующего излучения. Для этой цели мы применяем MEMS технологию – перестраиваемый фильтр. С его помощью получают спектры, которые типично выглядят, как показано на рис. 4 [2]. Здесь 1 – исходный спектр, 2 – спектр после деформации удлинения на 0,01%. Виден сдвиг спектра, который достаточно точно оценивается корреляционным методом. Аналогичный сдвиг возникает и при температурных измерениях.

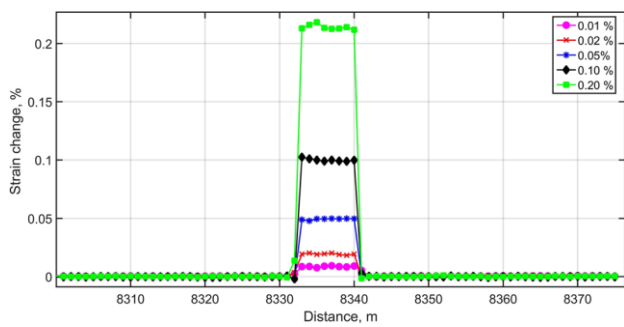


Рис. 5

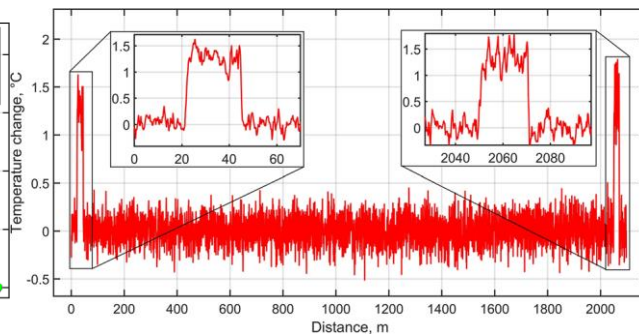


Рис. 6

На рисунке 5 показана реакция прибора, использующего рэлеевские спектры, на механическую деформацию растяжения волокна в диапазоне 0,01-0,2 %, на рисунке 6 – отклик на нагрев двух катушек на 1,2 °С.

Оценки уровня шумов дают $2 \cdot 10^{-6}$ по относительной деформации и 0,24 °С по температуре (среднеквадратичные отклонения) при времени измерения 10 минут и пространственном разрешении 1 м при длине чувствительного элемента 8 км. По нашему мнению, для ряда применений представленный способ измерений может составлять прямую конкуренцию методу, основанному на регистрации частотного сдвига бриллюэновского рассеяния. Возможно также одновременное независимое измерение температурных и механических воздействий с использованием гибридной схемы [3].

1. В.И. Бусурин, Б.Г. Горшков, Г.Б. Горшков, М.Л. Гринштейн, М.А. Таранов. Ограничение точности измерения потерь излучения в одномодовых волокнах: «вмороженные» неоднородности коэффициента обратного рэлеевского рассеяния. *Квантовая электроника*, 47, 83 (2017).
2. B.G. Gorshkov, M.A. Taranov and A.E. Alekseev. Distributed stress and temperature sensing based on Rayleigh scattering of low-coherence light. *Laser Physics*, 27, 085105 (2017).
3. Б.Г. Горшков, М.А. Таранов. Одновременное измерение деформации и температуры оптического волокна в гибридном распределенном датчике на основе регистрации рэлеевского и комбинационного рассеяний. *Квантовая электроника*, 48, 184 (2018).

ИЗМЕРЕНИЯ КРИВИЗНЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В КАБЕЛЕ МЕТОДАМИ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Бурдин В.А., Бурдин А.В., Дашков М.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара

Аннотация

В работе представлены результаты тестирования косвенных методов измерения кривизны оптического волокна в кабеле, базирующих на прямых измерениях характеристик обратного рассеяния оптическими рефлектометрами. Рассмотрены рефлектометрические методы, основанные на анализе потерь и на анализе длины биений оптического волокна на изгибах. В качестве оценки погрешности при тестировании принимали степень отклонения температурной зависимости избыточной длины волокна от линейной характеристики. Приведены данные испытаний строительной длины оптического кабеля на барабане в климатической камере, результаты измерений поляризационных характеристик обратного рассеяния оптических волокон и их характеристик обратного

рассеяния, полученных обычным оптическим рефлектометром. Рассмотрены варианты алгоритмов обработки рефлектограмм для оценивания кривизны волокна в кабеле по изменениям коэффициента затухания оптического волокна на длине кабеля. Рассмотрены алгоритмы обработки поляризационных характеристик обратного рассеяния оптического волокна для оценивания кривизны волокна в кабеле по изменениям длины биений оптического волокна. Приведены полученные при обработке измеренных характеристик обратного рассеяния температурные зависимости избыточной длины оптического волокна на строительной длине оптического кабеля. Представлен сравнительный анализ рефлектометрических методов оценивания кривизны оптического волокна в кабеле, базирующихся на измерениях распределений коэффициента затухания вдоль кабеля и на измерениях длины биений оптического волокна.

Известно, что избыточная длина оптического волокна в кабеле нередко используется в качестве комплексной оценки качества строительных длин оптического кабеля [1-4]. Распределения по длине кабеля связанных с избыточной длиной волокна величин, в частности радиусов изгиба и кривизны оптического волокна, позволяют оценивать распределения механических напряжений в волокне на изгибах и, соответственно, прогнозировать срок службы оптического кабеля при условии отсутствия внешние механических нагрузок на кабель. Для перспективных маломодовых кабельных линий, измеряя изменения кривизны оптического волокна вдоль кабеля, можно оценить распределения «кабельной» составляющей межмодовых связей. При изготовлении модулей оптических кабелей осуществляется контроль избыточной длины оптических волокон в модульной трубке и управление процессом ее наложения в целях избыточной длины волокон в заданном диапазоне. Однако при выполнении последующих операций производства оптического кабеля степень равномерности распределений кривизны оптических волокон в кабеле может быть изменена [3, 4]. Выборочный пооперационный контроль избыточной длины на отрезках модулей не дает полной картины. При этом, естественно, интерес представляют оценки избыточной длины для готового изделия – строительной длины оптического кабеля. Желательно было бы также иметь возможность оценивать избыточную длину волокна в кабеле в процессе строительства и эксплуатации кабельных линий. Причем, учитывая сказанное выше, требуется не оценка некоторого среднего значения на длине кабеля, а оценки распределений радиусов изгиба оптических волокон по длине кабеля. Это и определило актуальность рефлектометрических измерений кривизны оптического волокна в кабеле.

Известны методы оптической рефлектометрии для измерения кривизны оптического волокна в кабеле, базирующиеся на анализе изменений коэффициента затухания оптического волокна [5-8]. Согласно [9] наиболее корректные результаты были получены при использовании для учета зависимости коэффициента затухания от изгиба оптического волокна формулы Маркузе [10] и формулы Хансена [11]. Основная проблема применения данных методов связана с тем, что для получения достоверных результатов потери на изгибах оптического волокна должны быть существенны. Вместе с тем, при конструировании кабелей стремятся их минимизировать. И конечно же, эти методы не работают при использовании оптических волокон с минимизированными потерями на изгибах (рекомендации МСЭ-T G.657).

По мнению авторов, для измерения кривизны оптического волокна в кабеле более перспективны методы оптической рефлектометрии, базирующиеся на анализе поляризационных характеристик обратного рассеяния оптических волокон, учитывающем зависимость длины биений оптического волокна от радиуса изгиба [6, 12].

В представленной работе приведены результаты тестирования двух вышеуказанных способов применения методов оптической рефлектометрии для измерения кривизны оптического волокна в кабеле. В качестве оценки погрешности результатов измерений была принята степень отклонения полученной в результате измерений температурной зависимости избыточной длины волокна от линейной. В целях тестирования были выполнены климатические испытания строительной длины оптического кабеля. Кабель

модульной конструкции с 16 стандартными ступенчатыми одномодовыми оптическими волокнами типа SMF28. Длина кабеля – около 600м. Температура в климатической камере устанавливалась равной +200 °С, -300 °С, -400 °С, -500 °С, -600 °С и +700 °С. В процессе испытаний при каждой устанавливаемой в климатической камере температуре на длине волны 1550 нм измерялись характеристики обратного рассеяния с помощью обычного оптического рефлектометра (OTDR) и с помощью поляризационного оптического рефлектометра (POTDR). Полученные при обработке этих характеристик температурные зависимости избыточной длины оптического волокна на строительной длине оптического кабеля и результаты сравнительного анализа рефлектометрических методов оценивания кривизны оптического волокна в кабеле, базирующихся на измерениях распределений коэффициента затухания и длины биений оптического волокна вдоль кабеля, и представлены в данной работе.

1. Ларин Ю.Т. *Оптические кабели: методы расчета конструкций, материалы, надежность, стойкость к ионизирующему излучению.* – Москва, 2007. – 304 с.
2. Мальке, Г. and Гессинг, П. *Волоконно-оптические кабели.* – Новосибирск, 2001. – 352 с.
3. Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И. *Оптический модуль - основа волоконно-оптического кабеля - Кабели и провода, 1(272), 2002. - с.22-25.*
4. Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И. *Изменение избыточной длины в процессе изготовления ВОК - Кабели и провода, 3(274), 2002. - с.32-34.*
5. Chen H., Chen X., Yao X.S. *Distributed fiber bend and stress measurement for determining optical fiber reliability by multi-wavelength optical reflectometry - US 2014/0362367, 2014.*
6. Бурдин В.А. *Способ измерения избыточной длины оптического волокна в оптическом модуле оптического кабеля в процессе климатических испытаний - RU2562141, 2015.*
7. Бурдин В.А. *Способ измерения распределения избыточной длины оптического волокна в модуле оптического кабеля - RU 2624796, 2017.*
8. Бурдин В.А. *Способ измерения распределения избыточной длины оптического волокна в модульной трубке оптического кабеля - RU 2644032, 2018.*
9. Бурдин В.А., Бурдин А.В. *Рефлектометрические методы измерений распределений избыточной длины оптических волокон в модульных трубках кабеля - Фотоника, 4 (64), 2017. - с.96-105.*
10. Marcuse, D. *Curvature loss formula for optical fibers - Journal of the Optical Society of America, 66(3), 1976 - pp.216-220.*
11. Hanson E.G. *Origin of temperature dependence of attenuation in optical cables - OFC 1979, TuE5.*
12. Burdin V.A. *The method for a measurement of the excess fiber length on the cable delivery length by using the polarization reflectometry - SPIE Proceedings, v. 10342, 2017. - p.p.10342-1E-8E.*

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА – БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ «PANDA»

Богачков И.В.

Омский государственный технический университет, Омск

Аннотация

В работе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах, сохраняющих состояние поляризации. Проанализированы экспериментальные данные для разновидностей

таких волокон вида «Panda». Приведены рефлектограммы, полученные с помощью бриллюэновского рефлектометра. Анализ результатов экспериментов выявил существенные отличия зависимостей, характерных для оптического волокна с сохранением состояния поляризации от аналогичных зависимостей других разновидностей оптических волокон. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9334.2017/8.9).

Важной задачей ранней диагностики оптических волокон (ОВ) является получение достоверной информации об их физическом состоянии [1 – 3]. Своевременное обнаружение «проблемного» участка ОВ (с повышенным натяжением, изменённой температурой и т. п.) позволяет принять необходимые меры по устранению потенциальной неисправности до разрушения ОВ.

ОВ, сохраняющие состояние поляризации («Panda», «Bow-tie»), нашло применение в случаях, когда необходим контроль состояния поляризации, например, в когерентных коммуникационных системах, в волоконных гироскопах и интерферометрических датчиках.

Одной из разновидностей волокон с сохранением состояния поляризации является ОВ «Panda», которое сохраняет состояние поляризации введенного в него излучения за счет значительного двулучепреломления. Это двулучепреломление получается из-за анизотропии напряжений, обусловленной структурой ОВ, за счёт введения в заготовку цилиндрических нагружающих элементов из боросиликатного или германосиликатного стекол с двух сторон от сердцевинки симметрично вдоль всей длины ОВ [1 – 3].

В основу метода бриллюэновской рефлектометрии положен анализ спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (СРМБ) в ОВ. Анализируя положение максимумов СРМБ (f_B – бриллюэновский сдвиг частоты) в ОВ, можно определить характеристики натяжения вдоль ОВ [1]. Поскольку ОВ «Panda» могут иметь существенные различия в поведении характеристик СРМБ, представляет особый интерес исследование этих характеристик при различных уровнях мощности вводимого сигнала и изменениях температуры.

С целью изучения особенностей СРМБ в ОВ «Panda» были проведены экспериментальные исследования с бриллюэновским рефлектометром (BOTDR) «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

Диаметр оболочки исследуемых ОВ «Panda» составляет 80.5 мкм, диаметр сердцевинки ОВ – 6.4 мкм, диаметр стержня – 17.2 мкм [1 – 3].

В первом эксперименте был исследован СРМБ в световоде, который был составлен из ОВ нормализующей катушки (G.652), соединённого сваркой с ОВ «Panda» (диаметр 80 мкм, $B = 6.5$) и ОВ «Panda» (диаметр 80 мкм, $B = 7.5$), где B – параметр, характеризующий уровень модового двулучепреломления.

На рисунке 1 представлена 3D-BOTDR рефлектограмма, показывающая распределение СРМБ вдоль световода при комнатной температуре (+25 °C) при отсутствии натяжения.

Места стыков ОВ (сварных соединений) на рисунке 1 хорошо заметны по резкому изменению СРМБ. Падение амплитуды в месте стыка ОВ «Panda» связано с поляризационными потерями из-за рассогласования ориентации осей волокон [3].

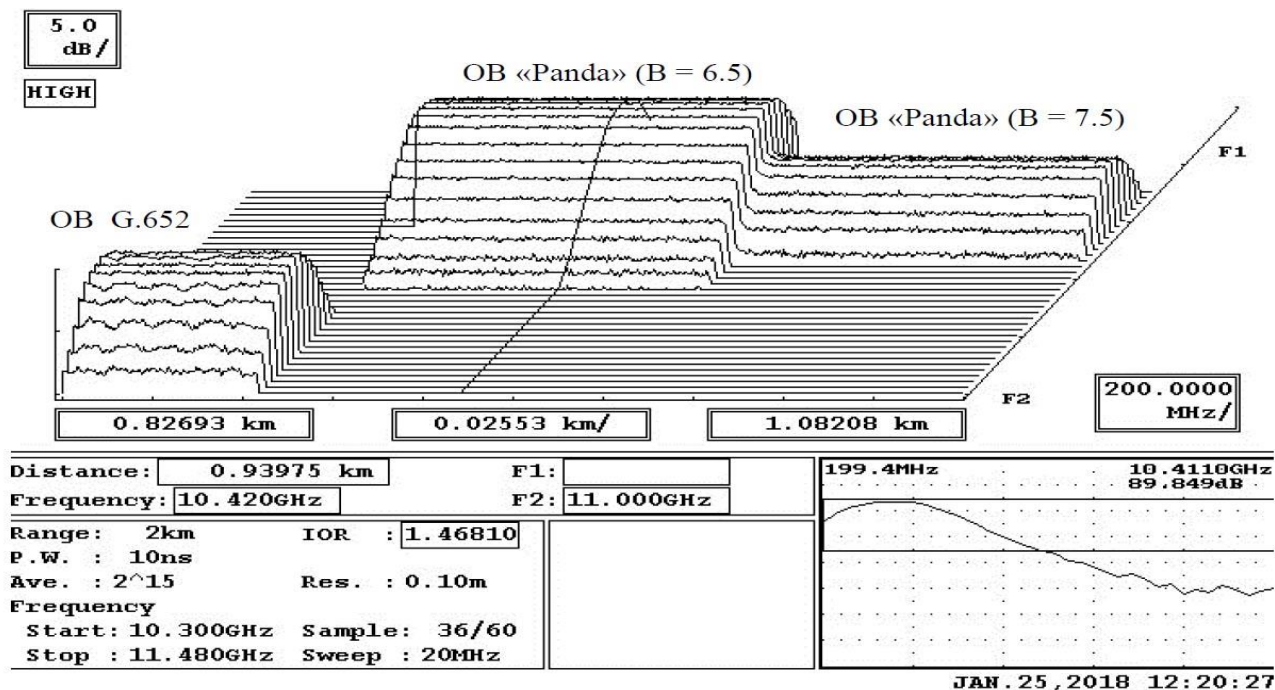


Рис. 1. 3D-BOTDR-рефлектограмма световода, содержащего два ОБ «Panda»

На рисунке 2 приведена мульти-рефлектограмма (зависимости по длине световода натяжения (Strain), профиля СРМБ, ширины СРМБ (B.S.W) и потерь (Loss)), соответствующая 3D-BOTDR рефлектограмме, показанной на рисунке 1.

Как видно из рис. 1 и рис. 2, СРМБ у ОБ «Panda» имеет единственный «пик» (максимум, f_B), который наблюдается на частоте 10.411 ГГц у ОБ «Panda» с $B = 6.5$ и 10.424 ГГц у ОБ «Panda» с $B = 7.5$, при этом у ОБ-G.652 $f_B = 10.86$ ГГц.

Соответственно натяжение ОБ «Panda» составило в среднем -0.86% ($B = 6.5$) и -0.83% ($B = 7.5$), в то время как натяжение ОБ-G.652 составило в среднем 0.03% (при вычислении натяжения за начальный уровень f_{B0} принимается значение для ОБ-G.652).

В следующих экспериментах использовался аналогичный световод. Некоторые участки ОБ «Panda» помещались в камеру нагрева или камеру охлаждения [1 – 2].

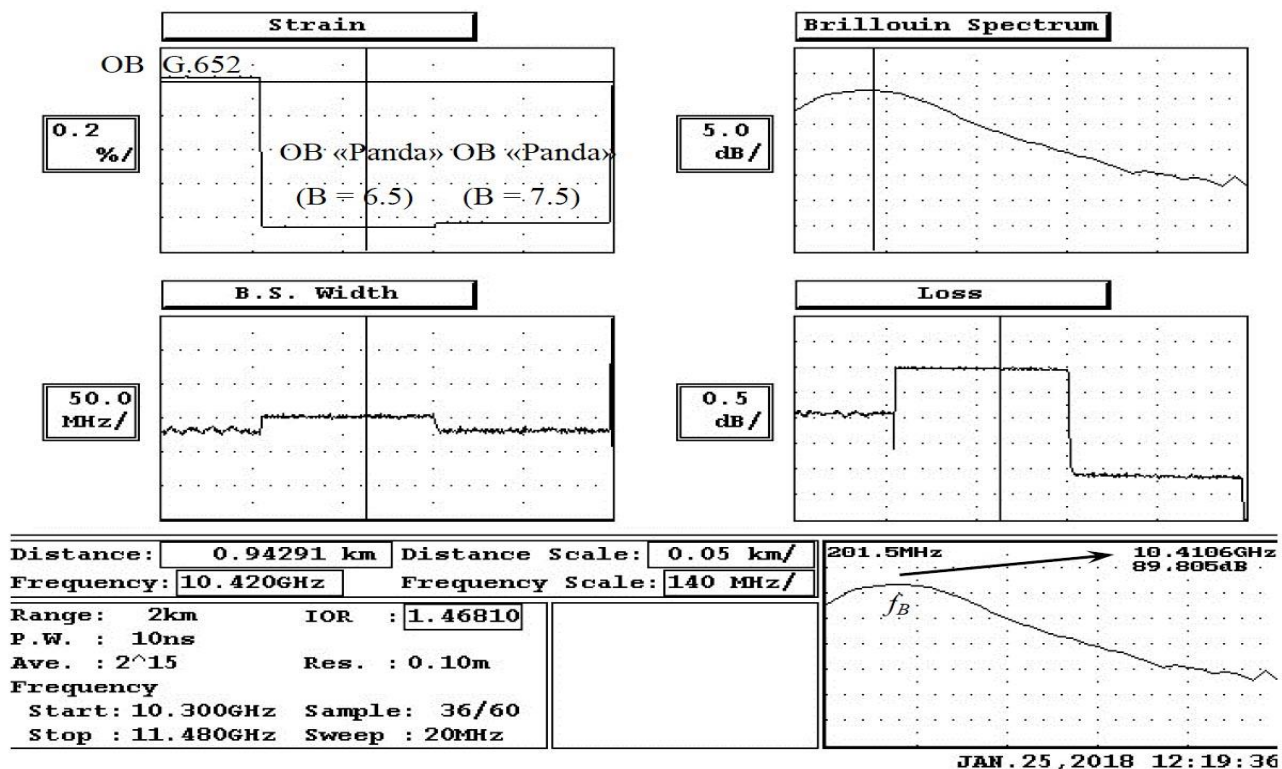


Рис.2. Мульти-рефлектограмма световода, содержащего два ОБ «Panda»

При изменении температуры от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+140\text{ }^{\circ}\text{C}$ в экспериментальных исследованиях бриллюэновский сдвиг частоты (f_B) для ОБ «Panda» изменился с 10.39 ГГц до 10.53 ГГц, при этом натяжение ОБ «Panda» изменилось от $-0.91\text{ }\%$ до $-0.64\text{ }\%$ (при вычислении натяжения за начальный уровень f_{B0} принимается значение для ОБ-G.652).

Как следует из экспериментов, у ОБ «Panda» температурные зависимости натяжения и f_B проходят ниже соответствующих характеристик всех других разновидностей ОБ [1 – 3].

Также были проведены эксперименты при повороте участка ОБ «Panda» на определённый угол относительно другого участка такого же ОБ.

Как и следовало ожидать, наблюдалось падение амплитуды сигнала из-за поляризационных потерь.

Полученные результаты экспериментов выявили существенные отличия зависимостей в поведении СРМБ и натяжения в ОБ «Panda». Общие тенденции в изменениях СРМБ и натяжения в ОБ «Panda» в зависимости от температуры имеют определённое подобие с другими распространёнными разновидностями оптических волокон [1 – 3].

1. Богачков И. В. Исследования спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в оптическом волокне «Panda» // Современные проблемы телекоммуникаций: Мат. Рос. науч.-техн. конф. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2017. – С. 180 – 185.
2. Богачков И. В. Изучение особенностей рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в специализированных оптических волокнах / И. В. Богачков // Сб. тр. VII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 344 – 345.
3. Богачков И. В., Трухина А. И., Компанеев О. Е. Экспериментальные исследования особенностей рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в оптическом волокне «Panda» // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – М.: Медиа Паблицер, 2017. – Том 8. – №2. – С. 23 – 25.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В КАНАЛАХ ПАССИВНЫХ СЕТЯХ ДОСТУПА

¹Богачков И.В., ²Горлов Н.И., ²Токарева И.А.

¹Омский государственный технический университет, Омск

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Новосибирск

Аннотация

В работе приведены тестируемые параметры каналов пассивных сетей доступа и проанализированы особенности их измерения методом оптической импульсной рефлектометрии, а также сформулированы основные технические требования к оптическим рефлектометрам.

Построение современной оптической сети невозможно без высокого качества ее тестирования. Оно позволяет подтвердить основные параметры, обеспечивающие качество передачи информации, а при необходимости – помочь инсталлятору определить характер и место повреждения. В пассивных оптических сетях измерения связаны с достаточно большими затратами времени и средств. Поэтому измерительные приборы должны быть тщательно подобраны с учетом особенностей именно таких сетей, а этапы и методы измерений должны соответствовать международным стандартам для пассивных сетей доступа [1].

На всех этапах строительства и эксплуатации пассивных сетей доступа основными средствами измерений являются оптические рефлектометры обратного рассеяния (OTDR-Optical Time Domain Reflectometer), реализующие метод оптической рефлектометрии. Рефлектометром имеет смысл тестировать сегменты только с пассивными и двунаправленными сплиттерами. Применение OTDR возможно только в специально предусмотренных случаях, когда и в оборудовании, и в рефлектометре используются надежные фильтры и строгое деление по используемым длинам волн.

Если выполнять измерение из центрального узла, то придется по очереди отключать сегменты после сплиттера, т.е. тестировать за один раз только одну протяженную линию. В противном случае, различить множественные отражения и распределить их по разным линиям будет невозможно. Обычно тестирование рефлектометром проводится со стороны абонента в сторону центрального узла. Но определенные сложности возможны при любой конфигурации, их нужно учитывать. Не всякий рефлектометр имеет настройки для различных длин волн. В пассивных одномодовых оптических сетях помимо привычных 1310 нм и 1550 нм может использоваться и промежуточный диапазон, например, 1490 нм. В некоторых случаях для диагностических целей предлагают использовать длины волн 1625 нм. При этом активное оборудование, установленное в линии, должно без вреда выдерживать такие зондирующие сигналы и не выходить из строя при их получении в любой момент эксплуатации.

Сплиттер делит оптический сигнал на большое количество абонентов-получателей. Он может делиться с погрешностью порядка 1%. К тому же сплиттеры каскадируются и делят сигнал на еще большее количество получателей. Неизбежно возникает вопрос точности и чувствительности рефлектометров при слабых обратных отражениях. В общем случае OTDR должны заведомо мощными и чувствительными устройствами с высокой разрешающей способностью. Недостаток мощности сказывается при тестировании рефлектометром через сплиттер с любого конца в любую сторону, поскольку рефлектометру нужно, чтобы излучение проходило в обоих направлениях. Если хотя бы с одним направлением будут проблемы, тестирование не даст нужной информации. То же касается множественных отражений, если линии не отсоединять. В этой связи необходима высокая пространственная разрешающая способность OTDR.

В любом случае целесообразно проводить измерения отдельно до сплиттера и после него по участкам и сегментам. В этом становится возможным при сдаче-приёмке паспортизировать отдельные фиксированные сегментов. В этом случае подойдет любой из качественных рефлектометров, и без проблем можно снять рефлектограмму.

В отличие от метода светопропускания, который измеряет общее затухание всей линии, метод оптической рефлектометрии позволяет измерить распределение потерь вдоль линии. Каждое событие в линии (оптический компонент или неисправность) вызывает либо отражение, либо затухание, либо то и другое. Рефлектометр снимает характеристику через определенные промежутки времени, определяя расстояние до каждого события [2]. Он может определять дефекты сварки, неисправности в коннекторах, обрывы волокна и макроизгибы, а также позволяет измерить дискретную составляющую потерь на отражение. Известно, что макроизгибы вносят большее затухание на большей длине волны. Поэтому они могут быть легко определены, если сравнивать потери на трех длинах волн. Лучше всего определяются макроизгибы на длине волны 1625 нм.

Для измерения параметров и поиска неисправностей в PON рефлектометр должен иметь три длины волны (1310, 1490 и 1550 нм), короткий импульс и большой динамический диапазон. При выборе рефлектометра следует также обратить внимание на конструкцию, простоту использования, возможность управления от компьютера и наличие встроенного визуального локализатора повреждений [3].

1. МСЭ-Т G.983.1 Оптические системы широкополосного доступа, базирующиеся на пассивной оптической сети (PON).
2. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон.-М.: ЛЕСАРарт, 2005. - 208с., ил.
3. Зуев И. Измерение параметров пассивных оптических сетей //Первая милья. - 2008. - С.28-30.

РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И НАПРЯЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПО СПЕКТРАМ РАССЕЯНИЯ РЭЛЕЯ. ОГРАНИЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗА СЧЁТ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ

¹Горшков Б.Г., ²Таранов М.А.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

²Общество с ограниченной ответственностью «ПетроФайбер», Тульская обл.,
Новомосковск

Аннотация

В работе представлена схема нового устройства для измерения температурных изменений и изменений деформации оптического волокна, в основу работы которого заложена корреляционная обработка спектров рассеяния Рэля. Устройство представляет собой рэлеевский рефлектометр, отличительной особенностью которого является использование частично-когерентного зондирующего излучения с перестраиваемой длиной волны, что обеспечивает удовлетворительную чувствительность в относительно широком динамическом диапазоне, делая предложенную схему перспективной для структурного мониторинга ряда промышленных объектов. В состав устройства входит источник широкополосного импульсного оптического излучения и перестраиваемый спектральный фильтр на основе микроэлектромеханической системы (МЭМС) с электронным управлением. Посредством данного фильтра осуществляется перестройка длины волны зондирующего излучения. В ходе экспериментов были получены следующие результаты, характеризующие разрешающую способность устройства: при пространственном

разрешении около 1 м и общем времени накопления сигнала 10 мин наибольшие среднеквадратические отклонения (СКО) измерительных шумов составили 0,13 °C (эквивалентно 1,2 мкм · м⁻¹ или 1,2 мε) и 0,24 °C (2,2 мε) при длине исследуемого волокна 2 км и 8 км соответственно. В эксперименте по измерению натяжения продемонстрирован динамический диапазон 2000 мε при СКО измерительных шумов около 2 мε. Опытным путём установлено существование ограничения измерительных характеристик устройства. Установлено, что данное ограничение обусловлено нелинейным уширением спектра зондирующего сигнала. Предложено и опробовано решение по преодолению этого ограничения.

Распределённые датчики температуры и механических напряжений востребованы в мониторинге промышленных сооружений, например, мостов, трубопроводов, тоннелей и других объектов. Основные способы измерения температурных и механических воздействий на волокно базируются на использовании мандельштам-бриллюэновского и рэлеевского рассеяний [1, 2, 3]. Системы на основе рассеяния Мандельштама-Бриллюэна позволяют измерять абсолютные значения напряжений и температуры, в то время как системы на основе рэлеевского рассеяния допускают измерение только изменений данных величин во времени. Тем не менее, для некоторых задач это является скорее преимуществом, чем недостатком.

Ранее нами было предложено устройство [4], представляющее собой датчик изменения температуры и натяжения (рис. 1). Его ключевыми компонентами являются широкополосный источник зондирующего излучения – суперлюминесцентный диод Superlum SLD-761, работающий в С-диапазоне длин волн – и узкополосный перестраиваемый фильтр DiCon Fiberoptics MTF500B с шириной полосы 0,17 нм на основе микроэлектромеханической системы (МЭМС) с электронным управлением. Исследуемое волокно (Corning SMF-28) подключено к центральному плечу циркулятора. Принцип действия заключается в определении величины взаимного смещения спектров рассеяния Рэля, зарегистрированных в результате перестройки рабочей длины волны фильтра в полосе 1555 – 1561 нм с шагом 0,05 нм, и расчёте соответствующих данному смещению температурных изменений и изменений натяжения в каждом канале дальности. Величины взаимных смещений спектров определяются при помощи корреляционного анализа (рис. 2).

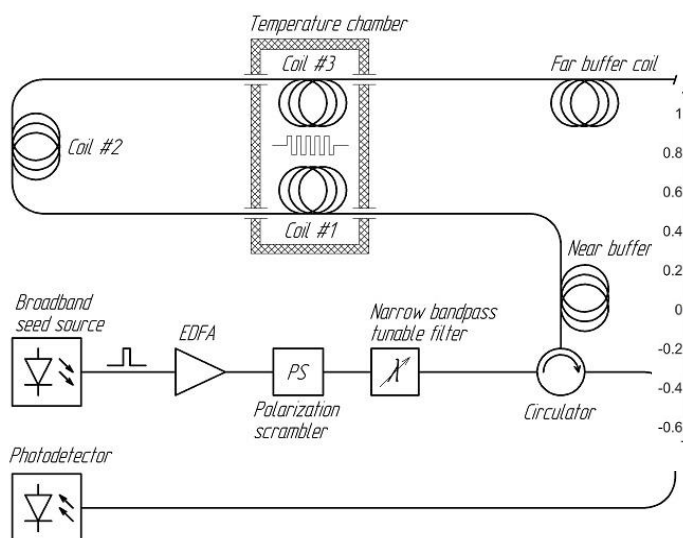


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Broadband seed source – широкополосный источник зондирующего излучения; EDFA – усилитель на основе волокна, легированного эрбием; Polarization scrambler – поляризационный скремблер;

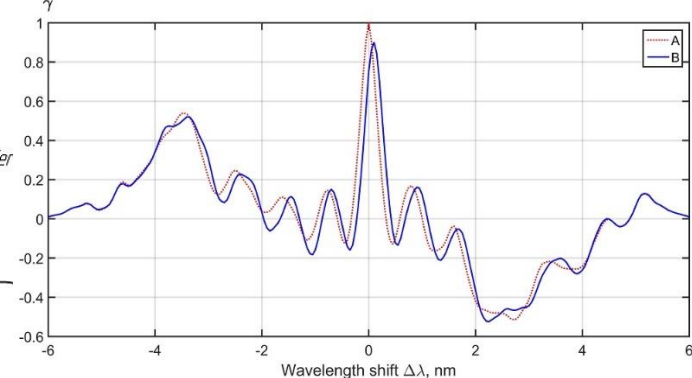


Рис. 2. Типовой вид авто- (А) и взаимно- (В) корреляционной функций от спектров рассеяния Рэля для одного и того же канала дальности исследуемого волокна. Сдвиг центрального максимума взаимнокорреляционной функции

Narrow bandpass tunable filter – узкополосный относительно нуля равен искомому перестраиваемый фильтр; *Circulator* – смещению соответствующих спектров. В циркулятор; *Photodetector* – фотоприёмник; данном случае смещение обусловлено *Near buffer coil* – ближняя буферная натяжением волокна величиной 100 μe катушка; *Coil #1, #2, #3* – измерительные катушки; *Temperature chamber* – термокамера; *Far buffer coil* – дальняя буферная катушка

При пространственном разрешении около 1 м и общем времени накопления сигнала 10 мин наибольшие среднеквадратические отклонения (СКО) измерительных шумов составили 0,13 °C (эквивалентно 1,2 $\mu\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$ или 1,2 μe) и 0,24 °C (2,2 μe) при длине исследуемого волокна 2 км и 8 км соответственно. В эксперименте по измерению натяжения продемонстрирован динамический диапазон 2000 μe при СКО измерительных шумов около 2 μe .

Указанные характеристики получены при достижении порога нелинейных эффектов в исследуемом волокне. Дальнейшее увеличение мощности зондирующего сигнала приводит к уширению его спектра по мере распространения в волокне, что, в свою очередь, влечёт уменьшение контраста регистрируемых спектров рассеяния Рэлея [4], приводящее к падению амплитуды взаимнокорреляционной функции с её расширением и тем самым обуславливающее ухудшение измерительных характеристик. Уширение спектра зондирующего сигнала было исследовано нами экспериментально (рис. 3) при помощи схемы, в которой он вводился в волокно через постоянный узкополосный фильтр, а излучение обратного рассеяния проходило через перестраиваемый фильтр непосредственно перед тем, как попасть на фотоприёмник. Наблюдавшееся уширение находит теоретическое обоснование как результат 4-волнового смещения [5].

Влияние уширения спектра зондирующего сигнала на измерительные характеристики может быть преодолено за счёт модификации базовой схемы (рис. 1). Введение в неё второго перестраиваемого фильтра непосредственно перед фотоприёмником позволит селективировать излучение обратного рассеяния в узкой полосе, что обеспечит достаточно высокий контраст спектров даже в случае существенного превышения порога нелинейности. На рис. 4 представлены результаты измерения натяжения устройством, построенным по модифицированной схеме. Мощность зондирующего сигнала в 70 раз превышала пороговую (около 66 мВт), что позволило проводить измерения в волокне длиной 25 км при приемлемом уровне измерительных шумов. Дальнейшее увеличение мощности не привело к существенному улучшению характеристик, что связано с вынужденным комбинационным (Рамана) рассеянием. Тем не менее, полученные характеристики позволяют сделать вывод о перспективности датчиков данного типа для мониторинга промышленных объектов.

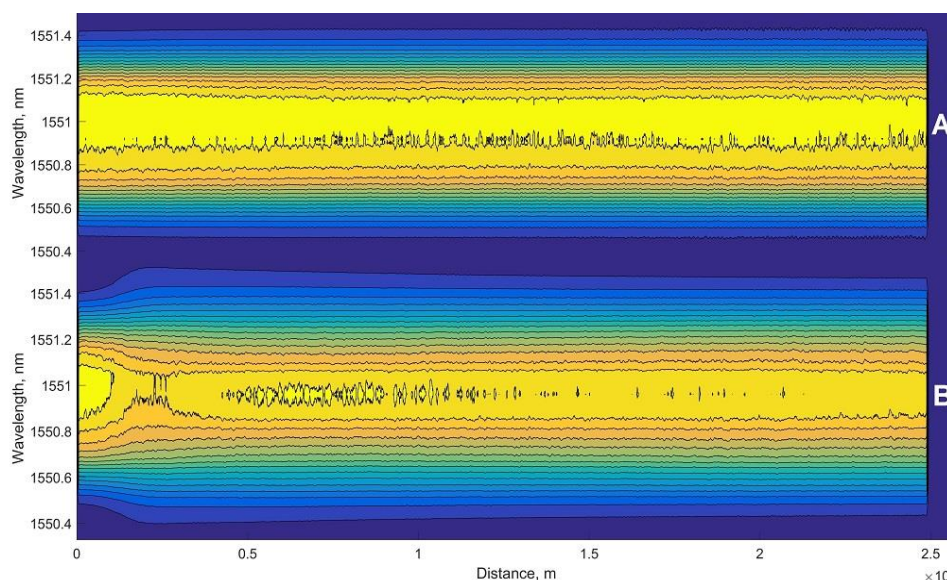


Рис. 3. Скорректированные на потери спектры мощности обратно рассеянного излучения в случае пороговой (А) и превосходящей её в 4 раза (В) мощностей зондирующего сигнала. При существенном превышении пороговой мощности обогащение спектра зондирующего сигнала становится заметно выраженным

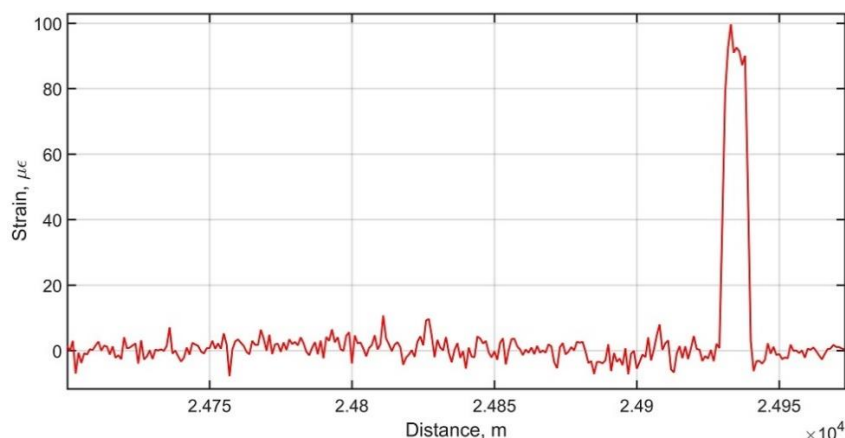


Рис. 4. Измеренное изменение натяжения оптического волокна длиной около 25 км при помощи устройства на основе двух согласованных перестраиваемых фильтров. СКО измерительных шумов в конечном участке волокна составляет 3,2 $\mu\epsilon$. Натяжение сегмента длиной 9 метров составляло 90 $\mu\epsilon$

1. Kishida K, Yamauchi Y and Guzik A 2014 Study of Optical Fibers Strain-Temperature Sensitivities Using Hybrid Brillouin-Rayleigh System Photonic Sensors 4 1–11
2. Froggatt M and Moore J 1998 High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter Appl. Opt. 37 1735–40
3. Koyamada Y, Imahama M, Kubota K and Hogari K 2009 Fiber-Optic Distributed Strain and Temperature Sensing With Very High Measurand Resolution Over Long Range Using Coherent OTDR J. Lightwave Technol. 27 1142–6
4. Gorshkov B.G., Taranov M.A. and Alekseev A.E. 2017 Distributed stress and temperature sensing based on Rayleigh scattering of low-coherence light Laser Phys. 27 085105
5. Daniel B S Soh, Jeffrey P Koplow, Sean W Moore, Kevin L Schroder, and Wen L Hsu 2010 The effect of dispersion on spectral broadening of incoherent continuous-wave light in optical fibers Opt. Express 18 22393–405

ОДНОВРЕМЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ СПОНТАННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

¹Горшков Б.Г., ²Таранов М.А., ²Горшков Г.Б.

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, ул. Вавилова, д. 38

²ООО «Петрофайбер», Новомосковск, Тульская область

Аннотация

В работе показана возможность использования спонтанного комбинационного рассеяния света в оптическом волокне для распределенного измерения осевых механических напряжений и температуры с разделением этих воздействий. Исследованный способ основан на эффекте уменьшения интенсивности стоксовой и антистоксовой компонент комбинационного (рамановского) рассеяния света при деформации растяжения волокна. Получены значения чувствительности, представляющие интерес для практического применения.

Распределенные волоконно-оптические датчики представляют собой перспективный вариант систем мониторинга состояния объектов критической инфраструктуры (мостов, тоннелей, трубопроводов и т.д.). Речь идет преимущественно об измерении механической деформации, а также температурного распределения. Значительный прогресс в этом направлении был достигнут после обнаружения сильной зависимости частотного сдвига бриллюэновского рассеяния от деформации удлинения оптического волокна [1,2] и создания на этой основе бриллюэновских рефлектометров и анализаторов. К сожалению, одновременно обнаружилась и довольно значительная зависимость этого частотного сдвига от температуры волокна [1,3,4]. Раздельное измерение деформаций и температуры оказалось сложной задачей, а ее решение привело к появлению различных гибридных схем, как правило, не применяемых на практике.

В настоящем докладе мы продемонстрировали возможность одновременного и независимого измерения температуры и механической деформации удлинения оптического волокна с помощью простой и эффективной технологии регистрации спонтанного комбинационного рассеяния (КР) света.

Экспериментальная установка состояла из источника излучения (суперлюминесцентный диод, работающий на длине волны 1560 нм плюс эрбиевый усилитель), циркулятора, тестируемого волокна, фильтров, выделяющих стоксову и антистоксову компоненты КР, оптического переключателя и лавинного фотодиода. Рефлектограммы оцифровывались и накапливались компьютером. Тестируемое волокно Corning ClearCurve ХВ имело отрезок длиной 9 м (245 – 253 м), который подвергался дозированному натяжению, а также катушку длиной 10 м (263 – 273 м), помещенную в термокамеру. Результаты эксперимента иллюстрируются рис.1, при этом участок 245 – 253 м подвергался растяжению (0,4% относительного удлинения), а катушка 263 – 273 м нагрета до 47 °С при температуре в помещении 23 °С.

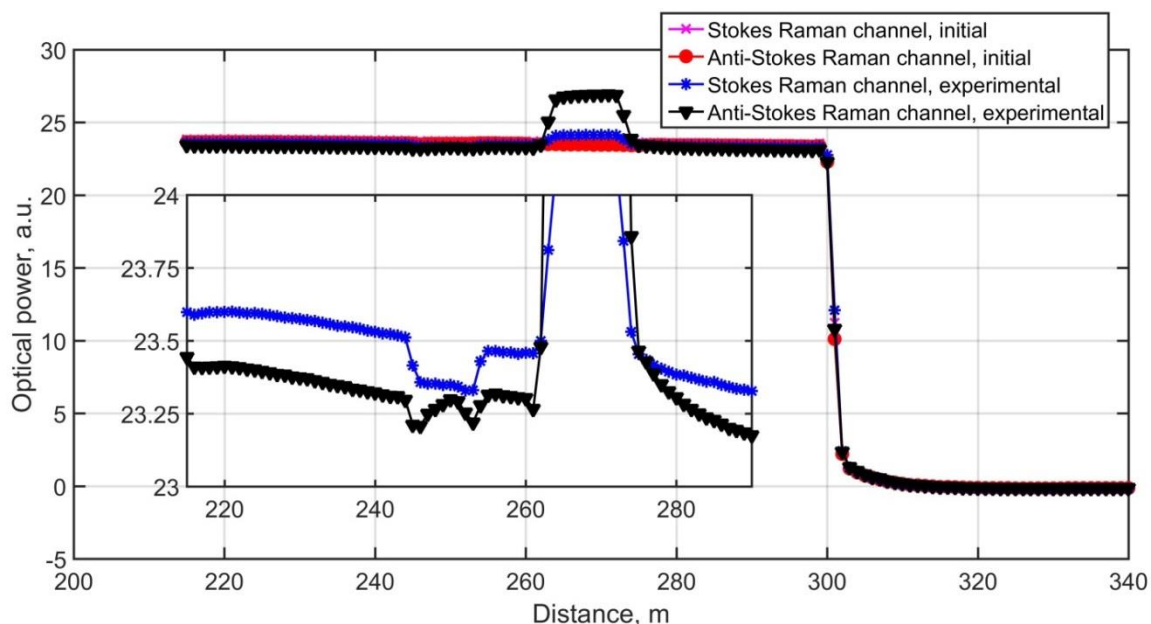


Рис. 1. Результаты исследований

Основной результат эксперимента состоит в том, что как стоксова, так и антистоксова компоненты КР при растяжении волокна испытывают уменьшение интенсивности рассеяния, это уменьшение составляет 1,6 % на 1 % относительного удлинения. При переходе от деформированного участка к недеформированному интенсивность рассеяния восстанавливается. Отношение антистоксовой и стоксовой компонент позволяет оценить абсолютную температуру волокна. Таким образом, по имеющимся данным можно восстановить как температурное распределение, так и распределение деформаций по длине волокна, что демонстрируется рис. 2 и 3 соответственно.

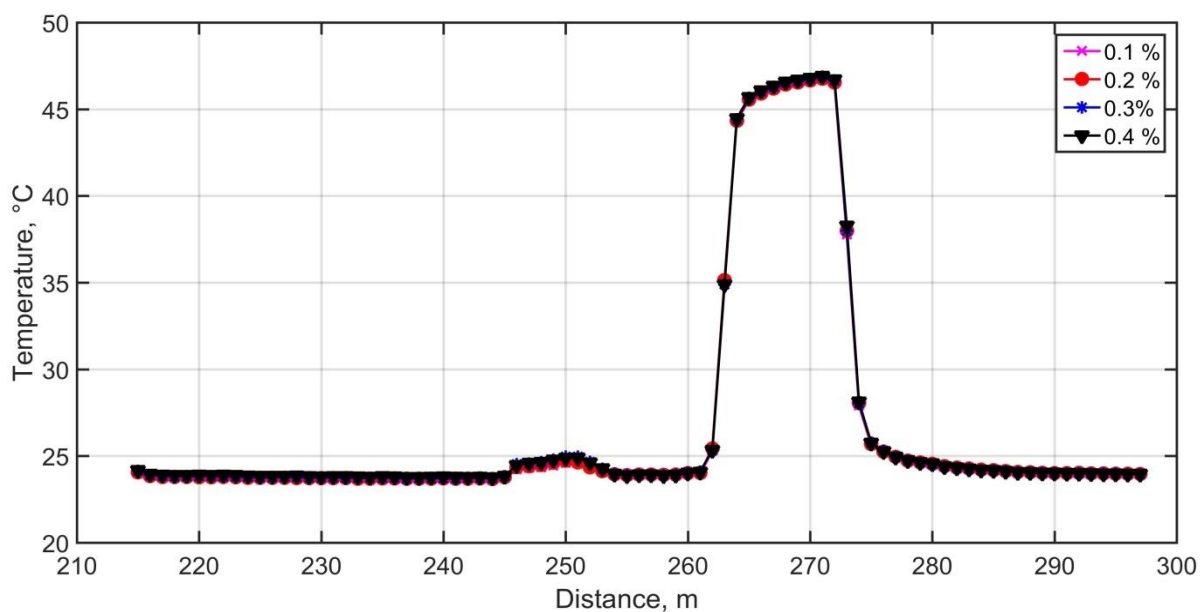


Рис. 2. Зависимость температуры от координаты

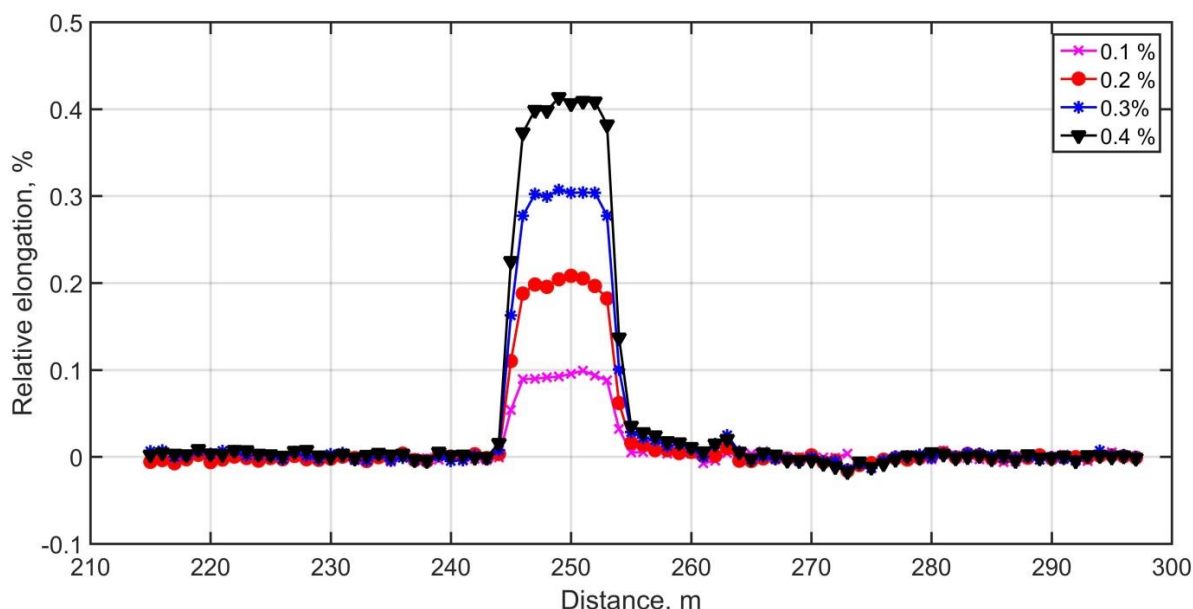


Рис. 3. Зависимость относительного удлинения от координаты

Следует отметить, что обнаруженная нами зависимость интенсивности стоксовой компоненты КР от механических напряжений не явилась неожиданностью, поскольку ранее [5] сообщалось об аналогичном эффекте. Снижение интенсивности антистоксовой компоненты при растяжении обнаружено нами впервые. Наблюдение этих эффектов в схеме рефлектометра и предложение их использования имеет наш приоритет.

Оценки уровня шумов дают $30 \cdot 10^{-6}$ по относительной деформации и $0,02^\circ\text{C}$ по температуре (среднеквадратичные отклонения) при времени измерения 600 с и пространственном разрешении 2 м. По нашему мнению, для ряда применений представленный способ измерений может составлять прямую конкуренцию методу, основанному на регистрации бриллюэновского рассеяния.

1. Горбатов И.Е., Горшков Б.Г. Исследование Мандельштам-Бриллюэновского рассеяния в плавленом кварце при нагревании и механической деформации. *Физика твердого тела*, 30, 2226 (1988).
2. Horiguchi T, Kurashima T and Tateda M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers. *IEEE Photonic. Technol. Lett.* 1, 107 (1989).
3. Culverhouse D, Farahi F, Pannell C N and Jackson D A. Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors *Electron. Lett.*, 25, 913 (1989)
4. Горшков Б.Г., Горбатов И.Е., Данилейко Ю.К., Сидорин А.В. Люминесценция, рассеяние и поглощение света в кварцевых оптических волокнах и перспективы их использования в распределенных световодных датчиках, *Квантовая электроника*, 17, 345 (1990).
5. Hibino Y, Hanafusa H, Ema K and Hyodo S. Raman study on silica optical fibers subjected to high tensile stress. *Applied Phys. Lett.*, 47, 812 (1985).

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВОЛОКОННОГО КОГЕРЕНТНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИСТОЧНИКОМ

^{1,2}Алексеев А.Э., ³Тезадов Я.А., ¹Потапов В.Т.

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Российская Федерация, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

²ООО «Петрофайбер», Российская Федерация, 105082 Москва, Спартаковская пл., 14, стр.

³ООО НТО «ИРЭ-Полус», 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1, стр. 3

Аннотация

В работе впервые производится анализ средней чувствительности когерентного рефлектометра с полупроводниковым лазерным источником к внешним фазовым воздействиям на оптическое волокно. Чувствительность такого рефлектометра может быть определена стандартным образом через среднее значение отношения сигнал/шум (ОСШ) на его выходе, которое, в свою очередь, определяется отношением среднего значения мощности полезного сигнала и среднего значения мощности шума в пространственном канале рефлектометра. Одним из основных источников шума в когерентном рефлектометре являются случайные флуктуации фазы поля источника излучения, которые преобразуются во флуктуации интенсивности обратно-рассеянного излучения. Этот шум неизбежно возникает в каждом пространственном канале рефлектометра и ограничивает снизу его чувствительность к внешним воздействиям. Уровень мощности полезного сигнала определяется степенью корреляции полей, рассеянных областями оптического волокна до и после области воздействия. Рассмотрение среднего уровня мощности шума и среднего уровня мощности полезного сигнала базируются на анализе так-называемого волоконного интерферометра рассеянного излучения (ВИРИ), который является составной частью волоконного тракта рефлектометра.

В работе рассматривается одна из основных схем когерентного рефлектометра с двойным зондирующим импульсом. ВИРИ, соответствующий этой конфигурации рефлектометра, имеет два рассеивающих участка, разделенных дополнительной линией задержки для рассеянных полей.

В работе теоретически получены и экспериментально подтверждены выражения для спектральной плотности мощности шума, полной средней мощности шума, а также средней мощности полезного сигнала на выходе когерентного рефлектометра, эти величины определяются степенью когерентности полупроводникового лазерного источника, длительностями прямоугольных импульсов, составляющих двойной зондирующий импульс, и временной задержкой между ними. На основании полученных выражений определено выражение для среднего ОСШ на выходе рефлектометра. Теоретически и экспериментально определено предельное значение мощности шума для конкретной конфигурации рефлектометра, а также амплитуда минимально детектируемого внешнего гармонического воздействия.

Когерентная фазочувствительная рефлектометрия является хорошо разработанным методом для регистрации распределенных динамических воздействий. Когерентные рефлектометры успешно применяются для мониторинга периметров протяженных объектов, охраны нефте- и газопроводов, а также в геологических исследованиях. Одной из ключевых особенностей когерентных рефлектометров является использование в этих датчиках лазерных источников с высокой степенью когерентности и стабильности, этим обеспечивается высокий контраст рефлектограммы и высокий отклик рефлектометра на внешне фазовое воздействие. Кроме того, высокая степень когерентности обеспечивает низкий уровень мощности шума на выходе рефлектометра, который возникает из-за флуктуаций фазы поля источника излучения.

В работах [1,2] впервые, по нашим сведениям, произведено рассмотрение средней чувствительности одной из основных схем когерентного рефлектометра с двойным

зондирующим импульсом [3] к внешним фазовым воздействиям, рисунок 1. Средняя чувствительность рефлектометра определялась через среднее отношение сигнал/шум (ОСШ), которое, в свою очередь, было определено через среднюю мощность шума и среднюю мощность полезного сигнала на выходе рефлектометра. Рассмотрение произведено на основании анализа волоконного интерферометра рассеянного излучения (ВИРИ), который является составной частью когерентного рефлектометра. Для схемы рефлектометра с двойным зондирующим импульсом эквивалентный ВИРИ, состоит из двух рассеивающих участков оптического волокна одинаковой длины, разделенных линией задержки, рисунок 2.

Теоретическое и экспериментальное описание ВИРИ впервые произведено в работах [4- 6]. Как и любой другой интерферометр, например, интерферометр Майкельсона, ВИРИ характеризуется определенным спектральным распределением шума на его выходе, а также определенным значением мощности полезного сигнала при фиксированном гармоническом воздействии на него. Фундаментальное отличие ВИРИ от интерферометров Майкельсона или Маха-Цандера заключается в том, что поведение ВИРИ имеет случайную природу и может быть корректно описано только статистически. Многолучевая интерференция рассеянных полей со случайными фазами и амплитудами приводит к тому, что интенсивность на выходе ВИРИ также имеет случайное значение. Для корректного описания этой интенсивности на выходе ВИРИ вводятся статистически усредненные величины, такие как средняя интенсивность излучения, средняя спектральная плотность мощности шума, средний уровень мощности полезного сигнала.

Когерентный рефлектометр, может рассматриваться как каскад ВИРИ, следующих друг за другом, последовательно занимаемых распространяющимся зондирующим импульсом. Однако, несмотря на схожесть статистических характеристик ВИРИ и когерентного рефлектометра между ними существуют существенные отличия. Во-первых, в ВИРИ используется непрерывный источник излучения, в то время как в рефлектометре излучение импульсное, во-вторых, сигнал в ВИРИ может регистрироваться непрерывно (с высокой частотой дискретизации), в то время как в рефлектометре сигнал регистрируется с частотой равной частоте посылки зондирующих импульсов. Подробные описания этих различий ВИРИ и рефлектометра и их следствия детально рассмотрены в работах [1, 2]. В работе [1] получены теоретические выражения для средней спектральной плотности мощности шума на выходе ВИРИ, а также выражение для полной средней мощности шума на выходе рефлектометра. Эти выражения подтверждены экспериментально для различных параметров ВИРИ и различных параметров зондирующих импульсов в рефлектометре.

В работе [2] получено теоретическое выражение для средней мощности полезного сигнала на выходе когерентного рефлектометра, при гармоническом воздействии на него. Это выражение также подтверждено экспериментально для различных параметров двойного зондирующего импульса. На основании полученного выражения произведена оценка амплитуды минимально возможно детектируемого гармонического воздействия.

Отметим, что чувствительность рефлектометра снижают и другие шумы, неизбежно возникающие в рефлектометре, однако эти шумы потенциально могут быть снижены. Уровень мощности шума, рассмотренный в работе, как указано выше, определяется только свойствами лазерного источника и параметрами зондирующих импульсов и является минимально возможным для данной конфигурации рефлектометра.

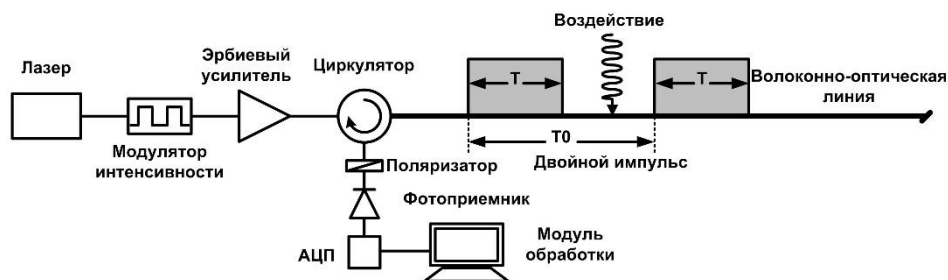


Рис. 1 Схема когерентного рефлектометра с двойным зондирующим импульсом.

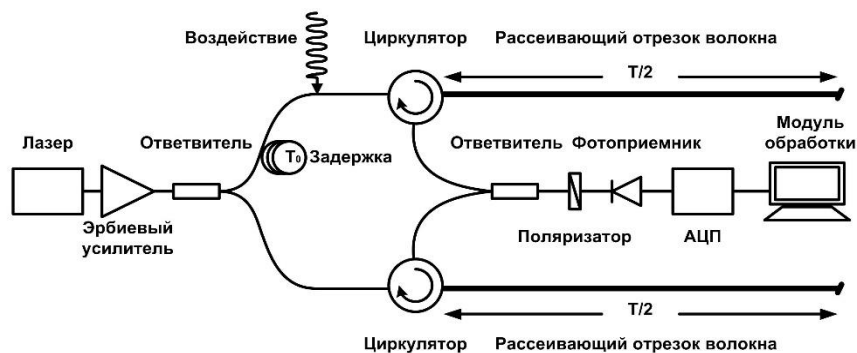


Рис. 2 Схема волоконного интерферометра рассеянного излучения (ВИРИ)

1. Alekseev A E, Tezadov Y A, Potapov V T 2017 Intensity noise limit in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer with a semiconductor laser source *Laser Phys.* 27 055101.
2. Alekseev A E, Tezadov Y A, Potapov V T 2018 Sensitivity of a phase-sensitive optical time-domain reflectometer with a semiconductor laser source *Laser Phys.* Направлена в печать
3. Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, Potapov V T, Simikin D E 2014 A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal *Laser Physics* 24 115106
4. Alekseev A E, Potapov V T 2013 Noise power spectral density of a fibre scattered-light interferometer with a semiconductor laser source *Quantum Electronics* 43 968
5. Alekseev A E, Gorshkov B G, Potapov V T 2015 Sensitivity of a fibre scattered-light interferometer to external phase perturbations in an optical fibre *Quantum Electronics* 45 965
6. Alekseev A E, Tezadov Y A, Potapov V T 2013 Detection of the external acoustic action

МЕТОДЫ КАЛИБРОВКИ OFDR РЕФЛЕКТОМЕТРОВ

Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Мороз Е.А., Погоньшев А.О., Савкин К.Б.
Тихомиров С.В.

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

Аннотация

В докладе рассмотрена принципиальная схема OFDR рефлектометра, построена математическая модель прибора. Разработан алгоритм расчета погрешности измерения расстояний и проведена количественная оценка погрешности OFDR рефлектометров. Предложены методы калибровки OFDR рефлектометров по шкале расстояний и рассмотрена аппаратура для их последующей реализации.

В настоящее время волоконно-оптические системы все чаще используются в бортовых системах связи, при мониторинге состояния летательных аппаратов, морских судов и в аналоговой фотонике. Для их диагностики используется перспективный класс оптических рефлектометров, работающих в частотной области – OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) рефлектометры, - отличительной особенностью которых является сочетание быстродействия и высокого разрешения порядка 10 мкм при измерении коротких расстояний до нескольких десятков метров.

Принцип работы OFDR рефлектометров основан на методике частотной интерферометрии [1], позволяющей получать рефлектограммы с высоким пространственным разрешением и значительным динамическим диапазоном. Преимуществом OFDR является также отсутствие мертвой зоны при измерении расстояний.

В настоящее время в России отсутствует метрологическая база, позволяющая обеспечить поверку, калибровку и испытания данного типа приборов. Кроме того, имеется ряд методических вопросов, связанных с отсутствием алгоритмов и количественных оценок по определению погрешности приборов, для которых, как правило, в спецификации указывается лишь параметр пространственного разрешения и не указываются соответствующие точностные характеристики.

В работе проведен анализ принципиальной схемы типичного прибора, в результате которого с использованием аналитических соотношений [1, 2] построена математическая модель OFDR рефлектометра, описывающая его работу. Входными данными математической модели являются искомые положения неоднородностей в тестируемом ОВ в виде временных задержек, то есть имитируется подключения к прибору тестируемого ОВ с неоднородностями, положение которых требуется определить. В разработанной математической модели интерференционный сигнал, зависящий от местоположения отражающих событий, описывается с помощью известных аналитических соотношений [1, 2], находится обратное преобразование Фурье полученного сигнала, и в результате получают искомые временные задержки, то есть определяется положение неоднородностей в тестируемом ОВ. Полученные с помощью математической модели значения абсолютной погрешности определения положения неоднородностей в тестируемом волоконно-оптическом тракте для типовых приборов составляют порядка 15 мкм при длине линии до 30 м и 30 мкм при длине линии до 70 м.

В зависимости от характеристик рассматриваемых приборов для обеспечения калибровки OFDR рефлектометров с требуемой погрешностью предложены следующие методы: калибровка газовой кюветы прибора по длине волны, интерферометрический метод, калибровка с помощью компаратора линейных перемещений, калибровка с помощью государственного первичного специального эталона ГЭТ 170-2011 [3].

Метод калибровки газовой кюветы прибора по длине волны заключается в определении длин волн пиков поглощения кюветы и оценке отличия полученных значений от опорных (эталонных), используемых прибором для вычислений длины. Данный метод применим лишь в том случае, когда имеется доступ к газовой кювете прибора и настройкам его программного обеспечения в части установки значений длин волн пиков поглощения.

Калибровка интерферометрическим методом производится с помощью образцов оптического волокна, длина которых с высокой степенью точности определяется с использованием интерферометра и перестраиваемого по длине волны лазера, а затем измеряется на калибруемом OFDR рефлектометре.

Идея метода калибровки OFDR рефлектометров с помощью компаратора линейных перемещений заключается в применении высокоточной оптической линии задержки с параметрами, определяемыми по результатам измерений перемещений интерференционным методом.

Калибровка с помощью государственного первичного специального эталона ГЭТ 170-2011 производится с помощью образцов ОВ, время задержки прохождения оптического сигнала в котором с высокой степенью точности определяется с помощью генератора временных интервалов из состава ГЭТ 170-2011, с последующим измерением их длин на калибруемом OFDR рефлектометре. Данный метод целесообразно использовать для относительно больших расстояний, порядка двух километров.

Описанные в докладе результаты проведенных исследований позволят создать новые средства обеспечения единства измерений в рефлектометрии.

1. Soller, B.J. Polarization resolved measurement of Rayleigh backscatter in fiber-optic components / B.J. Soller, M. Wolfe, M.E. Froggatt // *National Fiber Optic Engineer's Conference, OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, DC), paper NWD3 (2005)*;
2. Kreger, S.T. High-Resolution Extended Distance Distributed Fiber-Optic Sensing Using Rayleigh Backscatter / S.T. Kreger, D.K. Gifford, M.E. Froggatt, A.K. Sang, R.G. Duncan, M.S. Wolfe, B.J. Soller // *SPIE. – 2007. – V. 6530, 65301R*;

3. ГОСТ 8.585-2013. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации. – Введ. 01.01.2015. – М.: Стандарт информ, 2015. – 9 с.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИКЛИЧЕСКИХ КОДОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКАХ

¹Жуков К.М., ²Симикин Д.Е., ²Таранов М.А.

¹ООО «Лаборатория электронных и оптических устройств», Москва

²ООО «ПетроФайбер», Тульская обл., Новомосковск

Аннотация

Приведены преимущества использования кодовых последовательностей (КП) в OTDR и примеры типов КП. Рассмотрены артефакты, возникающие при использовании КП, их влияние на функционирование разных типов OTDR. Рассмотрены методы устранения артефактов обработки. Приведены экспериментальные результаты использования метода циклических симплекс-кодов в распределенных датчиках контроля изменения температуры и измерения температуры, работающих по принципу регистрации компонент рамановского рассеяния, и бриллюэновском рефлектометре.

К рабочим характеристикам распределенных волоконных датчиков можно отнести пространственное разрешение, чувствительность, динамический диапазон, отношение сигнал-шум, время измерения или реакции. Как правило, ни одну из характеристик нельзя улучшать выше некоторого порога из-за возникновения нелинейных эффектов или из-за того, что улучшение одной характеристики приведет к ухудшению другой.

Концепция кодовых последовательностей (КП) подразумевает увеличение средней излучаемой мощности за счет большего количества импульсов в единицу времени по сравнению с моноимпульсным режимом, при этом уровень шума остается на прежнем уровне (при допущении, что шум - белый), что гарантирует увеличение отношения сигнал-шум. Так как увеличивается количество импульсов, а не их длительность, используемые математические аппараты гарантируют сохранение пространственного разрешения.

Коды Голея (комплементарный коды) [1] — две биполярных последовательности, для которых верно: $A \otimes A + B \otimes B = 2L\delta(t)$, где A — первая последовательность, B — вторая, а L — длина этих последовательностей.

Уменьшение шума зависит от длины последовательности L, увеличение отношения сигнал-шум G равно:

$$G = \frac{\sqrt{L}}{4}$$

После корреляции отклика на последовательность с самой последовательностью получаются две корреляционные функции. Боковые лепестки этих функции комплементарны и при сложении обнуляются во всех точках с ненулевым смещением. Ширина получившегося пика должна соответствовать пространственному разрешению, полученному в моноимпульсном режиме. Однако корреляционным кодам свойственно ухудшение пространственного разрешения, объясняемое математикой процесса декодирования. Восстановление пространственного разрешения снижает отношение сигнал-шум на 3 дБ.

К методам кодирования, призванным исправить этот недостаток корреляционных методик, можно отнести симплекс-коды. Процесс заключается в генерации ортогональных векторов, что позволяет преобразовать декодирование в комбинацию матричных линейных операций. Было показано, что усиление достигаемое при применении этой методики составляет:

$$G = \frac{L + 1}{2 \cdot \sqrt{L}},$$

но никак не влияет на пространственное разрешение.

Отдельно стоит упомянуть циклические или квазициклические симплекс коды [2]. Ярким преимуществом по сравнению с обычными симплекс кодами является то, что процесс декодирования доступен сразу после получения отклика на одну кодовую посылку. Этот метод прост в реализации и удобен для практического использования в OTDR системах. Каждый раз посылается одна и та же последовательность (любая строка из приведенной выше матрицы). Период между КП подбирается кратным длине последовательности. Таким образом между каждым битом текущей последовательности, а также между последним и первым битом соседних последовательностей, получается одинаковая задержка. В этом случае принимаемый сигнал от раза к разу сохраняет свою форму. Это позволяет из одного отклика на КП за счет сдвигов сформировать целиком всю матрицу, необходимую для декодирования, и вычислить отклик на единичный импульс.

Одним из необходимых условий для корректного функционирования OTDR-систем с КП является равная мощность всех импульсов в последовательности. При использовании эрбиевых усилителей из-за разных промежутков между «нулями» и «единицами» импульсы усиливаются по-разному, и это приводит к появлению артефактов декодирования. Они проявляются в виде ступенчатых искажений формы рефлектограммы. Поэтому в большинстве предлагаемых схем рекомендуется использовать АОМ для формирования последовательности из равномерно усиленных импульсов. Это приводит к усложнению и удорожанию систем, необходимости использования очень мощных источников излучения (учитывая потери на модуляторе).

С практической точки зрения было полезнее проверить применимость метода при условии образования артефактов обработки. В первую очередь мы использовали КП для тех типов систем, в которых искажения формы рефлектограммы не повлекут искажения измеряемых или отслеживаемых величин.

Мы использовали КП без выравнивания мощности импульсов для системы мониторинга изменения температуры на основе регистрации антистоксовой компоненты рамановского рассеяния. Принцип работы такого датчика подразумевает слежение за относительным изменением амплитуды рефлектограммы. Как было указано, возникли артефакты - «ступеньки». Однако, так как артефакты стационарны при неизменности уровня накачки эрбиевого усилителя, на работоспособность системы они влияния не оказали. Полученное улучшение отношения сигнал-шум было незначительно ниже расчетного значения из-за колебаний мощности импульсов в пределах 10%.

Схема с циклической кодовой последовательностью без выравнивания мощности была применена для бриллюэновского рефлектометра с активным бриллюэновским фильтром [3]. В таком типе систем форма принимаемой рефлектограммы не влияет на измеряемый сдвиг линий бриллюэновского рассеяния. Применение КП позволило увеличить предельную дальность работы системы и добиться приемлемой чувствительности, при сохранении высокого пространственного разрешения и небольшого времени сканирования. Однако применительно к системам с активным бриллюэновским фильтром было обнаружено ограничение на длину КП. При большом количестве импульсов наступает ограничение пиковой мощности каждого импульса из-за возникновения вынужденного бриллюэновского рассеяния.

Также были проведены эксперименты по выравниванию мощности импульсов и по коррекции матрицы перед декодированием. Данные меры позволяют в значительной степени снизить влияние артефактов и делают возможным применение КП для систем измерения абсолютных значений температуры (DTS – distributed temperature sensor) на основе измерения мощности компонент рамановского рассеяния.

Кроме того метод КП был реализован в DTS с прямой модуляцией диодного лазера без использования каких бы то ни было усилителей. Несмотря на небольшую мощность одномодовых лазеров (порядка сотен милливатт, на порядок ниже порога возникновения нелинейных эффектов), использование последовательностей большой длины позволяет

добиться высоких точностных характеристик за приемлемое время измерения.

Имеется возможность использования КП в когерентной фазочувствительной рефлектометрии [4]. Заявлено, что при использовании DFB-источника лазерного излучения с длиной когерентности большей длительности импульса, но меньшей чем задержка между битами, получаемый отклик на последовательность также можно рассматривать как линейную суперпозицию откликов на единичные биты. Таким образом, с определенными ограничениями метод КП применим к когерентной рефлектометрии. В данном случае практическая польза заключается в возможности использования дешевых общедоступных DFB-лазеров вместо специальных узкополосных высококогерентных источников.

1. Christopher M. Bentz, Lars Baudzus and Peter M. Krummrich *Signal to Noise Ratio (SNR) Enhancement Comparison of Impulse-, Coding- and Novel Linear-Frequency-Chirp-Based Optical Time Domain Reflectometry (OTDR) for Passive Optical Network (PON) Monitoring Based on Unique Combinations of Wavelength Selective Mirrors Photonics*, 1(1), 33-46 (2014)
2. Soto M.A., Bolognini G., Di Pasquale F., Thévenaz L. *Opt. Lett.*, 35, 259 (2010)
3. G.S. Budylin, B.G. Gorshkov, G.B. Gorshkov, K.M. Zhukov, V.M. Paramonov, D.E. Simikin *Brillouin optical reflectometer with a Brillouin active filter Quantum Electronics* 47 (7) 597 – 600 (2017)
4. Yonas Muanenda, Claudio J. Oton, Stefano Faralli and Fabrizio Di Pasquale *High Performance Distributed Acoustic Sensor Using Cyclic Pulse Coding in a Direct Detection Coherent-OTDR Proc. of SPIE Vol. 9655 965547-4* (2015)

НАБЛЮДЕНИЕ «ОТРАЖАЮЩИХ СОБЫТИЙ» НА УЧАСТКАХ МИКРОИЗГИБНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОДНОМОДОВОГО СВЕТОВОДА ПРИ ПОМОЩИ СПЕЦИАЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ РЭЛЕЕВСКОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА

^{1,2}Кривошеев А.И., ^{1,2}Носова Е.А., ¹Лобач И.А., ¹Клод Д.,
¹Константинов Ю.А., ^{1,2}Барков Ф.Л.

¹Лаборатория фотоники Пермского федерального исследовательского центра
Уральского отделения РАН, Пермь

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Аннотация

Создана экспериментальная установка на основе принципов рэлеевской рефлектометрии временной области. Исследованы артефактные явления, появляющиеся на рэлеевских рефлектограммах на участках микроизгибных деформаций.

В литературе [1] описана возможность использования измерения сигнала обратного отражения, наблюдаемого в местах микроизгибов различных оптических волокон, для мониторинга приложенной нагрузки. Классический подход к описанию принципа работы рефлектометров временной области не учитывает обратного отражения [2,3,6]. Поскольку коммерческие рефлектометры обычно включают блок обработки данных по алгоритму, известному только производителям, что может повлечь за собой непредвиденное изменение получаемого сигнала, авторами для изучения данного эффекта был сконструирован рефлектометр, позволяющий получать данные в исходном виде (рис. 1). Для управления уровнем сигнала в большем диапазоне было решено ввести в схему двухкаскадный эрбиевый усилитель Amonics AEDFA-23-FA с общим коэффициентом усиления 23 дБ.

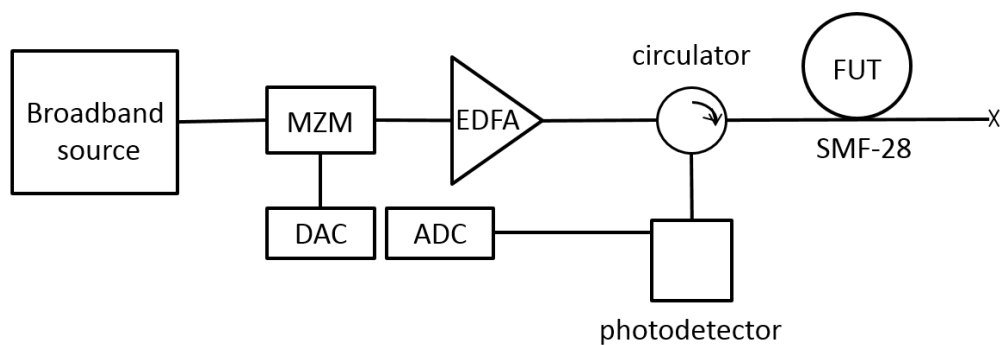


Рис. 1 Экспериментальная установка

В качестве источника излучения был использован эрбиевый широкополосный усилитель спонтанной эмиссии мощностью 40 мВт производства ПАО «ПНППК», импульсный режим был осуществлен модулятором Маха-Цандера производства этой же организации, управляемым генератором сигналов произвольной формы ГСПФ-053 (ЗАО «Руднев-Шиляев»). Направление излучения в линию производилось оптическим циркулятором, сохраняющим состояние поляризации вводимого излучения AFR 1550nm 3-Port PM Circulator (данный стенд также был предназначен для получения поляризационных рефлектограмм). Фотоприемное устройство – Thorlabs PDA-10CF-EC. В качестве аналого-цифрового преобразователя использовался коммерческий осциллограф LeCroy WaveAce 1001. Исследуемое волокно – SMF28 компании Corning (менее 1 км). Длительность зондирующих импульсов – 200 нс. Усреднение – 256 реализаций.

Световод подвергался микроизгибному воздействию, осуществляемому с силой $F_j = mgi$, равной весу набора эталонных грузиков. Здесь i – количество эталонных грузиков в наборе; j – номер эксперимента, m – масса грузика (составляла 9 г). Микроизгибное воздействие, таким образом, выглядело так (см. рис. 2).

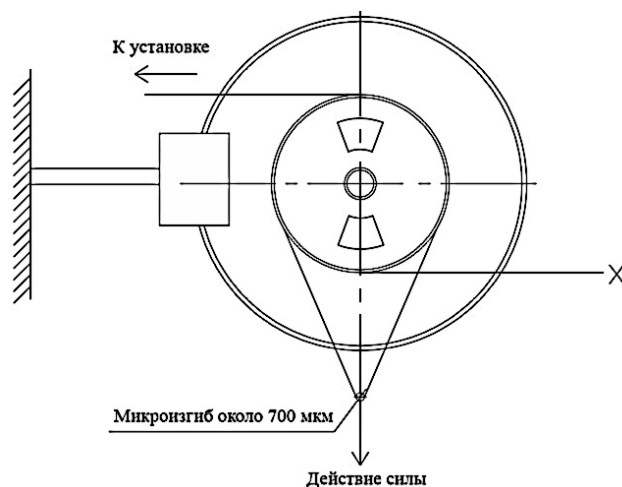


Рис. 2 Фото экспериментальной установки и схематичное изображение микроизгибного воздействия

Во время экспериментов получено в общей сложности 3 изгиба радиусом около 700 мкм, отклик рефлектограммы на которые был в качественном описании одинаков. Рефлектограммы, общий уровень которых незначительно менялся из-за инструментальной погрешности измерений, совмещены по оси ординат для наглядности (рис.3а). На рис.3б отображена зависимость мощности обратно-направленной мощности в месте микроизгиба от массы грузика. Также следует отметить, что авторами была предпринята попытка снятия зависимости уровня обратных отражений от радиуса микроизгиба (при постоянной силе воздействия). В таком эксперименте наблюдалось постепенное ослабление отражений (как и, естественно, потерь на микроизгибе) при увеличении радиуса.

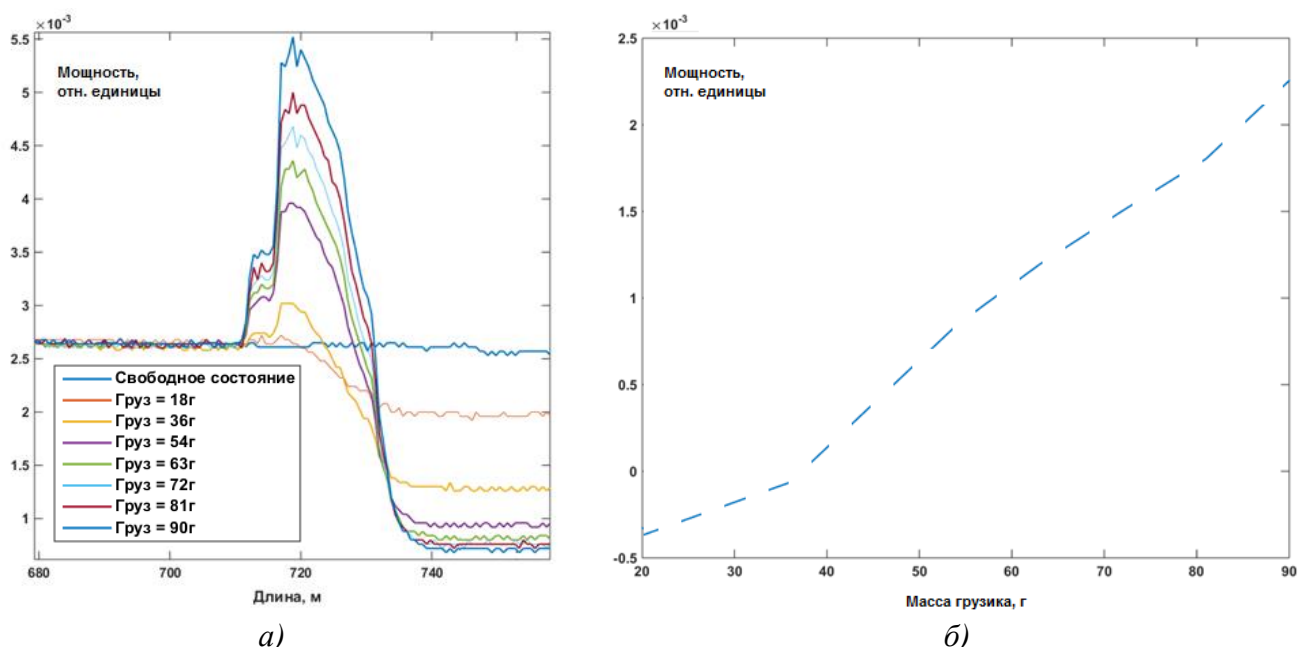


Рис. 3 Результаты эксперимента: 3а – рефлектограмма в месте микроизгибного воздействия с разными силами (цвет доступен онлайн); 3б – обратно-отраженная мощность в зависимости от массы грузиков

Несмотря на достаточно большую мощность (~ 200 мВт) излучения, введенного в сердцевину, возрастание мощности сигнала, распространяющегося в обратном направлении, не может быть связано с ВРМБ – порог по мощности не достигается ввиду широкополосности использованного источника (200 мВт приходится на весь спектр, составляющий по ширине несколько нм). Грубую оценку уровня сигнала обратного отражения можно получить из формулы Френеля: $R = (n_{i+1} - n_i)^2 (n_{i+1} + n_i)^{-2}$, где R – доля обратно-отраженной мощности, n_i и n_{i+1} – показатели преломления предыдущего и следующего фрагмента волокна, рассматриваемого в дискретном виде. Так как $n_i \approx n_{i+1} \approx 1.5$, можно положить $n_{i+1} + n_i$ равным 3, откуда получаем, что для того, чтобы обратно-отраженный сигнал стал сравнимым с обратно-рассеянным по Рэлеевскому механизму (уровень которого составляет $\sim 10^{-6}$ от входной мощности), добавка к показателю преломления за счет деформации волокна должна составлять $\sim 3 \times 10^{-3}$, что вряд ли будет достигнуто при разумных уровнях деформации. Таким образом, теоретическое объяснение наблюдаемого эффекта является предметом последующей работы. Тем не менее, уже сейчас явление может быть применено в упрощенных распределенных датчиках на основе рассеяния Рэлея. Также интерес представляет изучение влияния поляризации вводимого излучения [4,5].

Авторы благодарят ПАО «ПНППК» за предоставленные для проведения эксперимента компоненты.

1. Томышев К. А., Баган В. А., Астапенко В.А., Распределённые волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности // ТРУДЫ МФТИ. — 2012. — Том 4, №, с. 64-72.
2. D. Marcuse, Microdeformation losses of single mode fibers, Appl.Opt., vol. 23, no. 7, pp. 1082-1091, 1984.
3. Bjarklev, Microdeformation losses of single mode fibers with step-index profiles, J. Lightwave Technol., vol. LT-4, no. 3, pp.341-346, 1986.
4. Смирнов А.С., Барков Ф.Л., Бурдин В.В., Константинов Ю.А., Солдатов П.Н. Разработка метода поляризационной рефлектометрии, применимого для локализации участков изменения состояния поляризации излучения в рт волокнах // I Всероссийская научно-практическая конференция «Оптическая рефлектометрия –

- 2016» 26-27 мая 2016 г., г. Пермь. Сборник тезисов докладов. – Пермь: ООО «Печатный салон «Гармония», 2016. – с. 58-59.
5. Константинов Ю.А., Крюков И.И., Первадчук В.П., Торошин А.Ю., Поляризационная рефлектометрия анизотропных волоконных световодов, Квант.электроника, 2009, 39 (11), 1068–1070.
 6. Probst, C. B., Bjarklev, A. O., & Andreassen, S. B. (1989). Experimental verification of microbending theory using mode coupling to discrete cladding modes. *Journal of Lightwave Technology*, 7(1), 55-61. DOI:10.1109/50.17733

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОВОЛОКОННОЙ ТЕРМОМЕТРИИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Паршаков О.С., Кормщиков Д.С.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук
«Горный институт Уральского отделения Российской академии наук» – филиал
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального центра Уральского отделения Российской академии наук*

Аннотация

Наиболее универсальным и надежным способом проходки вертикальных шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях является искусственное замораживание горных пород, цель способа заключается в создании ледопородного ограждения проектных параметров вокруг запроектированной горной выработки для предотвращения проникновения в нее подземных вод. При этом в процессе искусственного замораживания породного массива предусматривается контроль за формированием и состоянием ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов, который заключается в наблюдении за температурой горных пород в контрольно-термических скважинах.

Применение оптоволоконной термометрии позволяет производить оперативный и непрерывный мониторинг распределенной температуры горных пород. Высокая точность и надежность определения температуры горных пород по глубине скважины в сочетании с аналитической обработкой и интерпретацией экспериментальных данных позволяют вывести на качественно новый уровень контроль термодинамических процессов, происходящих в породном массиве в условиях искусственного замораживания. В результате интеграция экспериментальных измерений температуры с методом решения обратной задачи расчета теплораспределения позволяют определять трехмерное распределение температуры во всем замораживаемом породном массиве, производить прогноз и разработку технических решений, направленных как на безопасность ведения горных работ, так и на повышение технико-экономических показателей строительства шахтных стволов.

В работе представлены результаты контроля формирования и состояния ледопородных ограждений строящихся горных предприятий на основе экспериментальных данных оптоволоконной термометрии скважин.

Наиболее универсальным и надежным способом проходки вертикальных шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях является искусственное замораживание горных пород, цель способа заключается в создании ледопородного ограждения проектных размеров вокруг запроектированной горной выработки для предотвращения проникновения в нее подземных вод [1, 2]. При этом в процессе искусственного замораживания породного массива предусматривается контроль за формированием и состоянием ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов, который заключается в наблюдении за температурой горных пород в контрольных скважинах. Для решение поставленной задачи в контрольно-термических скважинах размещается оптоволоконный кабель, данные с

которого обрабатываются при помощи волоконно-оптического регистратора.

Мониторинг температуры с учетом применения оптоволоконной термометрии горных пород при строительстве шахтных стволов позволяет непрерывно и оперативно производить экспериментальные измерения распределенной температуры горных пород по глубине контрольно-термических скважин с высокими пространственным разрешением (25 сантиметров) и точностью измерения (0,1 градус Цельсия).

На рисунке 1 представлена схема интеллектуальной системы мониторинга ледопородного ограждения. Особенность предложенной системы контроля заключается в том, что ее структурные элементы позволяют хранить все данные геологических и теплофизических свойств горных пород, осуществлять сбор параметров работы замораживающих станций стволов и интерпретировать результаты термометрии скважин на базе оптоволоконной технологии, в результате при помощи системы на основе обработанных экспериментальных измерений температуры породного массива в различные моменты времени, определяется температурное поле во всем замораживаемом объеме пород.

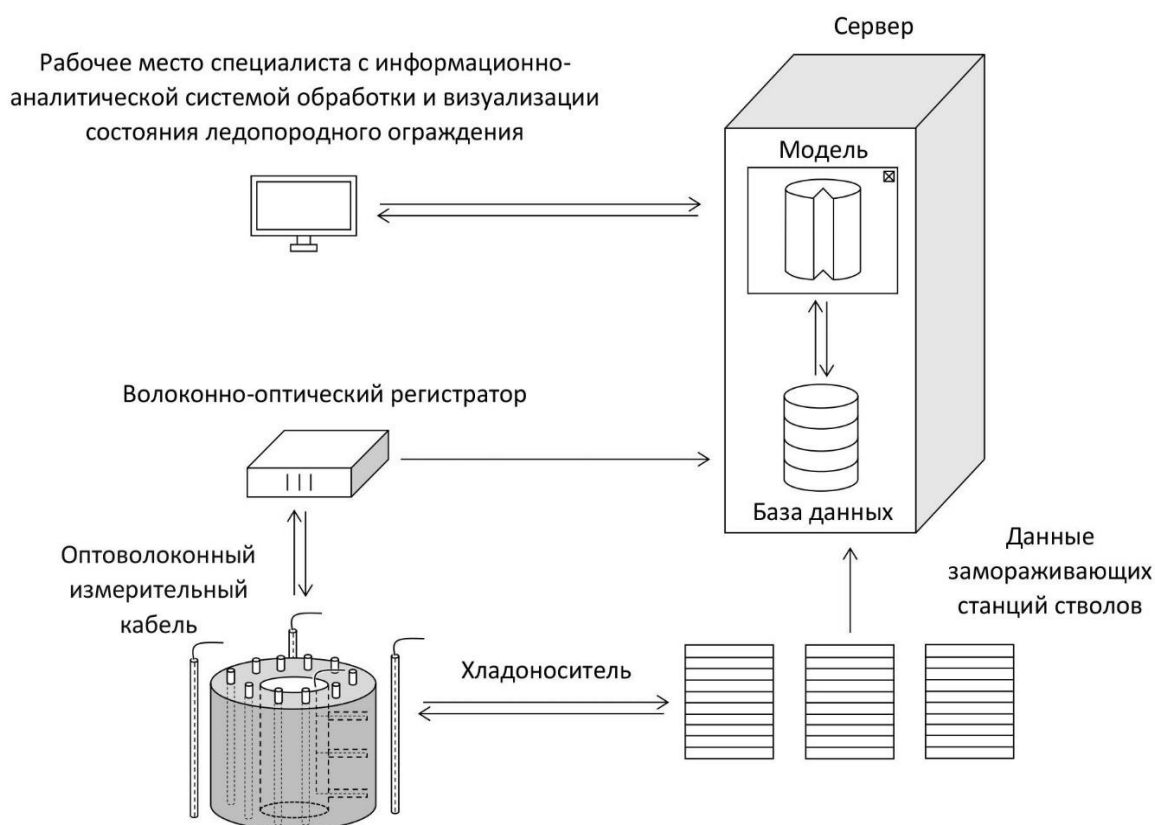


Рис. 1. Интеллектуальная система мониторинга ледопородного ограждения

Структурные элементы системы мониторинга взаимодействуют следующим образом. Данные о внутримолекулярных колебаниях решетки оптоволоконного кабеля, расположенного в скважине на всю ее глубину, вызванные тепловым воздействием в результате замораживания породного массива, обрабатываются и интерпретируются при помощи волоконно-оптического регистратора, который осуществляет сравнение спектров и интенсивности исходного лазерного излучения и излучения, рассеянного в обратном направлении (Рамановское рассеяние) определяя таким образом температуру горных пород вдоль оптического волокна. Эти данные вместе с данными о параметрах работы замораживающего комплекса — температура прямого и обратного потоков хладоносителя и расход хладоносителя, циркулирующего в замораживающих колонках, передаются на автоматизированное рабочее место специалиста, где считываются при помощи информационно-аналитической системы обработки и визуализации состояния ледопородного ограждения, которая в дальнейшем производит расчет распределения температур во всем объеме массива горных пород и последующую визуализацию

результатов расчета. При этом разработка 3D-модели термодинамических процессов, происходящих в породном массиве, осуществляется с необходимой детальностью на основании проекта на проходку ствола и данных инженерно-геологических изысканий.

Для расчета распределения температур во всем замораживаемом породном массиве используется метод решения обратной задачи расчета теплораспределения, который за счет дополнительных сведений о распространении теплоты в породном массиве уточняет решение прямой задачи теплораспределения. Метод решения задачи сводится к минимизации функционала рассогласований между модельными и измеренными температурами в термометрических скважинах.

Функциональные возможности разработанной системы мониторинга позволяют вывести на качественно новый уровень контроль процессов формирования и состояния ледопородных ограждений строящихся шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях, обеспечивающий безопасность ведения горных работ.

Таким образом, точное и надежное измерительное оборудование в сочетании с аналитической обработкой и интерпретацией экспериментальных данных, получаемых в процессе выполнения оперативного и непрерывного мониторинга формирования и состояния ледопородных ограждений шахтных стволов, позволяют определять трехмерное распределение температуры во всем замораживаемом породном массиве, а также при помощи математической модели термодинамических процессов, происходящих в породном массиве, производить прогноз и разработку технических решений, направленных как на безопасность ведения горных работ, так и на повышение технико-экономических показателей строительства шахтных стволов.

1. Трупаков Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. // Углетехиздат, 1954. — 896 с.
2. Трупаков Н.Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве горных. // М., «Недра», 1974. — 281 с.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ

¹Пономарев Р.С., ¹Шевцов Д.И.

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Аннотация

В работе представлены результаты применения оптического рефлектометра частотной области для детектирования дефектов сборки интегрально-оптических схем при их серийном производстве. Показано, что применение рефлектометра Luna OBR 5T-50 позволяет на ранних этапах диагностировать дефекты, связанные с ненадлежащим качеством поверхности граней кристалла, изломами оптического волокна, царапинами на поверхности кристаллического чипа, а также с ошибками фотолитографии на сложных участках интегрально-оптической схемы. Обобщение полученных результатов позволило выработать критерии для отбраковки интегрально-оптических модуляторов фазы излучения, вызывающих ввиду наличия указанных дефектов, увеличение зоны нечувствительности волоконно-оптического гироскопа.

При производстве интегрально-оптических модуляторов фазы излучения для волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) было обнаружено, что наличие высоких обратных отражений приводит к увеличению зоны нечувствительности гироскопа и понижению его точности. Для отбраковки модуляторов на ранних этапах производства был применен высокоразрешающий OFDR-рефлектометр Luna OBR 5T-50, способный обнаружить

отражающие дефекты при длине модулятора около 40 мм.
Пример получаемой рефлектограммы приведен на рисунке.

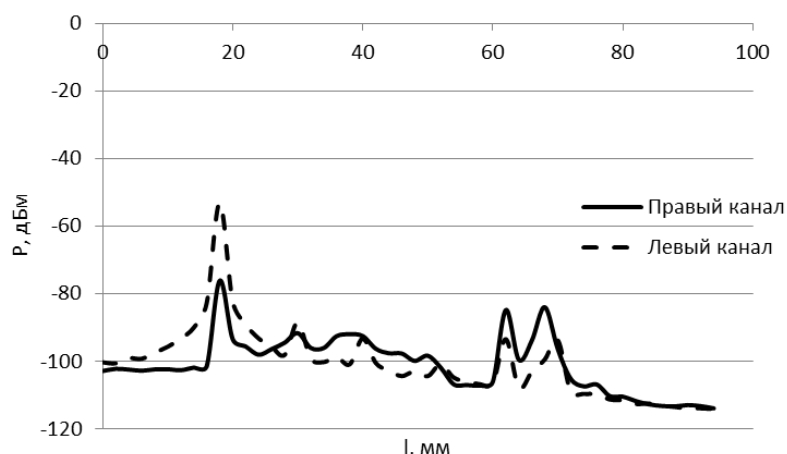


Рис.1. Рефлектограмма модулятора фазы излучения ВОГ с дефектом в левом канале

Из рисунка видно, что на левом канале Y-разветвителя имеется дефект, характеризующийся большой высотой пика отражения (выше минус 60 дБ), а также широким основанием. Статистическая обработка набора рефлектограмм для годных и отбракованных модуляторов позволила выработать критерии ранней отбраковки по показаниям рефлектометра и избавиться в первом приближении от проблемы зоны нечувствительности в ВОГ.

РАБОТЫ ВНИИОФИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Мороз Е.А., Подюкова Л.В., Савкин К.Б.,
Тихомиров С.В.

Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва

Аннотация

В докладе представлены результаты работ по обеспечению единства измерений параметров оптических рефлектометров. Описываются созданная во ВНИИОФИ эталонная база и нормативно-техническая документация. Рассматриваются результаты внедрения и применения созданных эталонов.

Одним из важных видов приборов, обеспечивающих диагностику волоконно-оптических систем передачи информации и других волоконно-оптических систем, являются оптические рефлектометры (ОР). Они позволяют измерять длину оптических волокон и кабелей (ОВ, ОК), расстояние до места неоднородности и ослабление в ОВ и ОК при производстве и эксплуатации систем и их компонентов. Во ВНИИОФИ – государственном научном метрологическом институте в области оптико-физических измерений, проводятся работы, направленные на обеспечение достоверности результатов и единства измерений указанных параметров, что необходимо для достижения высокого качества связи и передачи информации. С этой целью для решения задач метрологического обеспечения измерений параметров ОР, работающих во временной области (OTDR), разработаны Первичный и Рабочие эталоны, а также соответствующая нормативная документация.

В 2006 г. был создан и в 2011 г. усовершенствован Государственный первичный специальный эталон ГЭТ 170-2011 (ГПСЭ) и разработана межгосударственная поверочная схема ГОСТ 8.585-2013 [1], регламентирующая передачу единиц от верхнего звена – первичного эталона, – к рабочим эталонам и средствам измерений. ГПСЭ возглавляет данную поверочную схему. Воспроизведение и передача единицы длины в ГПСЭ производится путем определения значений времени задержки оптического излучения с последующим пересчетом к значениям длины. Воспроизведение и передача единицы ослабления производится путем нормирования относительных значений мощности излучения. В настоящее время с целью подтверждения характеристик первичного эталона проходят международные сличения по длине оптического волокна в рамках проекта АРМР, участниками которого являются такие страны как Республика Корея, Франция, Швейцария, Китай и др.

Созданные Рабочие эталоны, обеспечивающие поверку и калибровку ОР (OTDR), основаны на использовании активного метода [2,3] передачи единиц длины и ослабления. С этой целью в составе Рабочих эталонов применяются специальные оптические генераторы, имитирующие прохождение оптического излучения по волокну, разработанные совместно с Институтом Информационных Технологий, г. Минск. Погрешности Рабочих эталонов для одномодового режима не превышают 0,015 дБ/дБ по ослаблению и $(0,15 + 5 \cdot 10^{-6} L)$ м по длине, где L – значение длины.

К настоящему моменту ВНИИОФИ поставил более 40 рабочих эталонов для оснащения центров стандартизации и метрологии и ряда ведомственных метрологических центров.

С помощью созданных эталонов во ВНИИОФИ проведены испытания и включены в реестр более 60 типов ОР как иностранных фирм – EXFO, Agilent, Viavi, Yokogawa и др., так и отечественных – ТПК ВП, Связьприбор, Связьсервис. ВНИИОФИ также выполняет поверку и калибровку рефлектометров (более 200 приборов за 2017 г.). Для обеспечения поверки разработаны Рекомендации по методам поверки Р 50.2.071-2009 [4].

Следует отметить, что подавляющая часть поверяемых приборов сохраняет свои характеристики и успешно проходят поверку. Вместе с тем отмечаются случаи, когда погрешности при измерении длины и ослабления превышают допустимые пределы, происходят сбои в программном обеспечении и уменьшается динамический диапазон вследствие неправильного обращения с разъемами и деградации лазеров; в ряде случаев отмечается сдвиг по шкале длины, что требует пристального внимания со стороны эксплуатирующих организаций и подтверждает необходимость работ по периодическому контролю основных технических характеристик ОР.

В настоящее время с развитием высокоскоростных систем и систем PON возникает необходимость применения ОР с набором источников, работающих на большем, чем традиционно, количестве длин волн и с погрешностями, приближающимися к погрешностям Рабочих эталонов. Возникает также необходимость нормирования значений обратных потерь [3]. Все это требует постоянного совершенствования эталонной базы.

Кроме задач, связанных с метрологическим обеспечением рефлектометрии OTDR, для диагностики волоконно-оптических систем и устройств, все более широкое применение находят другие классы ОР и измерительных систем с распределенными параметрами. К ним относятся когерентные рефлектометры, рефлектометры, работающие в частотной области – OFDR, системы на основе Брюллюэновского и Рамановского рассеяния и др. Для них также существенным является нормирование расстояния до места события. При этом в ряде систем требования по точности измерений расстояний определяются значениями порядка десятков микрон. В связи с этим во ВНИИОФИ проводятся работы по испытаниям и калибровке нескольких типов распределенных волоконно-оптических систем. Начаты также работы по методам калибровки и поверки рефлектометров OFDR и когерентных ОР.

Таким образом, разработанная в настоящее время система метрологического обеспечения измерений с помощью ОР OTDR, включающая государственный первичный специальный эталон, рабочие эталоны и нормативную документацию, обеспечивает

выполнение необходимых работ по метрологическому обеспечению измерений их основных параметров.

Дальнейшие работы в данной области предполагается проводить в направлении увеличения точности эталонов, расширения спектральных диапазонов и создания эталонной базы для вновь применяемых перспективных типов ОР.

1. *ГОСТ 8.585-2013. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения для волоконно-оптических систем связи и передачи информации. – Введ. 01.01.2015. – М.: Стандарт информ, 2015. – 9 с.*
2. *В.Е. Кравцов, А.М. Лукьянов, Л.В. Подюкова, С.В.Тихомиров, Современные оптические рефлектометры: вопросы метрологического обеспечения.- Метрология и измерительная техника в связи.№2,1999. Стр.38.*
3. *IEC 61746-1 Ed. 1 OTDR Calibration OTDR for SM fibers.*
4. *ГСИ. Рекомендации по метрологии Р 50.2.071-2009. Рефлектометры оптические. Методика поверки.*

ОПТИЧЕСКИЙ РЕФЛЕКТОМЕТР ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ – СХЕМА И РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Колмогоров О.В., Щипунов А.Н., Прохоров Д.В., Донченко С.С.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Россия, г.п. Менделеево

Аннотация

Предложена схема импульсного оптического рефлектометра с пикосекундным разрешением на основе многостоповых таймеров событий. Приведены результаты теоретических расчетов границ погрешностей таких рефлектометров, представлены результаты экспериментальных исследований созданного макета рефлектометра. Показано, что предложенная схема рефлектометра и примененные технические решения позволяют обеспечить измерения задержек распространения сигнала с погрешностью не более 100 пс.

Системы сравнений и синхронизации шкал времени (ШВ) [1], использующие ВОЛС, предъявляют повышенные требования к точности определения задержек распространения сигнала в световодах (оптических волокнах, пассивных оптических элементах). В частности, погрешность измерений задержки не должна превышать ± 100 пс, а для систем, передающих сигналы по нескольким волокнам, погрешность определения разности задержек в волокнах не должна превышать ± 20 пс.

Рефлектометры во временной области, используемые для контроля телекоммуникационных ВОЛС, не позволяют решить задачу контроля задержек сигнала в ВОЛС систем сравнения и синхронизации ШВ, так как имеют максимальное разрешение 0,4 – 0,6 м при измерениях длины, что соответствует разрешению в 2-3 наносекунды при измерениях задержки распространения сигнала.

Разрешение импульсных рефлектометров зависит прежде всего от характеристик используемых измерителей интервалов времени – разрешения при измерениях интервалов времени и погрешности частоты опорного генератора. Наиболее точные современные измерители интервалов времени имеют разрешение около 10 пс (2σ , где σ – среднеквадратическое отклонение, СКО). Следовательно, для измерений задержек

распространения сигнала с погрешностью менее 100 пс можно использовать импульсный метод с применением измерителей интервалов времени с пикосекундным разрешением.

Предлагаемая структурная схема импульсного оптического рефлектометра, построенная с использованием измерителя интервалов времени с пикосекундным разрешением (таймера событий) - EventTimer A033ET/USB [2], представлена на рисунке 1.

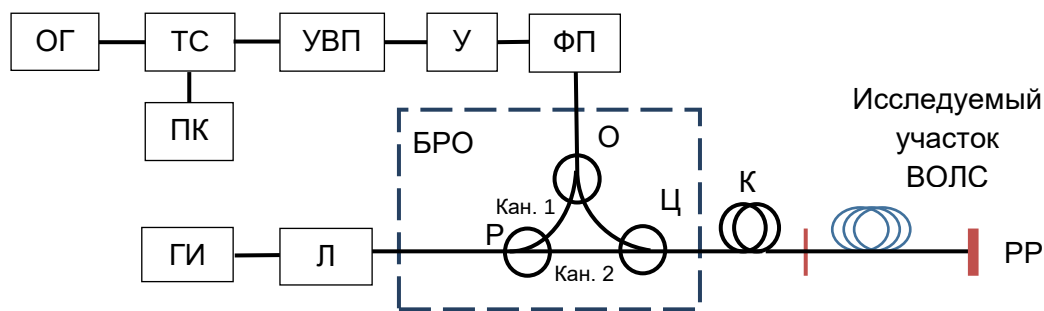


Рис. 1. Структурная схема оптического рефлектометра
 ОГ – генератор сигнала опорной частоты; ПК – персональный компьютер,
 ТС – таймер событий, УВП – устройство временной привязки,
 У – усилитель, ФП – фотоприёмник, Л – лазерный модуль,
 ГИ – генератор импульсов, БРО – блок разветвителей и объединителей,
 О – объединитель, Ц – циркулятор, Р – разветвитель,
 К – встроенная катушка волокна; РР – ретрорефлектор

Принцип действия предложенного рефлектометра состоит в следующем. Генератор импульсов ГИ подает запускающие электрические импульсы на лазерный модуль Л, затем оптические импульсы с выхода лазерного модуля попадают в блок разветвителей-объединителей БРО, где импульс разделяется на два канала: по первому каналу он поступает на фотоприёмник ФП, усиливается усилителем У, преобразуется с помощью устройства временной привязки УВП в импульс требуемой для таймера событий формы и поступает на вход таймера событий ТС, при этом таймер событий фиксирует момент испускания импульса T_{i1} . Генератор ОГ используется таймером событий в качестве источника сигнала стабильной опорной частоты. По второму каналу импульс поступает через встроенную катушку волокна К в измеряемую волоконно-оптическую линию и распространяется по ней. Отраженный от ретрорефлектора РР, размещенного на торце волокна, импульс проходит по волокну в обратном направлении и через циркулятор Ц поступает на фотоприёмник, при этом ТС фиксирует момент прихода отраженного импульса T_{i2} . Для повышения точности за счет усреднения результатов измерений перечисленные операции повторяются N раз ($i = 1 \dots N$). Задержка распространения импульса T_p по исследуемому волокну в прямом и обратном направлении (двусторонняя задержка) определяется по формуле:

$$T_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_{i2} - T_{i1} + \tau_n),$$

где τ_n – аппаратная поправка рефлектометра для учёта разности задержек в каналах БРО и задержки в встроенной катушке волокна, используемой для устранения «мертвой зоны». Измерив двустороннюю задержку распространения, можно определить длину волокна с учетом данных о показателе преломления.

Для проверки работоспособности макета рефлектометра и оценки его разрешения использовались тестовые линии, собранные из бухты оптического волокна длиной 1 км и оптического перехода (короткого отрезка оптического волокна в керамической оболочке, размещенного в металлическом корпусе). Геометрическая длина перехода, предварительно измеренная микрометром, составила 26,2 мм. Дальнейшие измерения проводились на длине волны 1310 нм в два этапа: вначале рефлектометром измерялась задержка распространения импульса в тестовой линии, состоящей только из волоконной бухты, а затем к концу

тестовой линии подключался оптический переход и измерялась суммарная задержка в составной тестовой линии. Нестабильность температуры в помещении не превышала $\pm 1^\circ\text{C}$.

Для волоконной бухты среднее значение задержки распространения сигнала составило 9,8493263 мкс, а для волоконной бухты с оптическим переходом 9,8495758 мкс, разность полученных результатов составила 0,0002495 мкс, что в пересчете на геометрическую длину оптического перехода составляет 25,5 мм. Длина этого оптического перехода, измеренная микрометром, составила 26,2 мм, а разность полученных значений составила 0,7 мм. СКО σ результатов измерений рефлектометра не превысило 1,2 пс. На основе полученных результатов проведена оценка разрешения рефлектометра (минимальной разности задержек, которую может зарегистрировать прибор). Экспериментальные исследования разработанного макета показали, что разрешение рефлектометра не превысило 5 - 8 пс, а погрешность определения разности задержек распространения сигнала составила не более 16 пс.

Практическая апробация макета рефлектометра проведена при измерениях задержки в реальной волоконно-оптической линии, проложенной между отдельно стоящими зданиями. При этом СКО результатов измерений не превысило 5 пс.

Теоретическая оценка погрешности измерений задержки распространения сигнала предложенным рефлектометром показала, что при использовании опорного генератора с относительной погрешностью по частоте не более $1 \cdot 10^{-8}$ погрешность измерений задержки не превысит ± 100 пс для ВОЛС длиной до 100 км.

Таким образом, для высокоточного определения задержек распространения сигнала в оптическом волокне предлагается использовать метод импульсной рефлектометрии во временной области, реализованный с использованием таймеров событий с пикосекундным разрешением. Особенностью предложенной схемы является использование встроенной в рефлектометр короткой катушки волокна, позволяющей устранить мертвую зону в начале шкалы и определять текущее значение аппаратурной поправки. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что рефлектометр, построенный по предложенной схеме, позволит измерять задержки распространения сигнала в оптических волокнах с погрешностью не более ± 100 пс и определять разность задержек в оптических волокнах и пассивных элементах ВОЛС с погрешностью не более ± 20 пс.

1. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени. – Измерительная техника, 2015, №1, с. 14 – 17.
2. Прохоров Д.В., Колмогоров О.В., Донченко С.С. Патент на изобретение RU 2623840. Способ формирования внутренней шкалы времени устройств сравнения и синхронизации шкал времени и оптоволоконных рефлектометров и устройство для его осуществления.

СНИЖЕНИЕ ЗАМИРАНИЙ СИГНАЛА В ФАЗОВОЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ОПТИЧЕСКОМ РЕФЛЕКТОМЕТРЕ С МНОГОМОДОВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ВОЛОКНОМ

^{1,2}Алексеев А.Э., ²Вдовенко В.С., ³Горшков Б.Г., ¹Потапов В.Т., ²Симикин Д. Е.

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

²ООО «Петрофайбер»,

Российская Федерация, 105082 Москва, Спартаковская пл., 14, стр. 4

³Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН,

Аннотация

В работе предложен новый тип когерентного фазочувствительного рефлектометра, использующего многомодовое оптическое волокно в качестве чувствительного элемента и позволяющего существенно снизить замирания сигнала в рефлектометре. Снижение замираний сигнала позволяет сократить количество областей нечувствительности оптического волокна к внешним фазовым воздействиям, возникающим в рефлектометре. В основе предлагаемой схемы рефлектометра лежит так называемый эффект модового шума, который заключается в том, что излучение, рассеянное в обратном направлении многомодовым оптическим волокном и пришедшее к его началу, представляет собой спекл-картину. Эта спекл-картина изменяется случайным образом при движении зондирующего оптического импульса по многомодовому волокну. Интенсивность поля рассеянного излучения в каждом отдельном спекле изменяется во времени статистически независимо от изменения интенсивности поля в любом другом спекле, достаточно удаленном от первого. Таким образом, на выходе рефлектометра с многомодовым волокном присутствуют несколько статистически независимых рефлектограмм, при этом каждая рефлектограмма содержит одну и ту же информацию о внешнем воздействии. Совместный анализ этих независимых рефлектограмм позволяет снизить или полностью устранить замирания сигнала.

Эффект замирания сигнала или фединг в когерентном рефлектометре был впервые описан в ранних работах по когерентной рефлектометрии [1-3]. Этот эффект проявляется в том, что интенсивность излучения, рассеянного некоторым участком одномодового оптического волокна, становится близкой к нулю. Теоретическое описание этого эффекта было произведено на основе теории спеклов, развитой Гудманом [4, 5]. В результате замирания сигнала некоторая область оптического волокна становится нечувствительной к внешним воздействиям на нее. К настоящему времени предложено несколько способов устранения замираний сигнала в когерентном рефлектометре. В основе большинства методов лежит замена рефлектограммы с замиранием в некоторой области другой реализацией этой рефлектограммы, статистически независимой от первой и содержащей ту же информацию о внешнем воздействии, но уже без замирания сигнала в рассматриваемой области. Получение другой статистической реализации рефлектограммы может быть достигнуто путем изменения частоты зондирующего оптического излучения, изменения состояния поляризации излучения в импульсе или его оптической фазы. Недостатком этих методов является то обстоятельство, что вследствие статистической природы процесса рассеяния когерентного излучения, устранение замирания в выбранной области оптического волокна неизбежно приводит к возникновению замирания в другой области этого волокна.

Первым способом устранения замираний во всех участках волоконного тракта является плавное периодическое изменение частоты зондирующего оптического излучения. В результате такого изменения частоты излучения рефлектограмма периодически выходит из состояния замирания в каждой области. Недостатком этого способа является ограничение частотного диапазона регистрируемого сигнала внешнего фазового воздействия, так как сигнал периодического изменения частоты лазерного излучения должен быть отфильтрован.

Вторым способом устранению замираний является одновременное использование нескольких (двух и более) каналов регистрации сигнала, например, применение нескольких частот зондирующего лазерного излучения или нескольких оптических волокон, лежащих в одном кабеле параллельно друг другу. Каждый канал регистрации формирует независимую рефлектограмму и все эти рефлектограммы содержат одну и ту же информацию о внешнем воздействии. Одновременные замирания в соответствующих точках во всех рассматриваемых каналах регистрации – статистически маловероятное событие.

В настоящей работе предложен и продемонстрирован другой способ устранения замираний в когерентном рефлектометре с использованием в качестве чувствительного элемента многомодового оптического волокна [6]. Предлагаемый способ основан на том, что интенсивность на выходе многомодового волокна имеет вид спекл-картины, вследствие так называемого эффекта модового шума [7]. Модовый шум возникает вследствие

интерференции полей различных волноводных мод, одновременно распространяющихся в многомодовом оптическом волокне с различной фазовой скоростью и приобретающих различные фазовые задержки. Изменение условий распространения излучения в многомодовом волокне, например, вследствие вибрационных воздействий на него приводит к случайному изменению фаз полей распространяющихся волноводных мод и изменению интерференционной спекл-картины на выходе многомодового волокна. Интенсивности различных спеклов в результирующей спекл-картине обратно-рассеянного излучения, изменяются во времени статистически независимо друг от друга. Рассматривая изменения этих интенсивностей на торце многомодового волокна, можно получить набор статистически независимых рефлектограмм, содержащих одну и ту же информацию о внешнем воздействии, рисунок 1. Совместный анализ этих рефлектограмм позволяет снизить или полностью устранить замирания сигнала на всем протяжении волоконного тракта рефлектометра.

В предлагаемом рефлектометре возбуждение волноводных мод и регистрации обратно-рассеянного излучения было осуществлено с помощью специально изготовленного ответвителя, состоящего двух склотовых волоконных перетяжек из одномодового оптического волокна вплотную к которым было подведено многомодовое волокно. Данный способ сопряжения волокон продемонстрировал высокую эффективность возбуждения и позволил получить две статистически независимые рефлектограммы, совместная обработка которых позволила устранить возникающие замирания.

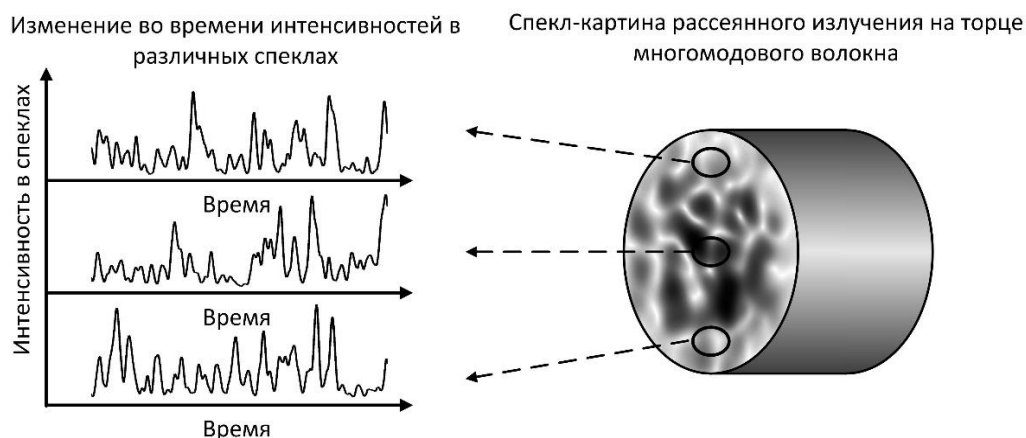


Рис. 1. Схематическое изображение динамической спекл-картины рассеянного излучения на торце многомодового оптического волокна, образованной вследствие эффекта модового шума. Изменения во времени интенсивностей в различных спеклах статистически независимы друг от друга

1. Healey P 1984 Fading in heterodyne OTDR Electronics Letters 20 30
2. Healey P 1984 Fading rates in coherent OTDR Electronics Letters 20 443
3. Healey P 1985 Statistics of Rayleigh backscatter from a single-mode optical fibre Electronics letters 21 226
4. Goodman J W 2007 Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications (Englewood Cliffs, NJ: Roberts & Co)
5. Goodman J W 2015 Statistical Optics (Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons)
6. Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, Potapov V T, Simikin D E 2016 Fading reduction in a phase optical time-domain reflectometer with multimode sensitive fiber Laser Physics 26 095101
7. Epworth R E 1979 Phenomenon of modal noise in fiber systems Proc Optical Fiber Communication Conference OSA Technical Digest Series ThD1

АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ РЕШЕТКИ С ЕДИНОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ БРЭГГА

Сахабутдинов А.Ж., Морозов О.Г.

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань*

Аннотация

Приведены результаты моделирования, записи и исследования спектральных характеристик волоконных брэгговских решеток с двумя симметричными фазовыми π -сдвигами. Показана возможность создания на их основе многоточечных и квази-распределенных волоконно-оптических сенсорных сетей с малой стоимостью одного измерительного канала. При этом решетки имеют единую длину волны Брэгга, а адрес каждой из них определяется различной шириной спектрального разноса между фазовыми сдвигами. Для извлечения измерительной информации необходимо простое оптико-электронное преобразование без использования сложных спектральных или интерференционных интеррогаторов.

Волоконные брэгговские решетки (ВБР) являются мощным инструментом для построения сенсоров различного назначения. Однако при объединении их в многоточечные или квази-распределенные сети возникает проблема дорогого канала измерений или сверхсложного, в основном, лабораторного построения устройств сбора информации с решеток – интеррогаторов. Интеррогаторы строятся на основе спектрометрических схем при использовании решеток с различными брэгговскими длинами волн [1], или интерферометрических – при одинаковой брэгговской длине волны [2].

Первой целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование спектральных характеристик ВБР с двумя симметричными фазовыми π -сдвигами и их изменений под воздействием различных физических полей. Второй целью работы является анализ возможности формирования адреса для различных решеток, имеющих одинаковую брэгговскую длину волны, в виде варьируемой ширины разноса между окнами прозрачности решетки, определяемой положением фазовых сдвигов по длине ВБР.

На рис. 1 представлены смоделированные нами трансформации спектра ВБР с двумя симметричными фазовыми π -сдвигами при изменении длины решетки: 5 мм (а), 6 мм (б), 7 мм (в), 8 мм (д).

Известно, что при подаче двух близких по длине волны (частоте) сигналов на выходе фотодетектора формируется сигнал биений, определяемый исходя из [3, 4]:

$$I_{RF}(t) \sim 2A \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)],$$

где A – амплитуда, определяемая глубиной узкополосных провалов и коэффициентом усиления фотодетектора, ω_1 и ω_2 – оптические частоты, соответствующие центральным длинам волн окон прозрачности ВБР. На рис. 2 показан радиочастотный отклик от трех решеток с различным спектральным разносом между фазовыми сдвигами, записанных нами непрерывным лазером по технологии формирования составных решеток [5] в лаборатории НИИ ПРЭФЖС КНИТУ-КАИ. Все решетки находились в одинаковых внешних условиях: температуре и давлении.

Для получения отклика, показанного на рис. 2, нами были использованы: склон опорной ВБР, соответствующий диапазону измерений, фотоприемник с шириной полосы 20 ГГц и программное обеспечение на базе быстрого преобразования Фурье.

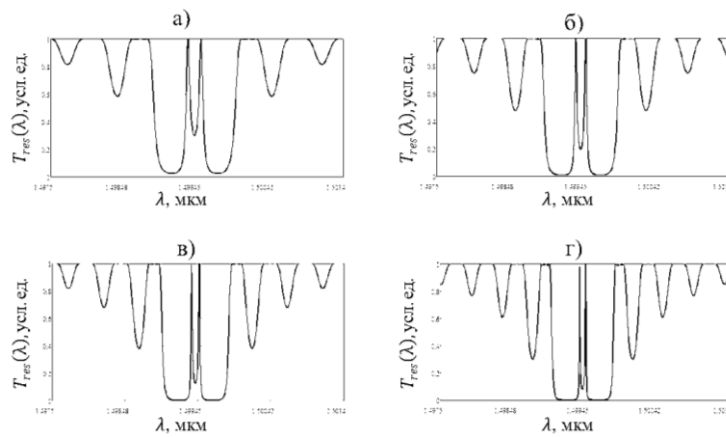


Рис. 1. Трансформация спектра ВБР при изменении длины решетки: 5 мм (а), 6 мм (б), 7 мм (в), 8 мм (д)

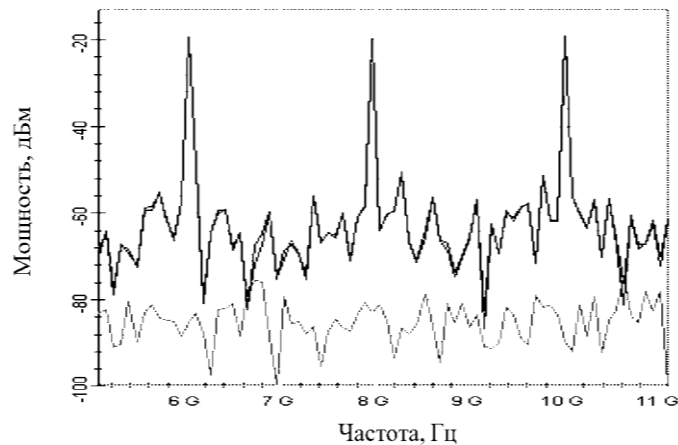


Рис. 2. Отклик трех ВБР с различным разномом фазовых сдвигов.

Построенные на базе указанных решеток сенсорные сети, аналогичные рассмотренным в [6, 7] не требуют использования спектральных или интерферометрических интеррогаторов.

1. García I., Zubia J., Durana G., et al. // *Sensors*. – 2015. – V. 15. – pp. 15494-15519.
2. Ye F., Qian L., Liu Y., et al. // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2008. – V. 20. – pp. 1488-1490.
3. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 84-91.
4. Xu O., Zhang J., Deng H., and Yao J. P. // *IEEE Photon. Technol. Lett.* – 2017. – V. 29, – № 4. – pp. 357-360.
5. Chehura E., James S.W., Tatam R.P. // *Proc. SPIE*. – 2009. – V. 7503. – P. 750309.
6. Нуреев И.И. // *Инженерный вестник Дона*. – 2016. – № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3581/.
7. Нуреев И.И. // *Инженерный вестник Дона*. – 2016. – № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2016/3605/.
8. Natanson O.G., Morozov O.G., Akhtiamov R.A., Gusev V.F. // *Proc. SPIE*. – 2005. – V. 5854. – pp. 215-223.

АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ: КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ДАТЧИКИ С ВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

¹Сахабутдинов А.Ж., ^{1,2}Морозов О.Г., ¹Нуреев И.И., ¹Кузнецов А.А.,
¹Пуртов В.В., ¹Казаров В.А., ³Феофилактов С.В., ⁴Мисбахов Р.Ш.,
⁵Алексеев В.Н., ⁵Иваненко В.А.

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань
²ООО «Микрофарм-КАИ», Казань
³ДООО «ИРЗ-ТЭК», Ижевск
⁴Казанский государственный энергетический университет, Казань
⁵АО НПО Каскад, Чебоксары

Аннотация

Одной из основных задач волоконно-оптических сенсорных сетей (ВОСС) является мультиплексирование большого количества волоконно-оптических датчиков в структуре одной сети с целью уменьшения вклада дорогого интеррогационного оборудования в ее стоимость и разработка системы, способной проводить измерения во множестве точек, расположенных, в общем случае, в произвольном порядке. Сенсорная сеть на основе ВБР по определению является квази-распределенной. Стоимость сети зависит от многих факторов, а подсистема, имеющая доминирующую стоимость, как правило, определяется практическим назначением ВОСС. В некоторых применениях, стоимость волокна может быть доминирующей, а схема мультиплексирования, которая обеспечивает высокую плотность каналов на одно волокно, имеет самую низкую совокупную стоимость. Все же, как правило, стоимость интеррогатора доминирует в большинстве систем. В настоящей работе будут рассмотрены основные принципы построения и характеристики ВОСС с точки зрения методов мультиплексирования и типа используемых адресных датчиков, влияющих на структуру интеррогатора при работе на пропускание и отражение.

Проведем моделирование спектральных характеристик сигналов, поступающих на вход фотоприемника для двух вариантов исполнения адресных ВБР-датчиков: в виде щупа и в виде петли.

Волоконно-оптический датчик в виде щупа (ВОСС, работающая на отражение).

Для проведения моделирования аналитически опишем спектры ВБР-датчика, опорной ВБР-фильтра и ВБР-зеркала.

Матрица передачи ВБР-датчика опишется в виде:

$$S_{\text{sensor}}(\lambda) = S_1(\lambda) \cdot S_{\varphi} \cdot S_2(\lambda) \cdot S_{\varphi} \cdot S_3(\lambda). \quad (1)$$

Матрица передачи ВБР-зеркала опишется в виде:

$$S_{\text{FBG}}(\lambda) = \begin{bmatrix} \frac{e^{i \cdot q(\lambda) \cdot l} - r(\lambda)^2 \cdot e^{-i \cdot q(\lambda) \cdot l}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{-r(\lambda) \cdot e^{-i \cdot q(\lambda) \cdot l} + e^{i \cdot q(\lambda) \cdot l}}{1 - r(\lambda)^2} \\ \frac{r(\lambda) \cdot e^{-i \cdot q(\lambda) \cdot l} - e^{i \cdot q(\lambda) \cdot l}}{1 - r(\lambda)^2} & \frac{e^{-i \cdot q(\lambda) \cdot l} - r(\lambda)^2 \cdot e^{i \cdot q(\lambda) \cdot l}}{1 - r(\lambda)^2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

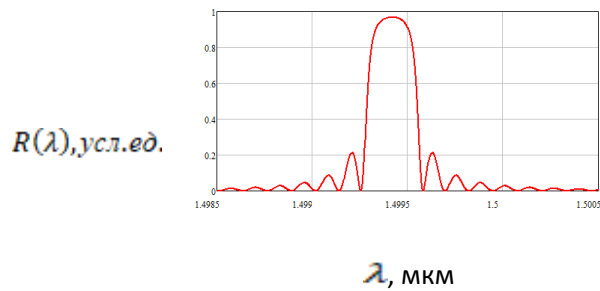
По схеме ВБР-датчик и опорная ВБР-фильтр работают «на пропускание», а ВБР-зеркало – «на отражение».

Для ВБР, работающих «на пропускание» спектр опишется следующим выражением:

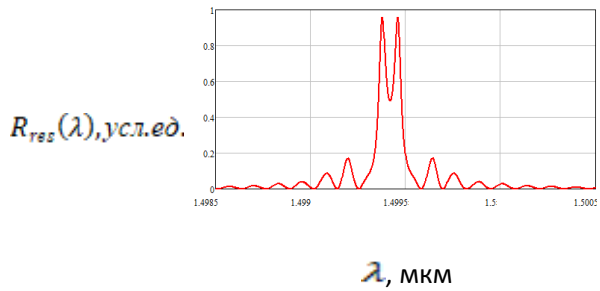
$$T(\lambda) = \left(\left| S(\lambda)_{11} - \frac{S(\lambda)_{12} S(\lambda)_{21}}{S(\lambda)_{22}} \right| \right)^2 \quad (3)$$

Спектр ВБР-зеркала опишется в виде:

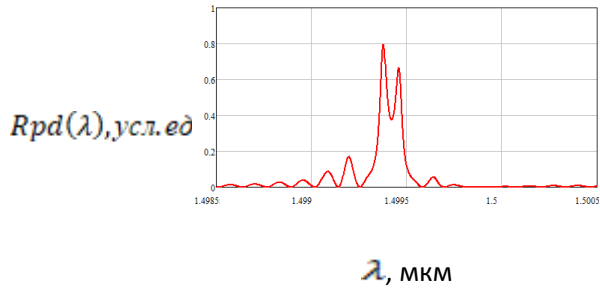
$$R(\lambda) = 1 - T(\lambda) = 1 - \left(\left| S(\lambda)_{11} - \frac{S(\lambda)_{12} S(\lambda)_{21}}{S(\lambda)_{22}} \right| \right)^2 \quad (4)$$



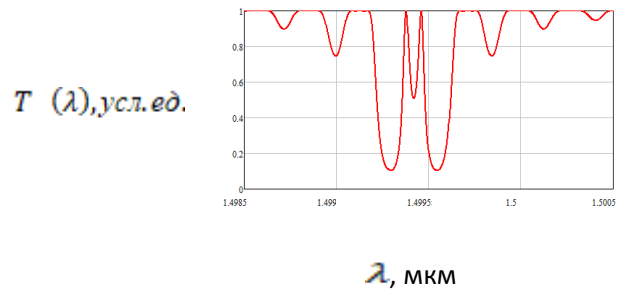
а)



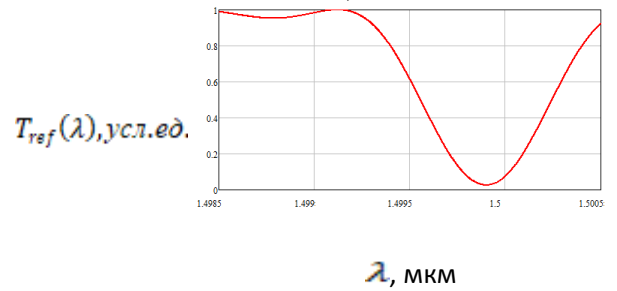
в)



д)



б)



г)

а – спектр отражения ВБР-зеркала
 б – спектр пропускания ВБР-датчика
 в – спектр, отраженный от ВБР-датчика и ВБР-зеркала
 г – спектр пропускания опорной ВБР-фильтра
 д – спектр, попадающий на фотоприемник

Рис. 1. Спектрограммы оптических сигналов от адресных ВБР-датчиков в ВОСС, работающей на отражение

Волоконно-оптический датчик в виде петли (ВОСС, работающая на пропускание).

Датчики такого типа представлены своей отличительной особенностью - отсутствием зеркала, переотражающего излучение окон прозрачности на фотоприемник. Аналитическая запись спектров ВБР аналогична рассмотренным выше.

На рисунке 2 приведены спектрограммы от адресных ВБР-датчиков в ВОСС, работающей на пропускание.

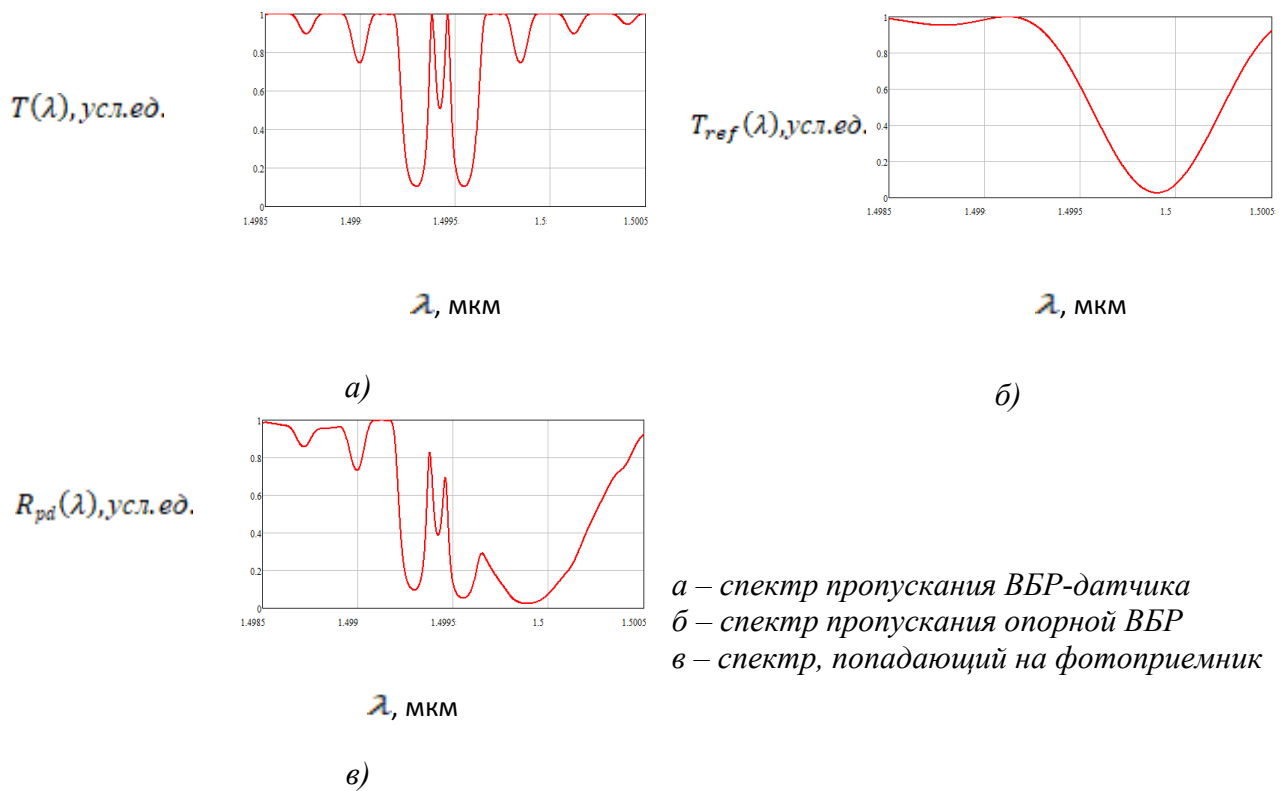


Рис. 2. Спектрограммы оптических сигналов от адресных ВБР-датчиков в ВОСС, работающей на пропускание

По рисунку 2 видно, что в спектре, попадающем на фотоприемник, существует несколько линий, способных сформировать сигналы биений: два узкополосных провала, пары узкополосный провал – минимумы высокого порядка. Однако стоит отметить, что для узкополосных провалов частота биений будет иметь минимальную величину из всех, соответственно подбирая требуемую полосу пропускания фотоприемника можно избежать детектирования побочных сигналов биений. Таким образом, для извлечения измерительной информации необходимо простое оптоэлектронное преобразование без использования сложных спектральных или интерференционных интеррогаторов. Возможно использование радиофотонного двухчастотного сканирования адресных ВБР [2-7].

Пространственное разрешение будет определяться технологией крепления адресных ВБР датчиков и может достигать единиц миллиметров при температурных измерениях.

1. Мисбахов Р.Ш. и др. // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2. URL: ivdon.ru/archive/n3y2017/4343/.
2. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 84-91.
3. Natanson O.G., Morozov O.G., Akhtiatov R.A., Gusev V.F. // Proc. SPIE. – 2005. – V. 5854. – pp. 215-223.
4. Морозов О.Г. и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 146-149.
5. Сахабутдинов А.Ж. и др. // Нелинейный мир. – 2015. – Т. 13. – № 8. – С. 32-38.
6. Морозов О.Г. и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 95-100.
7. Талипов А.А. и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 2 (16). – С. 3-12.
8. Пуртов В.В. и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 4. – С. 92-95.

9. Казаров В.Ю., Морозов О.Г. // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2016. – №8. – С. 34-41.

ТОЧНОСТЬ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАТУХАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

Фролов И.В.

ООО «Саранскабель-Оптика», Саранск

Аннотация

В работе представлены результаты практически достижимой точности рефлектометрических измерений погонного затухания оптических волокон кабелей связи в процессе их производства на примере волокна стандарта G.652 с пониженным затуханием на длине волны 1550 нм. Показан практическая зависимость точности измерения от длины, даны практические рекомендации по выбору параметров рефлектометра (требуемый динамический диапазон) и параметров измерения (длительность импульса, время измерения), приведены значения достижимых точностей измерения в зависимости от вышеуказанных параметров для различных длин измеряемых оптических волокон. Показано, что помимо описываемых в литературе явных составляющих погрешностей измерения - систематической, обусловленной нелинейностью шкалы рефлектометра и шумовой составляющей, обусловленной релеевским рассеянием, практически существует еще условно-постоянная составляющая, обусловленная, видимо, поляризационными эффектами, которая при небольших длинах оптических волокон менее 5 км становится заметной, а при длинах менее 1 км, определяющей составляющей погрешности.

В процессе производства оптических кабелей имеется ряд ситуаций, в которых точность измерения погонного затухания оптического волокна (ОВ) становится критически важной, а именно:

- при изготовлении кабелей с применением ОВ с пониженным затуханием для магистральных ВОЛС;
- при изготовлении оптических кабелей, имеющих длину менее 1 км;
- при проведении испытаний образцов кабельной продукции, имеющих небольшую длину в соответствии с ограниченным размером испытательных установок;

В частности, при изготовлении кабелей в процессе операционного контроля необходимо обеспечить единую точность измерения коэффициента затухания ОВ для определения как пооперационного изменения коэффициента затухания, так и общего, от входного контроля исходного ОВ. При том, что на входе процесса производства кабеля ОВ представлено катушками длиной 25..50 км, а на выходе – кабелем со строительной длиной 1..7 км.

При этом еще необходимо учитывать необходимость отслеживания различных неоднородностей в оптическом волокне, например, пережатий при производстве, что требует хорошего пространственного разрешения и накладывает ограничения на длину импульса измерения – не более 100 нс [1].

Требования повышения одновременного разрешения по уровню и по протяженности являются противоречивыми [2] и приводят к требованию повышения динамического диапазона рефлектометра - либо путем увеличения времени измерения (до 60..180 сек) и длительности импульса [3] (до 1..2,5 мкс) для проведения отдельных измерений коэффициента затухания, либо замены рефлектометра на более мощный, с большим динамическим диапазоном. Первый путь приводит к увеличению трудоемкости измерений, второй – к необходимости существенных затрат [1].

При этом, точность измерения при входном контроле катушек с ОВ, нареканий не вызывает, определяется нелинейностью рефлектометра [4] и при стандартной нелинейности 0,03 дБ/дБ и коэффициенте затухания стандартного ОВ 0,18 дБ/км составляет 0,0054 дБ/км, что является приемлемой величиной для обычных требований.

Указанная ситуация приобретает критический характер при повышенных требованиях к приростам затухания при производстве кабелей с пониженным затуханием ОВ, используемым для магистральных линий связи, имеющих затухания 0,17 дБ/км и требования к точности измерения не более 0,002 дБ/км. Такая точность вполне достижима с учетом реальной нелинейности рефлектометров <0,01 дБ/дБ согласно их заводским протоколам контроля параметров. При этом шумовая погрешность в классическом понимании, при значительном количестве усреднений (тысячи и десятки тысяч) как по отсчетам измерений во временном плане [1], так и между точками измерений при применении метода наименьших квадратов для измерения [5], не должна вносить существенного вклада в ошибку измерения и должна определяться систематической погрешностью [6].

Однако, отраслевые стандарты, при определении требований к параметрам рефлектометров для систем мониторинга, указывают на наличие некой постоянной составляющей ошибки при измерении затухания в 0,05 дБ [7], что определяет низкую точность измерения коэффициента затухания при малых длинах. Как показывает практика, погрешность измерения с уменьшением длины ОВ менее 5..10 км (в зависимости от динамического диапазона) начинает существенно возрастать [8], и, как показывают собственные данные, при длинах менее 1..2 км возрастает в 10 раз и достигает значений 8..10% и даже более, что уже является, согласно ГОСТ [9], неприемлемой величиной. При этом в качестве референсных данных использовались сами данные исходной катушки ОВ – измерения коэффициента затухания производителя – компании Corning, с точностью до третьего знака и высокая фактическая однородность коэффициента затухания по длине.

Причем применение более мощных рефлектометров (проводилось сравнение рефлектометров с динамическим диапазоном 39 дБ и 44 дБ) лишь отодвигает нижний порог неприемлемой точности, но оставляет его на практически весьма высоком – около 1 км.

Указанные обстоятельства и данные, приводимые в литературе [10], позволяют утверждать, что данная составляющая погрешности обусловлена, видимо, поляризационными факторами, имеет характер нестационарного процесса (то есть имеет связь между сечениями), и не позволяет в рамках действующей модели измерений коэффициента затухания и обработки результатов улучшить точность при помощи повторных измерений [11].

Нахождение границ точности с учетом поляризационной ошибки и возможности ее уменьшения при использовании обычных рефлектометров, требует дополнительного исследования. На потенциальную возможность улучшения указывает зависимость ошибки от положения поляризации сигнала при вводе в измерительную линию [11], которая в свою очередь [10], зависит от положения соединительных шнуров.

1. Листвин А.В., Листвин В.Н. *Рефлектометрия оптических волокон* – М., ЛЕСАРПарт, 2005, стр. 42..45.
2. D. Derickson (Ed) *Fiber Optic Test And Measurement, Chapter 11, J. Beller. OTDRs and Backscatter Measurements, Hewlett-Packard Company, 1998, p.444*
3. [2], p.459
4. [1], стр. 83..84.
5. Ищенко Г.И., Медведев Ю.И. *Математическая статистика, Учеб. Пособие для вузов, М., Высш. Шк., 1984 г, стр.187.*
6. Кукуш В.Д. *Электрорадиоизмерения, Учебн. Пособие для вузов, М.: Радио и связь, 1985 г, стр. 35.*
7. СТО-56947007-33.180.10.172-2014 *Технологическая связь. Правила проектирования, строительства и эксплуатации ВОЛС на ВЛ электропередачи напряжением 35 кВ и выше, табл. 9.3.1, п.11, стр.223*

8. А. Микилев. Некоторые задачи классической OTDR –рефлектометрии при измерении коэффициента затухания одномодовых оптических волокон и кабелей - доклад на Всероссийской конференции по волоконной оптике, Пермь, 2017.
9. ГОСТ 26814-86. Кабели оптические. Методы измерения параметров, п.2.5.2, стр. 10.
10. [1], стр. 54, 55
11. Белянко Е.В., Бобров В.И., Гринштейн М.Л., Зюзин М.С. Повышение точности измерения коэффициента затухания оптическим рефлектометром

АКТИВНЫЙ БРИЛЛЮЭНОВСКИЙ ФИЛЬТР В СХЕМЕ ОПТИЧЕСКОГО БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА

¹Будылин Г.С., ²Горшков Б.Г., ³Горшков Г.Б., ⁴Жуков К.М., ⁵Парамонов В.М., ³Симикин Д.Е.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, химический факультет, Москва

²Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва

³ООО «ПетроФайбер», Новомосковск

⁴ООО «Лаборатория электронных и оптических систем», Москва

⁵Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

Аннотация

Экспериментально исследована схема волоконно-оптического бриллюэновского рефлектометра, основанная на использовании активного перестраиваемого бриллюэновского фильтра для селекции спектральной линии спонтанного бриллюэновского рассеяния света в тестируемом волокне. Для повышения дальности действия применено циклическое кодирование зондирующего сигнала и рамановское усиление. При времени усреднения 5 минут было обеспечено пространственное разрешение 4 м, с оцифровкой через 1 м при длине опрашиваемого волокна 25 км. Характеризующее шум среднеквадратическое отклонение составило менее 1.1 МГц. Была проведена оценка чувствительности рефлектометра к температурным изменениям и механической деформации.

Величина бриллюэновского сдвига сильно зависит от механических деформаций и значительно от изменений температуры, в связи с этим была высказана идея создания бриллюэновского рефлектометра [1, 2]. Его создание сильно затруднено малым частотным сдвигом спонтанного бриллюэновского рассеяния от частоты рэлеевского рассеяния и его значительно меньшей интенсивностью. Существуют несколько схем построения бриллюэновского рефлектометра, такие как: гетеродинная [3], с использованием интерферометров Маха-Цандера и Фабри-Перо [4, 5], бриллюэновского усилителя [6]. Все вышеописанные схемы имеют те или иные недостатки, либо не были реализованы.

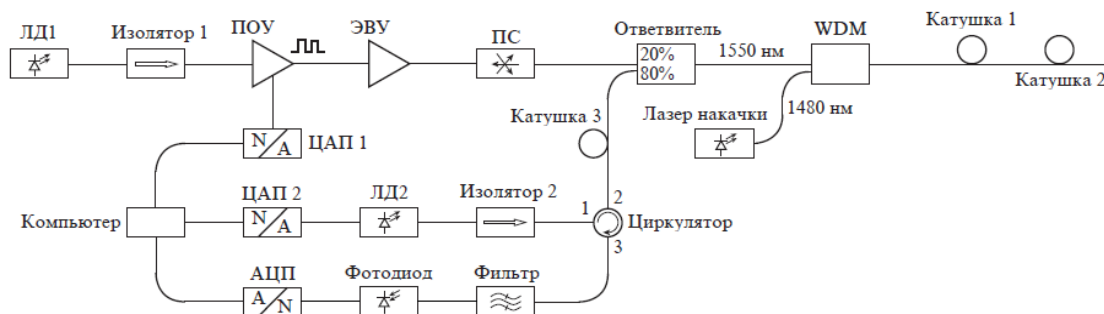


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: ЛД1 и ЛД2 – лазерные диоды с распределенной обратной связью; ПОУ – полупроводниковый оптический усилитель; ЭВУ – эрбиевый волоконный усилитель; WDM – спектральный мультиплексор; ПС – поляризационный скремблер. Длина волокон (все – Fujikura FutureGuide-LWP) катушек 1, 2 и 3 – 25 км, 200 м и 2 км соответственно

В настоящей работе был проведен эксперимент по созданию бриллюэновского рефлектометра на основе бриллюэновского усилителя, играющего роль активного оптического фильтра. Для проведения эксперимента использовалась установка, схема которой представлена на рисунке 1.

Задающий лазерный диод ЛД1 работал в непрерывном режиме со стабилизацией температуры за счет встроенного элемента Пельтье и стабилизацией тока. Импульсы длительностью 40 нс формировались с помощью ПОУ, затем они усиливались эрбиевым волоконным усилителем. Полупроводниковый усилитель управлялся цифро-аналоговым преобразователем ЦАП. Через поляризационный скремблер ПС и направленный оптический ответвитель зондирующее излучение поступало в исследуемое волокно (катушки 1, 2).

Активный бриллюэновский фильтр сформирован на основе усилительной катушки 3 и второго лазерного РОС-диода ЛД2, аналогичному ЛД1. Получение профиля линии Бриллюэна достигалось изменением частоты ЛД2 с низкой скоростью за счет модуляции тока инжекции в малых пределах по линейному закону. Особенность схемы состояла в том, что дополнительное бриллюэновское усиление осуществлялось и самим исследуемым волокном, для чего излучение ЛД2 частично вводилось в него через ответвитель. Рассеянное в обратном направлении и усиленное за счет эффекта Бриллюэна излучение через ответвитель и циркулятор поступало на фотоприемный модуль, выполненный на основе pin-фотодиода с трансимпедансным усилителем. Рэлеевская компонента рассеяния подавлялась при помощи тонкопленочных фильтров.

С целью исключения «замирания» сигнала в схему включен поляризационный скремблер.

Ширина линий непрерывных лазеров определялась при помощи гомодинного метода с использованием неравноплечего интерферометра Маха-Цендера [7]. Оценка спектрального разрешения производилась при помощи отрезка волокна Corning LEAF, с известными положениями четырех линий бриллюэновского рассеяния.

Применение циклических кодов длиной до 70 бит при посылке импульсов позволило примерно вдвое увеличить дальность действия при том же уровне шумов по сравнению с традиционным моноимпульсным методом. Дальнейшее увеличение длины кода приводило к эффекту «затягивания частоты» [8]. За счет рамановского усиления, обеспеченного полупроводниковым лазером накачки, работающим на длине волны 1480 нм, достигнута целевая дальность действия 25 км.

На рисунке 2 показано распределение бриллюэновского сдвига в исследуемом волокне длиной 25 км. Диапазон сканирования составил 200 МГц, время накопления сигнала 5 мин, среднеквадратическое отклонение при определении бриллюэновского сдвига в начале волокна около 0.45 МГц, на его конце 1.05 МГц. На вставке проиллюстрирована реакция рефлектометра на температурные изменения (участок 1, нагрев до 60 °С, исходная температура 25 °С) и на механические деформации (участок 2, относительная деформация растяжения 0.167%).

Таким образом, экспериментально показана возможность создания волоконного бриллюэновского рефлектометра, использующего для выделения спонтанного бриллюэновского рассеяния эффект бриллюэновского усиления в волокне (без использования гетеродинирования), а также достигнута дальность действия 25 км.

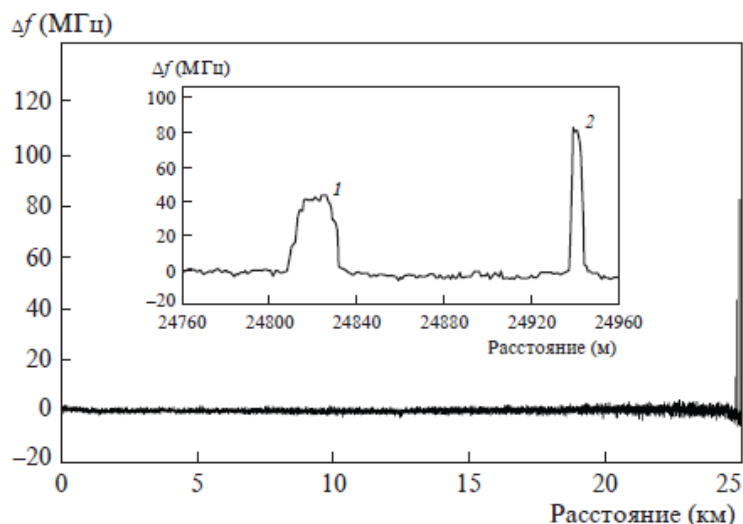


Рис.2. Сдвиг частоты бриллюэновского излучения по длине волокна
(на вставке – сдвиг на участке 24760 – 24950 м)

1. Мюсов И.М. и др. Авторское свидетельство СССР SU1534304 (1988).
2. Горшков Б.Г., Горбатов И.Е., Данилейко Ю.К., Сидорин А.В. Квантовая электроника, 17, 345 (1990) [Sov. J. Quantum Electron., 20, (1990)].
3. Ohno H., Naruse H., Yasue N., Miyajima Y., Uchiyama H., Sakairi Y., Li Z.X. Proc. SPIE, 4596, 74 (2001).
4. Kee H.H., Less G.P., Newson T.P. Opt. Lett., 25, 695 (2000).
5. Parker T.R., Farhadiroushan M., Feced R., Handerek V.A., Rogers A.J. IEEE J. Quantum Electron., 34, 645 (1998).
6. Наний О.Е. Патент РФ RU 2229693 (2003).
7. Richter L.E., Mandelberg H.I., Kruger M.S., McGrath P.A. IEEE J. Quantum Electron., 22, 2070 (1986).
8. Soto M.A., Bolognini G., Di Pasquale F., Thévenaz L. Opt. Lett., 35, 259 (2010).

РАСПРЕДЕЛЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ДАВЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОЕ БРИЛЛЮЭНОВСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ С СОХРАНЕНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

¹Шубин А.В., ¹Гейдер Р.Ф., ¹Якубович А.А., ¹Смирнов В.С., ¹Треков М.В., ^{1,2,3} Фотиади А.А.

¹ООО "Уникальные волоконные приборы", Москва

² University of Mons, Mons, Belgium, B-7000

³ Ульяновский государственный университет, Ульяновск

Аннотация

Представлены результаты тестирования волоконного датчика на основе стандартного световода с сохранением поляризации (Panda), предназначенного для распределенного измерения поверхностного давления. В качестве физического механизма опроса сенсорного волокна использовано четырехволновое Бриллюэновское взаимодействие, позволяющее осуществлять распределенное измерение поверхностного давления через измерение величины двулучепреломления в сенсорном волокне. При этом достигнуты рекордные (для всех известных волоконных систем) характеристики распределенного измерения статического давления, в частности, совокупность таких параметров как абсолютная точность измерений (~ 0.5 атм), динамический диапазон измерений (1 - 800 атм), пространственное разрешение (< 0.5 м), длина измерений (> 500 м). Кроме того,

показано, что высокая чувствительность величины двулучепреломления в сенсорном волокне к температуре обуславливает необходимость использования дополнительного канала высокоточного измерения температуры сенсорного волокна и специальных алгоритмов обработки результатов измерений.

В коммерческих датчиках на основе ВРМБ (так называемые бриллюэновские анализаторы, или BOTDA) реализованы способы распределенного мониторинга температуры и продольного натяжения, основанные на измерении частоты ВРМБ сдвига [1]. В принципе, эта же методика может быть использована для целей мониторинга поверхностного давления. Для этого в качестве сенсорного волокна используется волокно с сохранением поляризации, а давление определяется по изменению двулучепреломления волокна, измеряемого через разность частот ВРМБ сдвигов для двух разных поляризаций. Однако, этот способ имеет низкую точность, недостаточную для большинства потенциальных применений [2].

Способы, основанные на измерении двулучепреломления сенсорного волокна через четырехволновое ВРМБ взаимодействие [3], позволяют проводить измерение поверхностного давления с высокой точностью. Их общая суть заключается в том, что в отрезок оптического РМ волокна вводятся по крайней мере три оптических узкополосных линейно-поляризованных сигнала. Например, это могут быть, сначала, два встречных сигнала в поляризации X волокна на частоте накачки ω_{L0}^X и частоте Стокса ω_{S0}^X , сдвинутых относительно друг друга на резонансную величину ВРМБ сдвига Ω_X . Их взаимодействие в волокне приводит к образованию в волокне динамической решетки звуковой волны. Если потом со стороны Стоксового сигнала в волокно подается зондирующий импульс на частоте ω_S^Y в поляризации Y, то эффективность отражения этого импульса от звуковой решетки в каждой точке волокна зависит от положения оптической частоты зондирующего сигнала ω_S^Y относительно его резонансной частоты ω_{S0}^Y при четырехволновом ВРМБ взаимодействии: $\omega_{S0}^Y \approx n_X/n_Y \omega_{S0}^X$, n_X и n_Y – показатели преломления поляризационных мод волокна. Перестраивая зондирующий сигнал по частоте ω_S^Y можно определить положение резонансной частоты ω_{S0}^Y и по ней двулучепреломление волокна: $\Delta n = n_Y (\omega_{L0}^Y - \omega_{L0}^X) / \omega_{L0}^X$.

В эксперименте в качестве сенсора использовался отрезок РМ волокна (Panda, Fujikura) длиной 520 м. Участок световода длиной 6 м (расположенный в ~200 м от начала) был помещен в термостабилизированную барокамеру. Давление в барокамере изменялось от 0.1 до 80 МПа, что приводило к локальному изменению двулучепреломления. Узкополосное излучение на частотах стоксовых сигналов ω_S^X (50 нс, 1 Вт, перестройка до 2 ГГц), ω_S^Y (5 нс, 300 мВт, перестройка до 10 ГГц) и накачки ω_L^X (непрерывный, 300 мВт, частота фиксирована) вводятся в волокно с противоположных концов навстречу друг другу. Частоты точно устанавливаются при помощи системы ФАПЧ. Задержка импульса ω_S^Y относительно импульса ω_S^X составляет ~25 нс. Импульсы формируются при помощи модуляторов и эрбиевых усилителей. Рассеяние зондирующего сигнала на динамической решетке в поляризации Y регистрируется лавинным фотоприемником. Сигналы с фотоприемников оцифровываются двухканальными АЦП с частотой дискретизации 200 МГц.

Измерения производятся в два этапа. Сначала, в отсутствии сигнала на частоте ω_S^Y , определяется распределение Бриллюэновского резонанса $\Omega_{X0}(x)$ по координате волокна (как в обычном BOTDA). Затем, при фиксированных значениях ω_S^X , осуществляется сканирование частоты ω_S^Y зондирующим импульсом. На рис.1а представлен пример зависимости амплитуды рассеянного сигнала от частоты ω_S^Y (в терминах $\Omega_Y = \omega_S^Y - \omega_{L0}^X$). Пик зависимости соответствует резонансной частоте $\Omega_{Y0} = \omega_{S0}^Y - \omega_{L0}^X$. Положение этого пика зависит от внешних условий - температуры и давления. На рис. 1б представлена зависимость изменения резонансной частоты $d\Omega_{Y0} = \Omega_{Y0}(x, P_1, T_1) - \Omega_{Y0}(x, P_2, T_2)$ от координаты волокна

при изменении давления в барокамере от атмосферного до высокого (около 800 атм). Видно, что пространственное разрешение ограничено только частотой дискретизации АЦП (~ 0.5 м). На рис.2 представлены экспериментальные зависимости изменений частот резонансов Ω_{x0} и Ω_{y0} от температуры и давления в барокамере. Хорошо видно, что обе зависимости линейные. При этом чувствительность Ω_{y0} к давлению 104 МГц/МПа оказывается более, чем на 2 порядка выше, чем при использовании классического метода BOTDA (~ 0.9 МГц/МПа) [2]. В то же время, чувствительность Ω_{y0} к температуре также высокая, поэтому для практической реализации сенсора необходимо комбинировать рассмотренный метод с методом точного измерения температуры на основе BOTDA и использовать специальные алгоритмы обработки результатов измерений.

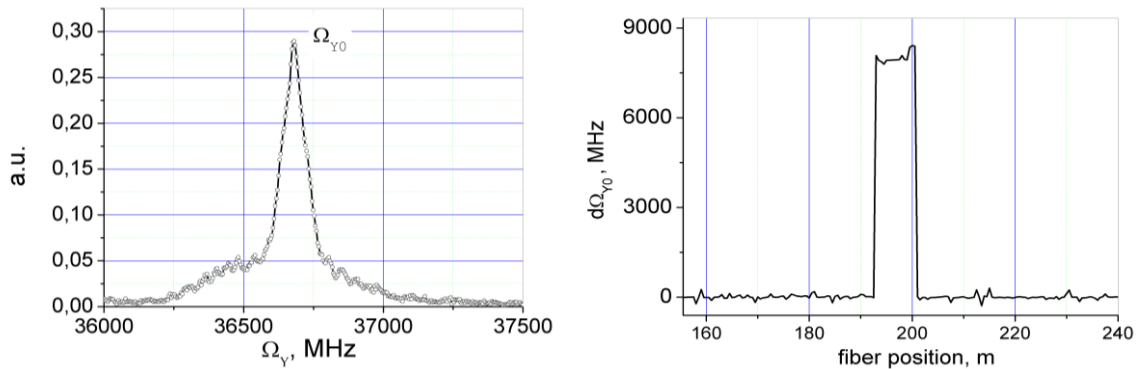


Рис. 1. а) Типичная зависимость амплитуды рассеянного сигнала в поляризации Y от частоты зондирующего сигнала для заданной координаты. б) Изменение резонансной частоты Ω_{y0} при изменении давления в барокамере (координаты 194-200 м)

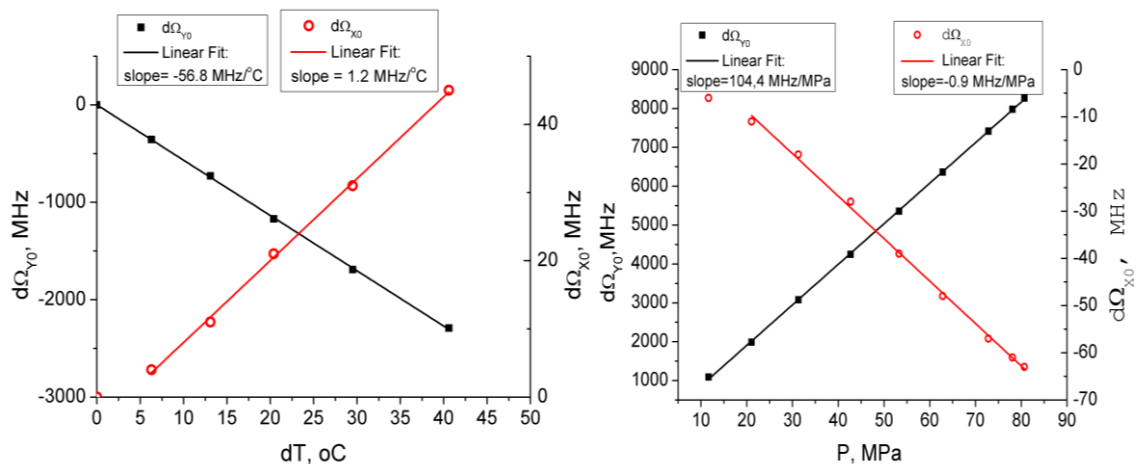


Рис. 2. Изменение резонансных частот Ω_{y0} и Ω_{x0} при изменении внешнего параметра а) температуры, б) давления

В заключение отметим, что изученная нами схема обеспечивает рекордные характеристики распределенного измерения статического давления: динамический диапазон измерений 1-800 атм, точность 0.5 атм, пространственное разрешение < 0.5 м, длина измерений более 500 м. Причем, судя по соотношению сигнал/шум в данных, длина измерений может быть заметно увеличена без модификации оптической схемы.

1. Bao, X., & Chen, L. (2011). Recent Progress in Brillouin Scattering Based Fiber Sensors. *Sensors*, 11(4), 4152–4187.
2. Wang J. Distributed pressure and temperature sensing based on stimulated Brillouin scattering (Doctoral dissertation, Virginia Tech).

3. Kim, Y. H., Kwon, H., Kim, J., & Song, K. Y. (2016). Distributed measurement of hydrostatic pressure based on Brillouin dynamic grating in polarization maintaining fibers. *Optics Express*, 24(19), 21399.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЕЙВЛЕТОВ ХААРА И ГАУССА 1^{ГО} ПОРЯДКА ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ «СОБЫТИЙ БЕЗ ОТРАЖЕНИЯ», СООТВЕТСТВУЮЩИХ СВАРНЫМ СОЕДИНЕНИЯМ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

^{1,2}Бурдин А.В., ¹Бурдин В.А., ²Дельмухаметов О.Р., ²Желудков М.А., ¹Зайцева Е.С.

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара
²ООО «ЛинкИн Тех», Уфа

Аннотация

В работе представлены результаты исследования пороговой чувствительности вейвлетов Хаара и Гаусса 1го порядка к «габаритам» локализуемого «события без отражения» характеристики обратного рассеяния, соответствующего сварному соединению оптических волокон (ОВ). Приведено описание разработанной и реализованной серии тестов, включающих в себя поэтапное многократное выполнение сварных соединений для одной и той же пары катушек ОВ. Показано, что использование перечисленных вейвлетов для анализа рефлектограммы обеспечивает идентификацию достаточно «малогабаритных» «событий», для которых вносимые потери соответствуют фактически собственной погрешности OTDR, составляющей 0.02 дБ, при выборе увеличенного значения скейлинга на нормированной диаграмме пространственного распределения коэффициентов вейвлета.

На сегодняшний день известно достаточно большое число публикаций, посвященных разработке вспомогательных методов анализа характеристик обратного рассеяния с применением известных подходов теории цифровой обработки сигнала. В этом смысле наиболее популярным является использование элементов вейвлет-анализа – достаточно давно известного, популярного и эффективного инструмента для обработки временных рядов сигналов систем разного назначения [1]. В оптической рефлектометрии данный подход активно используется для подавления шума характеристики обратного рассеяния, а также для решения задачи автоматизированной локализации обрыва (конца линии) или неоднородностей с Френелевским отражением при малом динамическом диапазоне OTDR [2 – 6], в отдельных случаях – регистрации «событий без отражения» при показаниях вносимых потерь OTDR от 0.05 дБ и выше [3, 6 – 8]. Однако при этом не снимается проблема локализации сварных соединений в условиях малого разброса коэффициентов обратного рассеяния, что нередко приводит к трудоемкому поиску такой неоднородности даже в ручном режиме непосредственно измерителем, а для ряда случаев – вообще невозможности ее локализации, обусловленной пределами разрешающей способности по уровню мощности потока обратного рассеяния самого средства измерения, который, для подавляющего большинства типовых коммерческих OTDR составляет 0.02 дБ. Все это приводит к необходимости проведения дополнительных исследований для последующего оценивания пороговой чувствительности того или иного вейвлета к «габаритам» локализуемого объекта рефлектограммы, соответствующего сварному соединению ОВ.

Для этой цели в рамках данной работы была проведена серия тестов, включающих в себя поэтапное выполнение 40 сварных соединений для одной и той же пары катушек с одномодовыми (SM) ОВ рек. ITU-T G.652, последующее измерение характеристик обратного рассеяния в направлениях А→Б и Б→А для каждого стыка, расстановку маркеров и снятие показаний OTDR, а также занесение в протокол факта корректной локализации этого стыка с помощью процедуры «автопоиска» ПО OTDR, а также результата визуальной

идентификации сварного соединения непосредственно самим измерителем. Длина первой катушки в направлении А→Б составляла порядка 2.2 км, второй – 4.2 км, соответственно. Первые 30 сварок выполнялись по типовой программе аппарата «SM–SM», предназначенной непосредственно для сращивания стандартных SM ОВ, последующие 10 сварок – по программе формирования аттенуатора. Измерения проводились в штатном режиме при длительности импульса 20 нс и OSNR на дальнем конце не менее 6.5 дБ. В результате было получено 80 показаний OTDR с вариацией в диапазоне значений по абсолютным величине от 0.002 до 0.554 дБ, из них более 40 «событий» с показаниями OTDR менее 0.04 дБ.

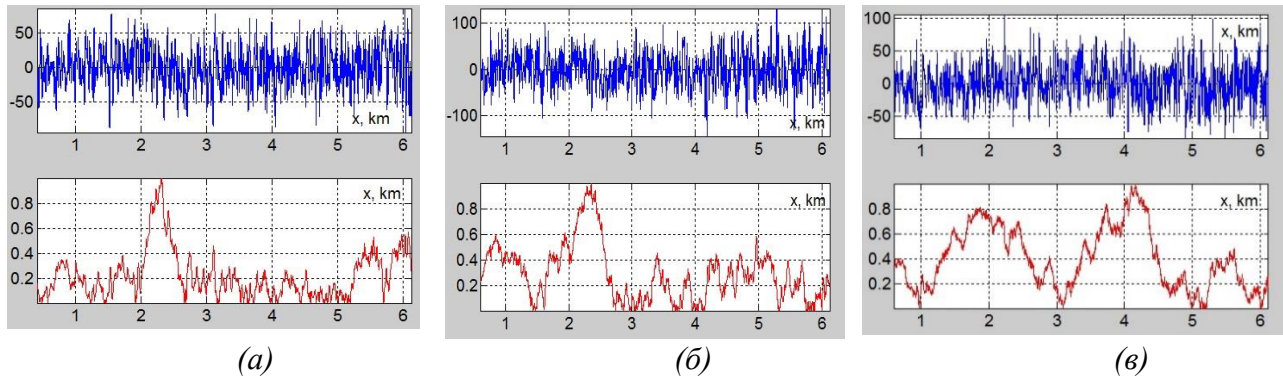


Рис. 1. Фрагменты рефлектограмм, содержащие сварное соединение, и соответствующие им нормированные диаграммы пространственного распределения абсолютных значений коэффициентов вейвлета Хаара: (а) +0.026 дБ, скейлинг 850; (б) +0.021 дБ, скейлинг 2100; (в) +0.015 дБ, скейлинг 2500 (условие «0.4» не выполняется)

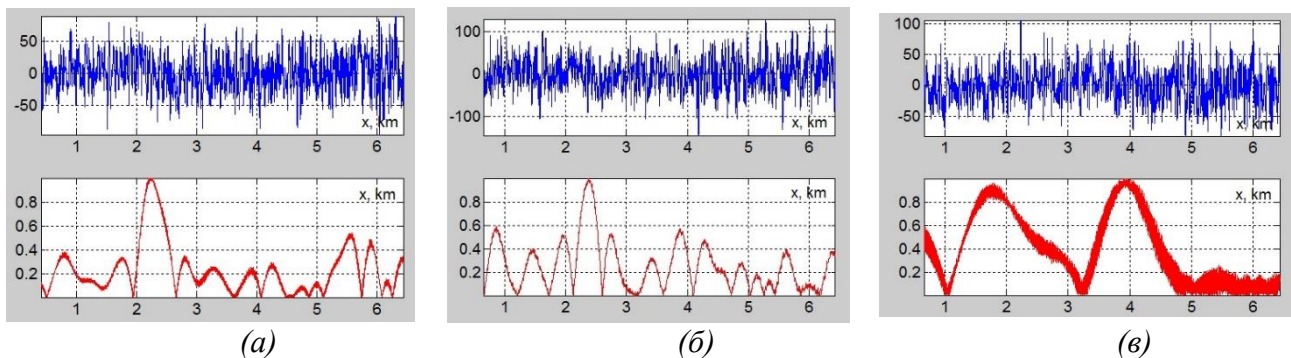


Рис. 2. Фрагменты рефлектограмм, содержащие сварное соединение, и соответствующие им нормированные диаграммы пространственного распределения абсолютных значений коэффициентов вейвлета Гаусса 1го порядка: (а) +0.026 дБ, скейлинг 250; (б) +0.021 дБ, скейлинг 220; (в) +0.015 дБ, скейлинг 700 (условие «0.4» не выполняется)

На следующем этапе для каждой из полученных рефлектограмм описанной одноволоконной макетной линии с двумя строительными длинами ОВ и одним сварным соединением предварительно удалялись Френелевское отражение на ближнем и дальнем конце, шумы на дальнем конце и LSA-тренд. Далее выполнялось непрерывное вейвлет-преобразование, по результатам которого осуществлялось построение полигона нормированных диаграмм пространственного распределения абсолютных значений коэффициентов выбранного вейвлета для разного скейлинга из диапазона 250...2500 для вейвлета Хаара и 50...800 для вейвлета Гаусса 1го порядка. При этом полагалось, что искомое «событие без отражения» зарегистрировано, если положение главного максимума данной пространственной диаграммы соответствует локации стыка, а разность между нормированными значениями главного максимума и прочих периферийных пиков диаграммы составляет не менее 0.4. При необходимости значение скейлинга уточнялось. Некоторые результаты вейвлет-анализа отдельных характеристик обратного рассеяния, содержащие «малогабаритные» «события без отражения», представлены на рис.1 (Хаар) и рис.2 (Гаусс 1-го порядка).

Согласно полученным результатам, непрерывный вейвлет анализ характеристики обратного рассеяния описанной макетной линии с применением указанных вейвлетов обеспечивает идентификацию достаточно «малогабаритных» «событий без отражения», соответствующих случаю качественного сварного соединения пары ОВ с близкими коэффициентами обратного рассеяния, для которых показания OTDR находятся в диапазоне 0.02...0.03 дБ и фактически совпадают с собственной погрешностью самого средства измерения. Даже для таких слабо проявленных «событий» при выборе соответствующего увеличенного значения скейлинга нормированной пространственной диаграммы удастся добиться искомой разности 0.4 между главным максимумом и прочими периферийными пиками.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям в рамках проекта №. 1621ГС1/24340 (код 0024340).

1. Stark H.-G. *Wavelets and signal processing*. – Berlin: Springer, 2005. – 158 p.
2. Gu Xia, Sablatash M. *Estimation and detection in OTDR using analyzing wavelets // Proceedings of IEEE Conference of Time-Frequency and Time-Scale Analysis*. – 1994. – P. 353 – 356.
3. Chaoju H., Jun L. *The application of wavelet transform in analysis of OTDR curve // 2nd IEEE International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. – 2010. – P. 216 – 219.
4. Wen-Gang H., Bao-Ji L., Lin Zh., Wie Y. *Study on the detection signal of OTDR based on wavelet denoising and approximate entropy // Proceedings of IEEE Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPOT)*. – 2012. – P. 12948029-1 – 12948029 -4.
5. Манонина И.В. *Использование вейвлет-анализа для оценки качества рефлектограмм // T-Comm*. – 2014. – №9. – С. 54 – 59.
6. Acar H. *Analysis of OTDR measurement data with wavelet transform // Advanced Research in Electrical & Electronics Systems*. – 2016. – vol. 1(1). – P. 1 – 5.
7. Иванов А.Б., Котляр С.С., Левченко А.С., Ташоян А.Ф. *Применение вейвлет-преобразования и нейронных сетей для локализации и идентификации сигналов в условиях шумов // Спецтехника и связь*. – 2010. – №2-3. – С. 52 – 57.
8. Zhang X., Zhaoy H., Sunz G., Cuix T. *Localization of non-reflective events in OTDR data combining DWT with template matching // 4th IEEE International Congress on Image and Signal Processing*. – 2011. – P. 2275 – 2279.

СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОПТИЧЕСКОМ КАБЕЛЕ

Дашков М.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара

Аннотация

В работе представлена система распределенного контроля вибрационных воздействий на оптическом кабеле, реализованная на базе системы мониторинга СМОК. Приведена схема и принцип работы когерентного рефлектометра. Приведены результаты анализа возможности выявления и локализации участка, подверженного вибрационным воздействиям, при зондировании импульсами различной длительности.

Волоконно-оптические системы распределенного контроля акустических и вибрационных воздействий находят широкое применение в таких приложениях, как спектральная скважинная шумометрия, мониторинг нефтегазовых скважин, системы охраны и мониторинга состояния трубопроводов, системы охраны периметра, контроль состояния

инженерных сооружений. На сегодняшний день подобные системы в основном реализуются на основе когерентной рефлектометрии во временной области [1-3]. При этом в научно-технической литературе представлены как системы, позволяющие только выявить и локализовать воздействие на оптический кабель, так системы, предоставляющие возможность полного восстановления параметров внешнего акустического воздействия.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования когерентного рефлектометра, реализованного на базе разработанной в ФГБОУ ВО ПГУТИ системы мониторинга оптического кабеля СМОК. При этом сохраняется стандартный функционал системы: привязка к геоинформационным системам, автоматическое выявление и оповещение об активности в охранной зоне кабеля. Структурная схема приведена на рисунке 1.

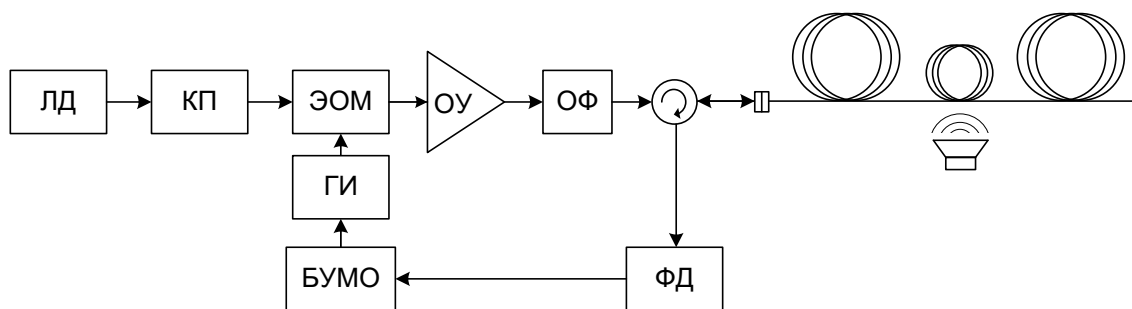


Рис. 1. Структурная схема когерентного оптического рефлектометра

В качестве источника оптического излучения используется лазерный диод (ЛД) с центральной длиной волны 1550.9 нм, шириной спектра менее 1 МГц и выходной мощностью 5 мВт. Для согласования ЛД с электро-оптическим модулятором (ЭОМ) используется контроллер поляризации (КП). Оптическое излучение поступает на ЭОМ, управляемый генератором импульсов (ГИ). ГИ позволяет формировать зондирующие импульсы заданной формы и длительности. Для увеличения мощности зондирующих импульсов используется эрбиевый оптический усилитель (ОУ). Для фильтрации шумов усиленного спонтанного излучения на выходе ОУ установлен оптический фильтр (ОФ) с центральной длиной волны 1550.92 нм и шириной полосы пропускания 0.4 нм. Для развязки прямого и обратного потоков используется оптический циркулятор. Сигнал обратного рассеяния фиксируется лавинным фотодиодом (ФД) и далее электрический сигнал обрабатывается в блоке управления и математической обработки (БУМО). В качестве чувствительного элемента использовалось одномодовое оптическое волокно рек. G.652.D. Общая протяженность макета составляла 12.5 км, тестовый участок длиной 253 м располагался на расстоянии 5.07 км от точки подключения. Участок подвергался вибрационным воздействиям с частотой от 50 до 200 Гц.

Измерения производились на длительностях импульса от 30 нс до 3 мкс. При этом последовательно снимался набор рефлектограмм. Минимальное время усреднения каждой реализации составляло 10 с, что связано с ограничением стандартной платформы системы СМОК. Однако даже при этих условиях была продемонстрирована возможность выявления и локализации вибрационных воздействий. Анализ полученных характеристик обратного рассеяния показал, что для длительностей импульса менее 100 нс в месте вибрационного воздействия наблюдаются существенные вариации уровня сигнала, в то время как на остальных участках изменения незначительные. При увеличении длительности зондирующего импульса наблюдалось снижение контрастности и закономерности изменялись – на участке, подверженном воздействиям, размах вариаций уровня сигнала снижался, по сравнению с остальными участками. На рисунке 2. приведены результаты измерения для импульсов 30 нс и 300 нс.

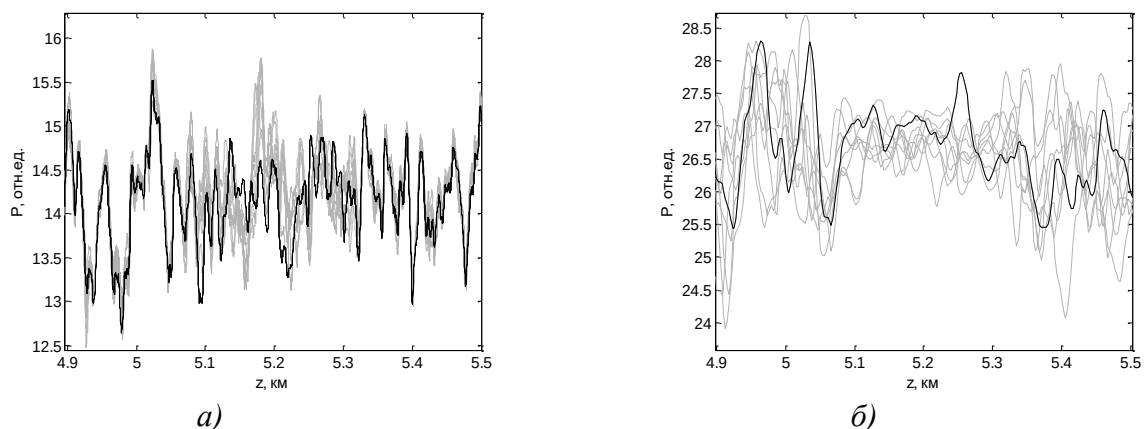


Рис. 2. Характеристики обратного рассеяния когерентного рефлектометра:
а) $\tau_i = 30$ нс; б) $\tau_i = 300$ нс

Для выявления и локализации участка, подверженного воздействию, был разработан следующий метод (при длительности импульса менее 100 нс). Для каждой пространственной координаты определялось среднеквадратическое отклонение уровня принимаемого сигнала от среднего значения, затем “скользящим окном” рассчитывались взаимные коэффициенты корреляции различных реализаций характеристик обратного рассеяния, полученные результаты сопоставлялись и по заданным пороговым значениям определялся участок воздействия. На рисунке 3. приведены результаты обработки данных, полученных при длительности импульса 30 нс.

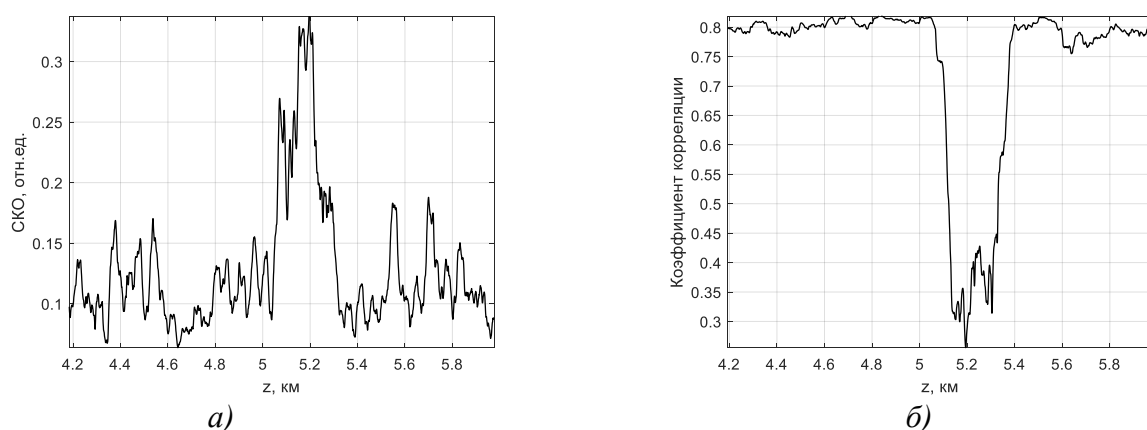


Рис. 3. Результаты обработки для $\tau_i = 30$ нс: а) среднеквадратическое отклонение уровня сигнала обратного рассеяния; б) распределение коэффициента корреляции

При использовании импульса 30 нс и размере окна обработки от 50 до 100 м погрешность локализации участка, подверженного воздействию, составила +27 метров. В докладе будут рассмотрены методы повышения точности локализации и быстродействия системы.

1. Juškaitis R. et al. Interferometry with Rayleigh backscattering in a single-mode optical fiber // Optics Letters, 1994. vol. 19. no.3. - pp. 225-227.
2. Горшков Б.Г. и др. Распределенный датчик внешнего воздействия на основе фазочувствительного волоконного рефлектометра// Квантовая электроника, 2006. т. 36, н.10, - с. 963-965.
3. Алексеев А.Э. и др. Когерентный фазочувствительный рефлектометр с дифференциальной фазовой модуляцией зондирующих импульсов// Квантовая электроника, 2006. т. 44, н.10, - с. 965-969.

ИЗУЧЕНИЕ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА – БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ, ЛЕГИРОВАННОМ ЭРБИЕМ

Богачков И.В.

Омский государственный технический университет, Омск

Аннотация

В работе приведены результаты экспериментальных исследований спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне, легированном эрбием, при различном уровне мощности входного сигнала. Приведены графики, полученные с помощью бриллюэновского рефлектометра. Проведены исследования изменения бриллюэновских рефлектограмм при изменении температуры волокна. Анализ результатов экспериментов выявил существенные отличия зависимостей, характерных для оптоволокна, легированного эрбием, от аналогичных зависимостей других разновидностей оптических волокон.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9334.2017/8.9).

Важной задачей ранней диагностики волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является получение информации о физическом состоянии их оптических волокон (ОВ). В основу метода бриллюэновской рефлектометрии положен анализ спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (СРМБ) в ОВ, компоненты которого обладают тем важным для практических применений свойством, что их частота (f_B) смещена на величину, пропорциональную степени натяжения ОВ и его температуре.

Появление ОВ, легированного эрбием, позволило создать эрбиевые оптические усилители, получившие широкое распространение в настоящее время. ОВ, легированное эрбием определенной концентрации, (EDF) является основой эрбиевых оптических усилителей, которые являются важным элементом волоконно-оптических систем передачи с волновым разделением каналов [1 – 3]. При введении в EDF излучения накачки от лазера повышенной мощности множество граничных электронов эрбия переходят от базового состояния на высокий энергетический уровень. При прохождении оптического сигнала с длиной волны 1.55 μm по этому EDF частицы из метастабильного состояния возвращаются на базовый уровень, что приводит к образованию фотонов, идентичных фотонам света сигнала, и приводит в итоге к усилению оптического сигнала.

Поскольку EDF могут иметь существенные различия в поведении характеристик СРМБ, представляет особый интерес исследование этих характеристик при различных уровнях мощности вводимого сигнала и изменениях температуры. Для изучения СРМБ в EDF были проведены экспериментальные исследования с бриллюэновским рефлектометром (BOTDR) «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура» [1 – 3].

В первом эксперименте световод был составлен из ОВ нормализующей катушки (G.652) и ОВ G.657, соединённого сваркой с ОВ-EDF (ОВ «HE-980» длиной 1 м), которое в свою очередь соединено с ОВ G.652.

На рисунке 1 представлена BOTDR рефлектограмма, показывающая распределение СРМБ вдоль световода. Места стыков (сварных соединений) ОВ на рисунке 1 хорошо заметны по резкому изменению СРМБ.

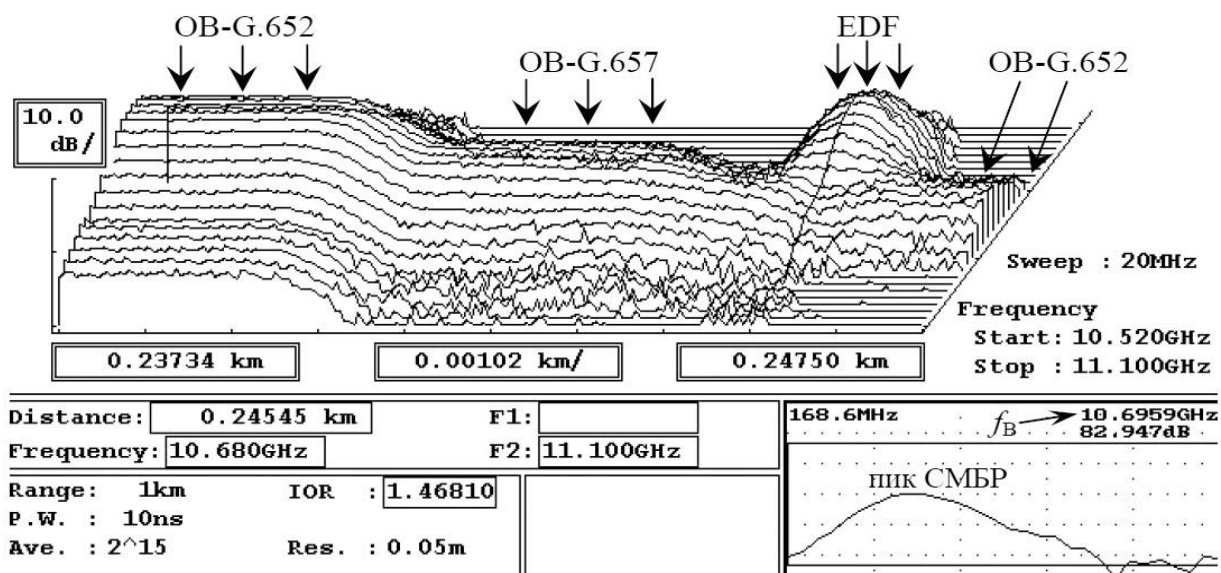


Рис. 1. BOTDR-рефлектограмма световода, содержащего EDF

На рисунке 2 приведена мульти-рефлектограмма (зависимости по длине световода натяжения (Strain), профиля СРМБ, ширины СРМБ и потерь, соответствующая BOTDR рефлектограмме, показанной на рисунке 1. Пик СРМБ (f_B) у EDF смещён на частоту 10.7 ГГц, при этом у OB-G.652 $f_B = 10.82$ ГГц, а у OB-G.657 $f_B = 10.83$ ГГц.

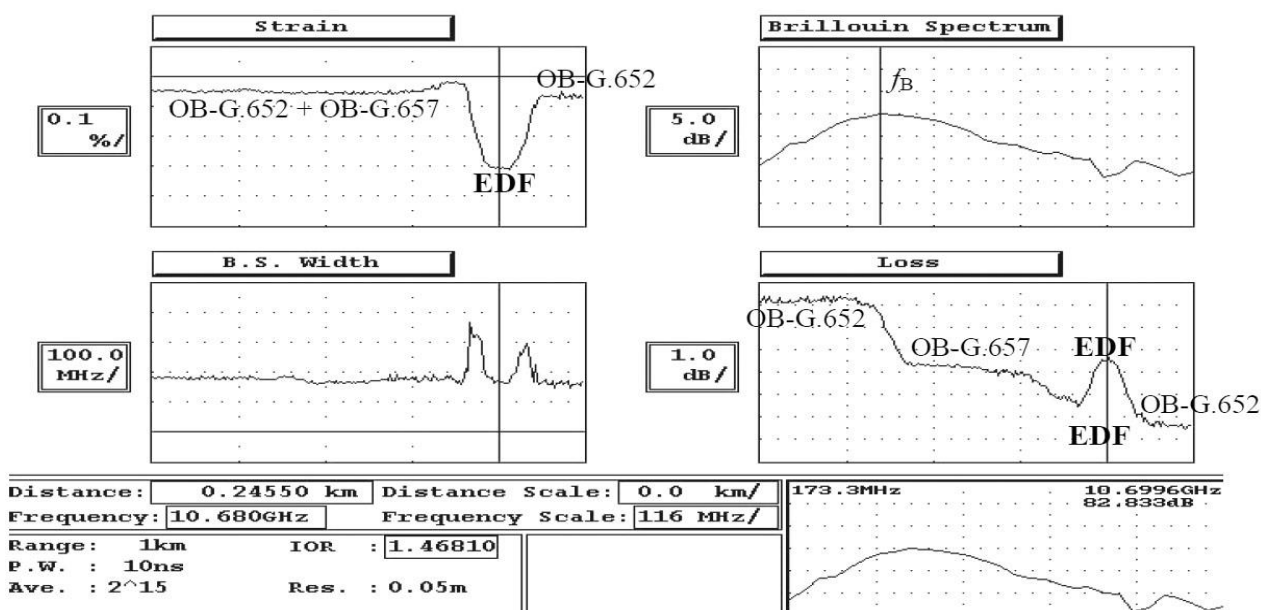


Рис. 2. Мульти-рефлектограмма световода, содержащего EDF

На рис. 3 приведена развёрнутая зависимость потерь (Loss) вдоль световода при повышенном уровне мощности сигнала, вводимого в OB. На рисунках 2 и 3 хорошо заметен подъём («горб») примерно на 3 дБ на характеристике потерь. Максимум этого «горба» совпадает с серединой EDF (рисунок 1 – рисунок 3). Подобные эффекты у OB других разновидностей не наблюдались. Мощность излучения накачки для EDF, используемого в EDFA, соизмерима с порогом проявления РМБ. При максимальной мощности излучения («High»), вводимого в OB, в начале исследуемого участка уровень сигнала составлял 43.5 дБ, подъём наблюдался до уровня 40.9 дБ.

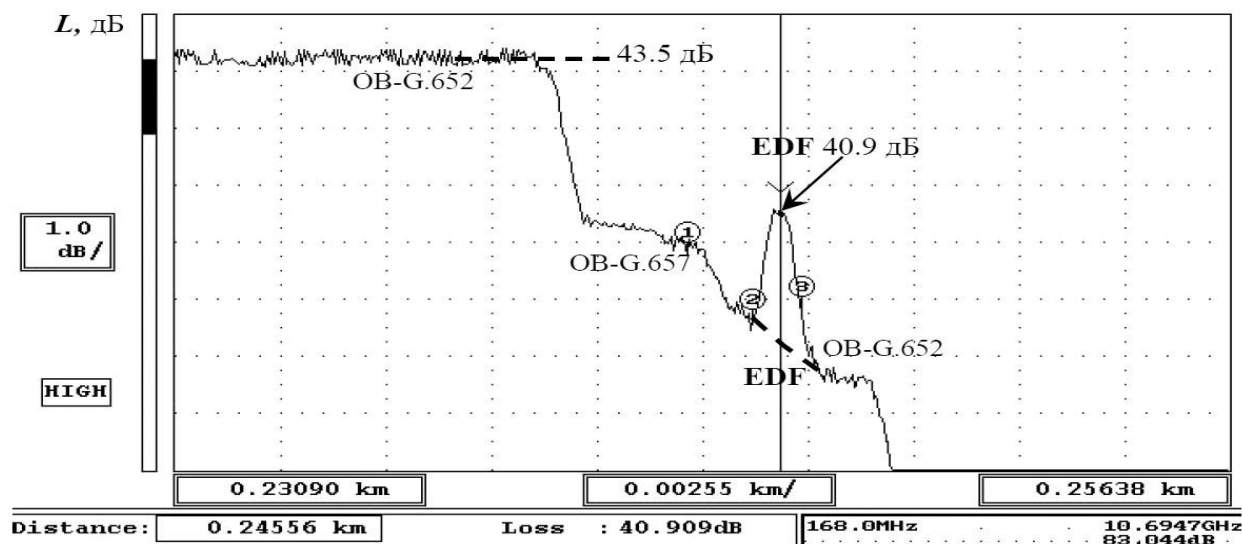


Рис. 3 Развернутая зависимость потерь вдоль световода, содержащего EDF

При изменении уровня мощности сигнала, вводимого в ОВ, данные эффекты (подъём характеристики на графике потерь на 3 дБ на расстоянии, которое соответствует середине EDF) сохранялись. При нормальном уровне вводимого сигнала («Norm») уровень сигнала в начале исследуемого участка составлял 43.0 дБ, а подъём наблюдался до уровня 40.0 дБ. При сниженном уровне сигнала («Low») этот уровень снизился до 41.7 дБ, а подъём наблюдался до уровня 38.5 дБ. Средние значения f_B и натяжений ОВ не изменились.

В следующих экспериментах световод, содержащий EDF (ОВ «HE-980»), помещался в камеру охлаждения или камеру нагрева. При изменении температуры от $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ бриллюэновский сдвиг частоты (f_B) для EDF изменился от 10.67 ГГц до 10.79 ГГц. Как и для ОВ других исследованных типов, в EDF наблюдалась линейная зависимость f_B и натяжения.

Полученные результаты экспериментов выявили существенные отличия зависимостей СРМБ EDF. На характеристиках потерь наблюдается подъём уровня на 3 дБ на расстоянии, соответствующем середине участка с EDF. Для участков, расположенных после участка, содержащего EDF, наблюдается снижение уровня регистрируемого сигнала.

Температурные характеристики f_B у EDF проходят выше соответствующих характеристик ОВ G.655, но ниже аналогичных характеристик G.657 и G.652 [1 – 3].

В дальнейшем предполагается исследование более длинного EDF, а также EDF при наличии излучения накачки.

1. Богачков И.В., Трухина А.И. Экспериментальные исследования особенностей рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в оптическом волокне, легированном эрбием // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов, 2017, Том 8, №3, С. 15 – 18.
2. Bogachkov I.V. Researches of the Mandelstam – Brillouin backscatter spectrum in the erbium-doped optical fiber // T-comm, 2017. vol. 11, no. 6, pp. 59 – 63.
3. Bogachkov I.V. Research Characteristics of the Mandelstam – Brillouin Scattering in Specialized Single-mode Optical Fibers // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2017 – Proceedings. – pp. 1 – 6.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ АРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СО ВСТРОЕННЫМИ ВОЛОКОННО-
ОПТИЧЕСКИМИ СЕНСОРАМИ ДЕФОРМАЦИИ**

Трегубов А.В., Новиков С.Г., Светухин В.В., Алексеев А.С.

ФБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», Ульяновск

Аннотация

Авторами разработана композитная арматура, сочетающая в себе функции силового армирующего элемента и распределенного датчика деформации. Изделие представляет собой стеклопластиковую арматуру, содержащую в себе оптическое одномодовое волокно. Разработанный сенсор обладает хорошей чувствительностью к деформациям, имеет высокое пространственное разрешение и одновременно выполняет функции элемента, армирующего монолитные конструкции.

Разработан и исследован композитный армирующий элемент для строительных конструкций со встроенным датчиком деформации [1], представляющий собой арматуру, выполненную по ГОСТ 31938-2012 с внедренным в нее оптическим волокном (рисунок 1). Датчик может использоваться [2] совместно с бриллюэновским оптическим импульсным анализатором, который позволяет проводить измерения как температуры, так и механических напряжений вдоль всей длины оптического волокна.

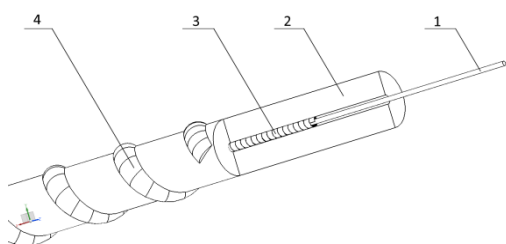


Рис. 1. Строение композитного элемента:

1 - оптоволокно, 2 - тело арматуры, 3 - защитный спиральный металлический рукав, 4 - прядь, стягивающая рукав

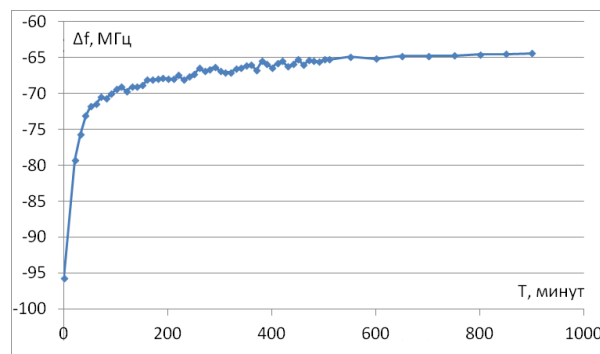


Рис. 2. Релаксация показаний датчика после снижения нагрузки

Предлагаемое решение имеет ряд преимуществ перед использованием в качестве датчика незащищенного волокна или оптического кабеля:

- внедрение в монолитные конструкции обеспечивает неподвижность датчика, что положительно влияет на качество измерений;
- происходит дополнительное усиление строительной конструкции, т.к. датчик сам по себе является армирующим элементом;

– большая теплоемкость монолитных конструкций сглаживает температурные колебания.

При использовании таких армирующих элементов в строительных конструкциях особое внимание уделяется их прочностным характеристикам. В случае совмещения армирующего элемента и волоконно-оптического сенсора важно знать границы применимости и оценивать поведение сенсора при экстремальных нагрузках. В данной работе проведены исследования разработанного элемента под растягивающими и изгибающими нагрузками.

Для проверки наличия переходных процессов сенсор диаметром 5 мм и длиной 1 м выдерживался под растягивающей нагрузкой 2000Н в течение 20 часов, после чего нагрузка снижалась до 400 Н. Показания сенсора снимались каждые 10 минут после снижения нагрузки. С течением времени наблюдалось уменьшение модуля сдвига частоты (рисунок 2).

Переходный процесс, вероятно, вызван релаксацией стеклопластиковой арматуры [3].

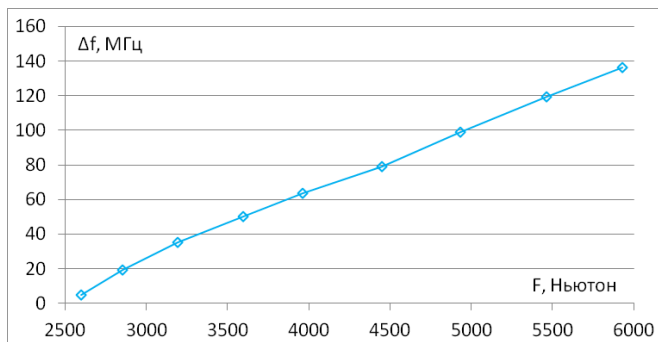


Рис. 3. Зависимость сдвига частоты от приложенной нагрузки при $t=100^{\circ}\text{C}$

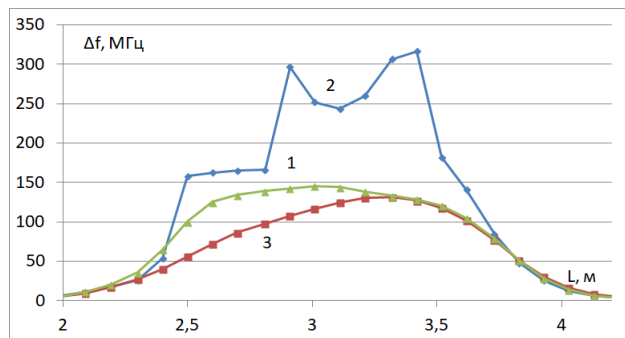


Рис. 4. Распределения сдвига частоты по длине чувствительного элемента при растрескивании. 1 – 6400 Н, до растрескивания, 2 – 7400 Н, 1 минута после, 3 – 7400 Н, 12 часов после растрескивания

С учетом времени релаксации получен график зависимости показаний датчика от величины растягивающей нагрузки. График имеет линейный характер в широком диапазоне нагрузок (рисунок 3).

При повышении нагрузки до 7000Н в теле сенсорного элемента начинается растрескивание, вызывая резкое изменение характера распределения напряжений (рисунок 4).

Видно, что начало процесса разрушения сенсора сопровождается скачкообразным изменением характера распределения сдвига частоты по длине сенсора. Однако, с течением времени, за счет процессов релаксации пики сглаживаются и определение наличия трещин затрудняется.

Для проверки чувствительности сенсора к поперечным деформациям проведен следующий эксперимент [4] (рисунок 5):

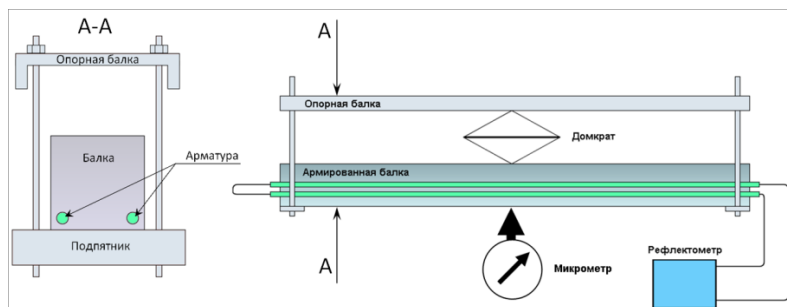


Рис. 5. Схема эксперимента с армированной балкой

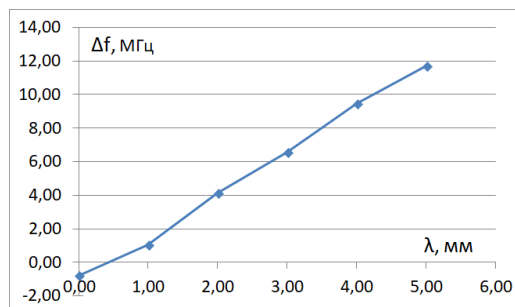


Рис. 6. Сдвиг частоты от величины стрелы прогиба балки

Из бетона М300 изготовлена балка длиной 3 метра, сечением 0,1х0,1 м. Балка армирована двумя отрезками композитной арматуры со встроенным датчиком деформации. Величина прогиба балки задается домкратом и контролируется микрометром.

Из полученных результатов видно, что зависимость сдвига спектра от величины прогиба имеет линейный характер (рисунок 6). Для данной конфигурации эксперимента величина чувствительности составляет 2,5 МГц на 1 мм прогиба.

Таким образом, разработанный волоконно-оптический сенсор деформации для строительных конструкций является работоспособным, высокочувствительным оптическим элементом и может использоваться в составе систем мониторинга состояния строительных объектов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (шифр проекта RFMEFI57714X0074)

1. Патент РФ № RU 175 872 U1 Волоконно-оптический сенсор температуры и деформации для строительных конструкций. / А.В. Трезубов, С.Г. Новиков [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Ульяновский гос. Университет». - № 2016126903; заявл. 04.07.2016; опубл. 21.12.2017 бюл. № 36.
2. А.В. Трезубов, С.Г. Новиков [и др.]. «Комплекс мониторинга состояния сухих хранилищ отработанного ядерного топлива», Автоматизация процессов управления №2 (48) 2017, с. 62-71.
3. Михайлов К.В., Вильдавский Ю.М., «Исследования релаксации и ползучести стеклопластиковой арматуры» Новые виды эффективной стальной и стеклопластиковой арматуры для железобетонных и армированных бетонных конструкций, Москва, Стройиздат, 1966, С. 177-192.
4. Tregubov, A.V., Svetukhin, V.V., Novikov, S.G., Berintsev, A.V., Prikhodko, V.V., A Novel Fiber Optic Distributed Temperature and Strain Sensor for Building Applications, Results in Physics (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2016.01.008>

РАЗРАБОТКА ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКИ С АПОДИЗАЦИЕЙ НА НИТРИДЕ КРЕМНИЯ С ПИКОМ ОТРАЖЕНИЯ НЕ БОЛЕЕ 2 НМ

¹Москалев Д.Н., ²Салгаева У.О., ³Пономарев Р.С.

¹Пермская научная производственная приборостроительная компания, Пермь

²МИП Пермские нанотехнологии

³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

Аннотация

В работе представлены результаты моделирования низко контрастной дифракционной решетки с гауссовой аподизацией на основе волноводов из нитрида кремния (Si₃N₄) с пиком отражения не более 2 нм, которая может быть использована в качестве чувствительного элемента датчиков физических величин. Для моделирования были выбраны метод матрицы передачи и метод двунаправленного распространения собственной моды (Bidirectional eigenmode propagation, BEP).

Разработка компактных датчиков физических (температура, давление, вибрация) величин с применением решений интегральной фотоники, устойчивым к электромагнитным помехам, работающим в широком диапазоне измеряемых величин является важной задачей инженерной науки. Тот или иной тип чувствительного элемента определяет эффективность датчика, возможность мультиплексирования сигнала и простоту технической реализации системы мониторинга.

На этапе проектирования такого рода устройства важным аспектом является численное моделирование распространения электромагнитного излучения. Основным методом моделирования, применяемым в работе, стал метод матрицы передачи [1,2]. В рамках поставленных задач было необходимо разработать дифракционную решетку с пиком отражения не более 2 нм. Узкий пик отражения позволит детектировать даже незначительные изменения измеряемой величины.

Для получения узкого пика отражения необходимо чтобы модуляция показателя преломления дифракционной решетки проявлялась в 2-5 знаке после запятой. Был выбран вариант реализации устройства, при котором изменение показателя преломления достигалось размещением по обе стороны Si₃N₄ волновода прямоугольников из того же материала с рассчитанными параметрами.

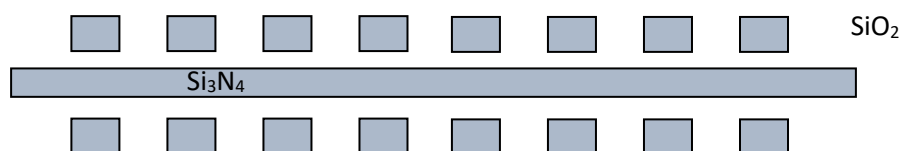


Рис. 1. Схема низкоконтрастной Si₃N₄ дифракционной решетки на SiO₂ подложке

Размеры прямоугольниками составили 1200×241 нм (ш.,д.), расстояние от волновода до прямоугольника, обеспечивающее оптическую связь, 1500 нм, период решетки 482 нм. Такая конфигурация обеспечила модуляцию показателя преломления в четвертом знаке. Также для сужения детектируемого пика и срезания паразитных лепестков отражения была применена гауссова аподизация [3]. Ее суть заключается в дополнительной модуляции показателя преломления в результате изменения расстояния между прямоугольниками и волноводом вдоль длины решетки. Иными словами, коэффициент оптической связи между прямоугольниками и волноводом вдоль решетки изменяется по определенному закону, в данном случае – функции Гаусса.

Результаты моделирования удовлетворили заявленным требованиям, полуширина пика отражения составила 0,2 нм.

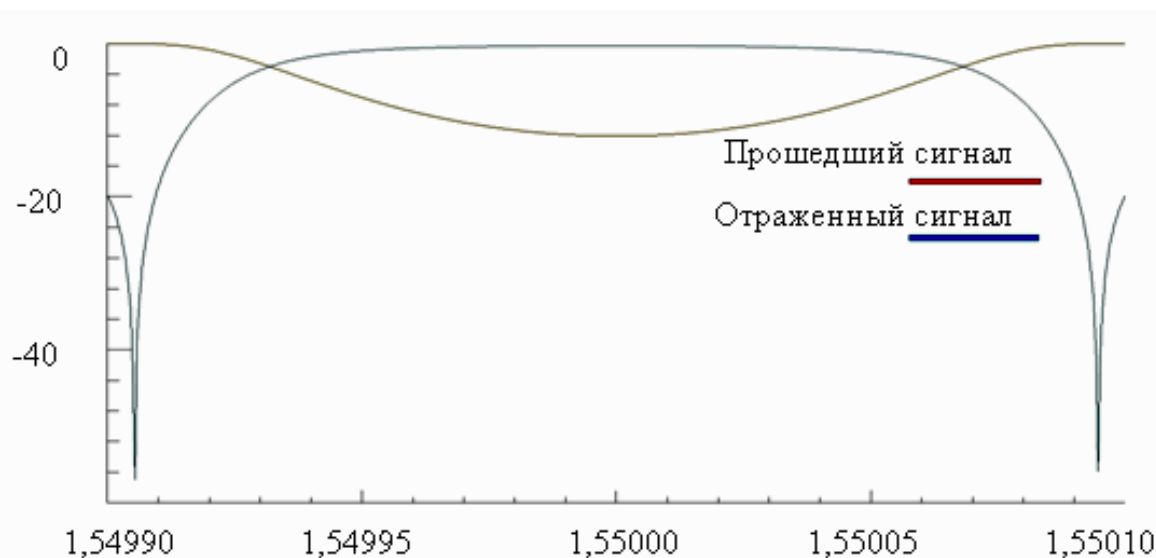


Рис. 2. Пики отражения и пропускания дифракционной решетки смоделированные методом матрицы передачи (Число периодов $N = 19500$)

Предполагается, что внесенные при производстве дефекты (сглаживание прямоугольников, наклон и шероховатость стенок волновода) не окажут сильного влияния на отраженный сигнал.

1. Harmeet Singh and Mark Zippin, *Apodized fiber bragg gratings for DWDM applications using uniform phase mask* - ECOC'98, 20-24 September 1998, Madrid, Spain
2. Jir'í Čtyrský, *Improved Bidirectional-Mode Expansion Propagation Algorithm Based on Furier Series* – Journal of lightwave technology, vol. 25, No. 9, September 2007.
3. G. Sztefka and H. P. Nolting, *Bidirectional Eigenmode Propagation for Large Refractive Index Steps* – IEEE Photonics technology letters, vol. 5, No.5, May 1993

**АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ:
МАЛОСЕНСОРНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

¹Сахабутдинов А.Ж., ^{1,2}Морозов О.Г., ¹Нуреев И.И., ¹Кузнецов А.А.,
¹Куликов Е.В., ³Феофилактов С.В., ⁴Мисбахов Р.Ш.

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань

²ООО «Микрофарм-КАИ», Казань

³ДООО «ИРЗ-ТЭК», Ижевск

⁴Казанский государственный энергетический университет, Казань

Аннотация

Отдельный интерес представляет собой сдвоенный сенсор на адресных ВБР, как совмещенный датчик, скажем, температуры и давления в концевом отсеке нефтяной скважины. В сдвоенном сенсоре одна из адресных ВБР является датчиком температуры, а вторая – давления (или деформации). Применение совмещенных датчиков оправдано, поскольку на датчик давления (или деформации) помимо механических деформационных нагрузок оказывает влияние и температура окружающей среды, учет компенсации которой необходимо вести по показаниям датчика температуры. Интересна разработка системы измерения скорости выстрела на выходе из ствола орудия, выполненных в то время, когда снаряд еще находится в проходном отверстии, с использованием поверхностно установленного сдвоенного сенсора на адресных ВБР. Возможность контролировать в полевых условиях, в реальном времени скорость снаряда на выходе для орудий среднего и большого калибра необходима для улучшения дальности прицельной стрельбы, определения состояния ствола, и возможности автоматического программирования взрывателя. В работе рассмотрены сдвоенный сенсор на адресных ВБР, как частный случай массива точечных адресных сенсоров.

Адресные ВБР подробно описаны в [1]. Рассмотрим подход, позволяющий определить амплитуды сдвоенного сенсора на адресных ВБР, без предварительного частотного анализа, основываясь только на данных с фотоприемника. Аналитическое выражение (1) для сложного сигнала на фотоприемнике является явной параметрической записью подгоночной функции, применяемой в методах анализа и восстановления сигналов, параметры которой можно восстановить известным методом наименьшего квадратичного приближения.

$$\begin{aligned}
P(A_1, A_2, \omega_1 - \omega_2, t) = & A_1^2 + u(A_1\Omega_1 + A_2\Omega_2) + A_2^2 + u^2 \frac{\Omega_1^2 + \Omega_2^2}{2} + \\
& + A_1(A_1 + u\Omega_1)\cos(\Omega_1 t) + \\
& + A_2(A_2 + u\Omega_2)\cos(\Omega_2 t) + \\
& + A_1 A_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \\
& + A_1(A_2 + u\Omega_2)\cos((\omega_1 - \omega_2 - \Omega_2)t) + \\
& + (A_1 + u\Omega_1)A_2 \cos((\omega_1 - \omega_2 + \Omega_1)t) + \\
& + (A_1 + u\Omega_1)(A_2 + u\Omega_2)\cos((\omega_1 - \omega_2 + \Omega_1 - \Omega_2)t) .
\end{aligned} \tag{1}$$

Рассмотрены два адресных датчика (ВБР с двумя фазовыми π -сдвигами) с разностями частот Ω_1 и Ω_2 , с положением левых окон прозрачности, определенных π -сдвигами, на ω_1 и ω_2 , а правых – на частотах $\omega_1 + \Omega_1$ и $\omega_2 + \Omega_2$, соответственно. Параметрами подгоночной функции (1) являются неизвестные величины коэффициентов окон прозрачности A_1 , A_2 и $\omega_1 - \omega_2$, при известных значениях u – угла наклона линейного косоугольного фильтра, установленного перед фотоприемником, Ω_1 и Ω_2 – разностей частот для фазовых π -сдвигов адресных датчиков на ВБР1 и ВБР2.

Поиск значений A_1 , A_2 и $\omega_1 - \omega_2$ будем вести методом наименьших квадратов, минимизировав функционал $\Psi(A_1, A_2, \upsilon)$, где для упрощения записи введено обозначение $\upsilon = \omega_1 - \omega_2$:

$$\Psi(A_1, A_2, \upsilon) = (P_m - P(t_m))^2 \rightarrow \min, \quad \forall m = \overline{1, M} \tag{2}$$

где P_m – значения мощности светового потока, полученные с фотоприемника в момент времени t_m , а $P(t_m)$ – предполагаемые точные значения, получаемые от подгоночной функции при t_m , M – количество по времени отсчетов, по которым строится подгоночная функция.

Следовательно, достаточно подобрать такие значения A_1 , A_2 , υ , при которых (1) максимально точно описывает исходный сигнал с фотоприемника. Обратим внимание на то, что в случае восстановления параметров сигнала по заранее аналитически заданной функции, отсутствует необходимость использования частотной фильтрации сигнала.

Согласно методу наименьших квадратов, условия минимума (2) заключаются в равенстве нулю частных производных от $\Psi(A_1, A_2, \upsilon)$ по A_1 , A_2 , υ :

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi(A_1, A_2, \upsilon)}{\partial A_1} = 2(P_m - P(t_m)) \frac{\partial P(t_m)}{\partial A_1} = 0 \\ \frac{\partial \Psi(A_1, A_2, \upsilon)}{\partial A_2} = 2(P_m - P(t_m)) \frac{\partial P(t_m)}{\partial A_2} = 0 \\ \frac{\partial \Psi(A_1, A_2, \upsilon)}{\partial \upsilon} = 2(P_m - P(t_m)) \frac{\partial P(t_m)}{\partial \upsilon} = 0 \end{cases} . \tag{3}$$

Условия минимума функционала (2), записанные в форме (3), являются системой из трех уравнений для поиска трех неизвестных переменных. Выпишем частные производные от подгоночной функции:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(t)}{\partial A_1} = & 2(2A_1 + u\Omega_1) \cos^2\left(\frac{\Omega_1 t}{2}\right) + \\ & + A_2 (\cos(vt) + \cos((v + \Omega_1)t)) \\ & + (A_2 + u\Omega_2) (\cos((v - \Omega_2)t) + \cos((v + \Omega_1 - \Omega_2)t)) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(t)}{\partial A_2} = & 2(2A_2 + u\Omega_2) \cos^2\left(\frac{\Omega_2 t}{2}\right) + \\ & + A_1 (\cos(vt) + \cos((v - \Omega_2)t)) + \\ & + (A_1 + u\Omega_1) (\cos((v + \Omega_1)t) + \cos((v + \Omega_1 - \Omega_2)t)) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(t)}{\partial v} = & -A_1 A_2 \sin(vt) - \\ & - A_1 (A_2 + u\Omega_2) \sin((v - \Omega_2)t) + \\ & - A_2 (A_1 + u\Omega_1) \sin((v + \Omega_1)t) + \\ & - (A_1 + u\Omega_1) (A_2 + u\Omega_2) \sin((v + \Omega_1 - \Omega_2)t) \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя выражение для подгоночной функции (1) и ее частные производные (4) – (6) в систему уравнений (3) получим систему из трех уравнений с тремя неизвестными относительно A_1 , A_2 , $v = \omega_1 - \omega_2$, которую можно решить численно, определив тем самым амплитуды A_1 , A_2 , и расстояние между двумя адресными датчиками – v относительно косого фильтра с пересчетом в физические величины.

Точечный датчик температуры и давления переназначен для непрерывного измерения температуры и давления в точке расположения датчика в скважине. Регистрация забойного давления осуществляется датчиком давления, установленным в мандрели под погружным насосом на глубине. Параметры регистрации также соответствуют 1%-ной дискретности измерения требуемой величины.

Основной функцией волоконно-оптической системы измерения скорости снаряда на выходе является измерение пройденного времени волной кольцевой деформации ствола при прохождении каждого из двух адресных датчиков деформации, установленных на поверхности ствола. Ожидаемые уровни деформаций и интенсивность деформаций, создаваемые во время реальной стрельбы, важны для проектирования оптической системы. Исходя из результатов реальных огневых испытаний, максимальные уровни деформаций в предполагаемых местах расположения датчиков для орудий оцениваются в диапазоне 600–1000 $\mu\epsilon$ и скорости деформации до 500 $\mu\epsilon/\text{мкс}$. Следовательно, требование по разрешающей способности деформации для системы, с тем, чтобы соответствовать 1%-ной дискретности измерения скорости, составляет 100 $\mu\epsilon$.

Для извлечения измерительной информации необходимо простое и оптоэлектронное преобразование без использования сложных спектральных или интерференционных интеррогаторов. Возможно использование радиофотонного двухчастотного сканирования адресных ВБР [1-6].

1. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 84-91.
2. Natanson O.G., Morozov O.G., Akhtiamov R.A., Gusev V.F. // *Proc. SPIE*. – 2005. – V. 5854. – pp. 215-223.
3. Морозов О.Г. и др. // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2012. – № 4. – С. 146-149.
4. Сахабутдинов А.Ж. и др. // *Нелинейный мир*. – 2015. – Т. 13. – № 8. – С. 32-38.
5. Морозов О.Г. и др. // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 95-100.

6. Талипов А.А. и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 2 (16). – С. 3-12.

АДРЕСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ БРЭГГОВСКИЕ РЕШЕТКИ: МНОГОСЕНСОРНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

¹Сахабутдинов А.Ж., ^{1,2}Морозов О.Г., ¹Нуреев И.И., ¹Кузнецов А.А.,
¹Пуртов В.В., ¹Казаров В.А., ³Феофилактов С.В., ⁴Мисбахов Р.Ш.,
⁵Алексеев В.Н., ⁵Иваненко В.А.

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань

²ООО «Микрофарм-КАИ», Казань

³ДООО «ИРЗ-ТЭК», Ижевск

⁴Казанский государственный энергетический университет, Казань

⁵АО НПО Каскад, Чебоксары

Аннотация

Отдельный интерес представляет собой последовательное соединение нескольких сенсоров на адресных ВБР-датчиках, как совмещенный датчик коэффициента преломления, температуры и деформации в аккумуляторной батарее или температуры и деформации в катетере для манометрии высокого разрешения. Применение совмещенных датчиков оправдано, поскольку на датчик давления (или деформации) помимо механических деформационных нагрузок и датчик рефракции оказывает влияние и температура окружающей среды, учет компенсации которой необходимо вести по показаниям датчика температуры. Интересна разработка системы измерения температуры электрических контактов комплектных распределительных устройств. Возможность контролировать температуру под высоким напряжением в реальном времени необходима как отдельно, так и при совмещении с контролем процесса дугообразования, что в настоящее время осуществляется безадресно. Количество датчиков может достигать десятков единиц. В работе рассмотрены принципы определения параметров физических полей в случае использования массива точечных адресных сенсоров.

Каждый датчик в массиве обладает собственной уникальной характеристикой – частотой разноса между двумя фазовыми π -сдвигами. Выведем соотношения, позволяющие определить положение каждой адресной ВБР из массива, опираясь на частотное детектирование на уникальных частотах, свойственных этим датчикам.

Узкополосная фильтрация сигнала

Для этого определим узкополосный частотный фильтр, задав его в виде оператора, аналитический вид которого запишем в форме закона нормального распределения:

$$D(\Omega^*) = e^{-\frac{(\Omega^* - \nu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

За Ω^* в выражении (1) обозначена частота фильтрации, ν – все частоты в системе, а σ – параметр добротности частотного фильтра. Очевидно, что ширина узкополосного фильтра определяется параметром σ , с уменьшением значения σ , уменьшается и ширина пропускания фильтра (1). Основное свойство оператора (1) заключается в том, что он почти везде равен

нулю, за исключением малой окрестности точки Ω^* , где он равен единице. Величина этой окрестности как раз и определяется параметром σ .

Применим оператор (1) к световому потоку на фотоприемнике, задав зондируемым частотам значения Ω_j , $j = 1, N$. Где Ω_j – суть собственные частоты адресных ВБР-датчиков. Введение индекса j необходимо в математической записи для того, чтобы отличить частоты, на которых будет проводиться зондирование, от частот, фигурирующих во временном выражении фототока. Поскольку в общем случае они могут и не совпадать. Результат зондирования на частоте Ω_j запишется в виде:

$$P(t)|_{\Omega_j} = \sum_{i=1}^N A_i B_i e^{-\frac{(\Omega_j - \Omega_i)^2}{2\sigma^2}} \cos(\Omega_i t) + \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \begin{pmatrix} A_i A_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k|)^2}{2\sigma^2}} \cos((\omega_i - \omega_k)t) + \\ A_i B_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k - \Omega_k|)^2}{2\sigma^2}} \cos((\omega_i - \omega_k - \Omega_k)t) + \\ B_i A_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k + \Omega_i|)^2}{2\sigma^2}} \cos((\omega_i - \omega_k + \Omega_i)t) + \\ B_i B_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k|)^2}{2\sigma^2}} \cos((\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k)t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Система уравнений для поиска положений всех 2π -ВБР в массиве

То свойство оператора (1), что он почти везде равен нулю, кроме окрестности Ω_j , – позволяет переписать выражение для светового потока после фильтрации (2) в виде соотношения для амплитуд (3). Дополнительно к (2) в (3) к нулю приравняется не абсолютная, а относительная погрешность измерений, что облегчает математический метод поиска решения:

$$\frac{1}{D_j} \left(A_j B_j + \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \begin{pmatrix} A_i A_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k|)^2}{2\sigma^2}} + \\ A_i B_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k - \Omega_k|)^2}{2\sigma^2}} + \\ B_i A_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k + \Omega_i|)^2}{2\sigma^2}} + \\ B_i B_k e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k|)^2}{2\sigma^2}} \end{pmatrix} - D_j \right) = 0 \quad (3)$$

С учетом зависимости амплитуд от уравнения косого фильтра, запишем:

$$\begin{aligned} A_i &= u\omega_i + v & B_i &= u\omega_i + u\Omega_i + v \\ A_k &= u\omega_k + v & B_k &= u\omega_k + u\Omega_k + v \end{aligned} \quad (4)$$

В обозначениях (4) перепишем выражение (3) в виде (5) для $j = \overline{1, N}$. Поскольку ВБР-датчиков в системе N штук, то и соотношений (5) будет такое же количество. Обратим внимание на то, что для (5) справедливо выполнение условий (6). Выполнение условий фильтра гарантируют нам равенство нулю всех слагаемых в двойной сумме выражения (5), если степень при экспоненте в члене этой суммы отличается от нуля.

$$\frac{1}{D_j}(u\omega_j + v)(u\omega_j + u\Omega_j + v) +$$

$$+ \frac{1}{D_j} \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \left(\begin{aligned} & (u\omega_i + v)(u\omega_k + v)e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k|)^2}{2\sigma^2}} + \\ & (u\omega_i + v)(u\omega_k + u\Omega_k + v)e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k - \Omega_k|)^2}{2\sigma^2}} + \\ & (u\omega_i + u\Omega_i + v)(u\omega_k + v)e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k + \Omega_i|)^2}{2\sigma^2}} + \\ & (u\omega_i + u\Omega_i + v)(u\omega_k + u\Omega_k + v)e^{-\frac{(\Omega_j - |\omega_i - \omega_k + \Omega_i - \Omega_k|)^2}{2\sigma^2}} \end{aligned} \right) - 1 = 0 \quad (5)$$

$$\omega_j = \omega_i, \forall i = j, \quad \omega_j = \omega_k, \forall j = k, \quad \omega_i = \omega_k, \forall i = k \quad (6)$$

И только в том случае, если степень при экспоненте равна нулю (что и является условием фильтра), обеспечивает нам вклад этого слагаемого с множителем равным единице. Иными словами, вклад в амплитуду зондирования – вклад от двойной суммы в (5) возникает только в том случае, когда взаимное расположение датчиков в системе предполагает частотное расстояние между ними в Ω_j .

В системе уравнений (5) известными величинами являются: Ω_j – частоты адресных ВБР- датчиков; u и v – параметры косого фильтра; σ – параметр узкополосного фильтра. Неизвестными величинами в (5) являются только $\omega_i, i = \overline{1, N}$, и количество уравнений в (5) – N штук, что обеспечивает нам замкнутую систему из N нелинейных уравнений относительно нахождения N переменных ω_i .

Для извлечения измерительной информации необходимо простое и оптоэлектронное преобразование без использования сложных спектральных или интерференционных интеррогаторов. Возможно использование радиофотонного двухчастотного сканирования адресных ВБР [1-6].

1. Пуртов В.В. и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 4. – С. 92-95.
2. Садыков И.Р. и др. // Труды МАИ. – 2012. – № 61. – С. 18.
3. Мисбахов Р.Ш. и др. // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2. URL: ivdon.ru/archive/n3y2017/4343/.
4. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 84-91.
5. Казаров В.Ю., Морозов О.Г. // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2016. – №8. – С. 34-41.
6. Морозов О.Г. и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 146-149.
7. Сахабутдинов А.Ж. и др. // Нелинейный мир. – 2015. – Т. 13. – № 8. – С. 32-38.
8. Морозов О.Г. и др. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15. – № 3. – С. 95-100.
9. Талипов А.А. и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 2 (16). – С. 3-12.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПО БРИЛЛЮЭНОВСКИМ РЕФЛЕКТОГРАММАМ

¹Богачков И.В., ¹Иниватов Д.П., ¹Киреев А.П., ²Горлов Н.И.

¹Омский государственный технический университет, Омск

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Новосибирск

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы классификации разновидностей оптических волокон по рефлектограммам, полученным с помощью бриллюэновского импульсного рефлектометра. Представлена программа для автоматизированного определения типа оптического волокна по бриллюэновской рефлектограмме. Приведены значения бриллюэновского сдвига частоты для некоторых разновидностей оптических волокон. Практическую полезность представляет возможность автоматически классифицировать по рефлектограмме оптические волокна по разновидностям и производителям. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9334.2017/8.9).

С помощью бриллюэновских оптических импульсных рефлектометров (BOTDR) можно получить распределение спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (СРМБ) в ОВ. Определив положение максимума в профиле СРМБ, можно определить величину бриллюэновского сдвига частоты (f_B), а затем, натяжение вдоль ОВ [1 – 3]. Для обнаружения участков с изменённой температурой и натяжением желательнее иметь эталонную BOTDR-рефлектограмму для исследуемого ОВ при нормальных условиях (при комнатной температуре и при отсутствии механических напряжений). Наличие такой рефлектограммы упрощает своевременное обнаружение «проблемного» участка в ОВ, а значит, устранение проблемной ситуации в волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) до разрушения ОВ [2, 3].

База данных профилей СРМБ волокон различных типов и производителей позволяет классифицировать ОВ в ВОЛС, а также обнаруживать дефектные участки [2, 3].

Описанная ниже программа была разработана с целью быстрого, точного и удобного определения типа ОВ по BOTDR-рефлектограмме.

Процесс работы программы состоит в загрузке пользователем изображения рефлектограммы в формате *.bmp (800x600 пикселей). Необходимая область для анализа «вырезается» программой по шаблону, и формируется профиль СРМБ ОВ. При анализе «вырезанного» изображения происходит попиксельное чтение рефлектограммы.

Программа может анализировать изображения двух типов: первый тип – изображения, на которых график представлен синим цветом, а фон – чёрным (рис. 1); второй тип – изображения, на которых график – чёрный, а фон – белый (рис. 2). Программа способна автоматически определять, к какому именно типу принадлежит изображение.

В случае со вторым типом изображений в связи с наличием через каждые 10 пикселей по оси «х» дополнительных точек, отличных от фона с целью зрительной помощи при изучении рефлектограмм возникла сложность при попиксельном чтении изображения. В связи с этим было решено для изображений второго типа игнорировать каждый десятый пиксель. А график в этом пропущенном месте восстановить исходя из формулы линейной интерполяции (k_i – пропущенный элемент в массиве, k_{i-1} и k_{i+1} предыдущий и следующий элементы массива соответственно)

$$k_i = 0.5(k_{i-1} + k_{i+1}) . \quad (1)$$

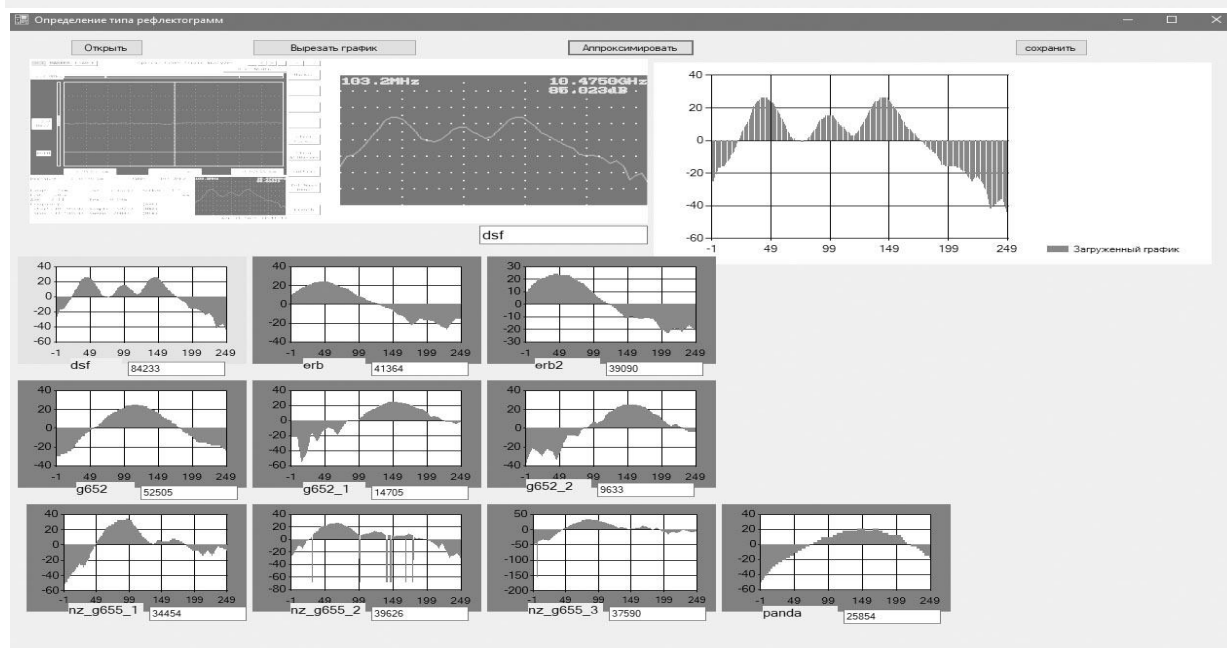


Рис. 1. Копия экрана программы при обнаружении образца G.653 (DSF)

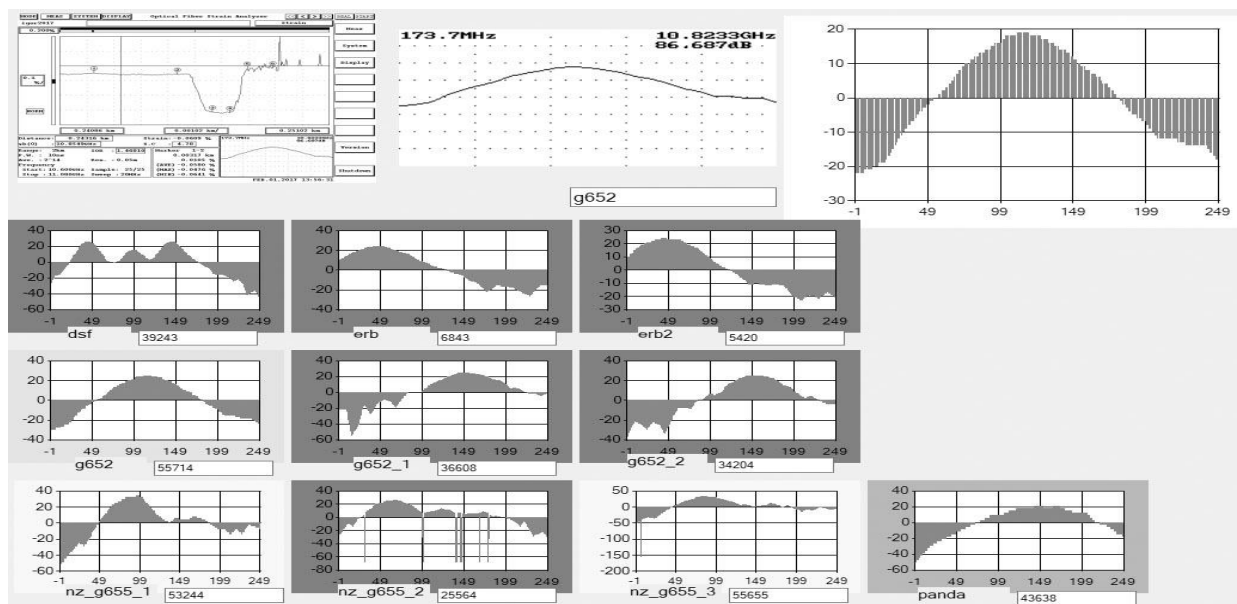


Рис. 2. Копия экрана программы при обнаружении образца G.652

Данные загруженного графика заносятся в одномерный массив, после чего происходит сравнение его с уже заранее загруженными в программу шаблонами графиков; для высокой точности правильности определения типа рефлектограмм используется специальный алгоритм. Корреляционная оценка загруженного изображения по сравнению с шаблонами производится по следующему алгоритму:

Находится сумма всех координат по оси «0у».

Находится среднее значение координат.

Значение каждого элемента массива изменяется на полученную в пункте 2 величину в меньшую сторону. В итоге получается, что среднее значение нового массива равно 0.

Если по модулю математическое ожидание появления очередной координаты получается разным для каждого шаблона, то производится корректировка вычислений по отношению $\{M_g\}/\{M_0\}$, где $\{M_g\}$ – математическое ожидание, взятое по модулю у образца исследуемой рефлектограммы, а $\{M_0\}$ – математическое ожидание, взятое по модулю у каждого из остальных образцов-шаблонов.

Корреляционная оценка рассчитывается по следующей формуле:

$$K = \sum (k_0 \cdot k_g), \quad (2)$$

где K – корреляционная оценка, k_0 – координаты шаблона, k_g – координаты загруженного графика. Суммирование происходит по всему массиву координат графика.

Пользователю представлены графические изображения всех загруженных шаблонов, а после загрузки *.bmp-изображения, шаблон, который по оценкам программы имеет наилучшее совпадение с загруженным изображением, подсвечивается зелёным цветом, и его название записывается для представления пользователю (рис. 1 и рис. 2). Шаблоны с меньшей степенью подобия подсвечиваются жёлтым и оранжевым цветами по мере уменьшения оценки степени подобия изображений.

Таблица 1

Разновидность ОБ	Значения f_{B0} , ГГц	Рекомендуемые значения f_{B0} , ГГц	v_A , км/с ($n = 1.468$)	n_p ($v_A = 5.7$ км/с)
G.652	10.82 ... 10.86	10.84	5.71	1.468
G.653 (DSF)	10.47 ... 10.49	10.47	5.53/5.63/5.72	1.42/1.45/1.47
G.655 (NZDSF)	10.61 ... 10.64	10.63	5.61	1.443
G.657	10.77 ... 10.80	10.79	5.70	1.466
EDF	10.68 ... 10.70	10.70	5.64	1.450
«Panda»	10.40 ... 10.43	10.41/10.42	5.50	1.413/1.414

Величины v_A определяются при f_{B0} из табл. 1 при $n = 1.468$. Величины n_p (эквивалентные показатели преломления) определяются из табл. 1 по f_{B0} при условии, что $v_A = 5.7$ км/с. G.653 – DSF – ОБ со смещённой дисперсией, G.655 – NZDSF – ОБ с ненулевой смещённой дисперсией, G.657 – ОБ с повышенной устойчивостью к изгибам, EDF – ОБ, легированное эрбием [1 – 3]). При использовании для расчетов f_{B0} из таблицы зависимости натяжения от температуры различных ОБ становятся практически идентичными.

Возможность определения структуры и состава слоев, образующих сердечник ОБ, по полученным профилям СРМБ и частотам всех пиков СРМБ имеет практическую ценность, так как введение легирующих веществ и изменение их концентрации влияют на скорость гиперзвука в ОБ и эффективный показатель преломления.

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Проектирование, строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий передачи: учеб. пособие: в 5 ч. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013 – 2015.

2. Bogachkov I.V. A Definition of Basis-level of the Brillouin Frequency Shift in Optical Fibers of Various Types // International Siberian Conference SIBCON-MWENT-2018 – Proceedings. – Moscow, 2018. – pp. 1 – 4.
3. Богачков И.В. Определение начального уровня бриллюэновского сдвига частоты в оптических волокнах различных видов // Сб. тр. VII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 102 – 103.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗГИБОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА БРИЛЛЮЭНОВСКИЕ РЕФЛЕКТОГРАММЫ

Богачков И.В., Трухина А.И.

Омский государственный технический университет, Омск

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы обнаружения участков оптических волокон с изменёнными характеристиками. Обсуждены вопросы несанкционированного доступа к волокнам. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния изгибов некоторых разновидностей оптических волокон на рефлектограммы, полученные с помощью бриллюэновского рефлектометра. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9334.2017/8.9).

Как известно, волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) по сравнению с другими направляющими средами инфокоммуникаций имеют высокую степень защищенности информации, передаваемой в оптических волокнах (ОВ), от несанкционированного доступа (НСД), что связано с физическими принципами распространения оптического сигнала в ОВ, так как электромагнитное поле вне сердечника ОВ очень мало [1 – 3]. Для НСД к ОВ необходимо нарушение целостности внешней защитной оболочки оптического кабеля (ОК). Несмотря на большие затраты и сложность, НСД к ОВ возможен, хотя для формирования канала утечки информации требуется непосредственный физический контакт с ОВ.

Протяженный безразрывный съём информации возможно осуществить на пологом изгибе волокна ОВ под воздействием низких температур, поскольку при низких температурах происходит изменение коэффициентов преломления ОВ, в результате чего в сердцевине повышается уровень рассеяния. При растягивающем воздействии также можно достичь изменения показателя преломления ОВ.

Для решения задач обнаружения механических натяжений в ОВ и участков ОВ с измененной температурой в настоящее время можно использовать бреллюэновские рефлектометры (BOTDR – Brillouin optical time-domain reflectometers), принцип работы которых основан на анализе спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (СРМБ [1 – 3]).

Существуют способы съёма информации из ОВ, основанные на охлаждении, растяжении участка ОВ, создании изгиба, акустических воздействиях на ОВ.

Таким образом, желательно применение BOTDR в системе мониторинга, что позволило бы решить многие задачи, связанные с уровнем надежности ВОЛС (в том числе с обнаружением попыток НСД к ВОЛС и их фиксацией), хотя пока широкое распространение BOTDR ограничено в связи с их высокой стоимостью.

Кроме того, изменение рефлектограмм относительно эталонных (появление новых «событий», изменение уровня отраженного сигнала и т. п.), позволяет сделать предположение о возможном НСД к ВОЛС.

С целью изучения особенностей поведения СРМБ в ОВ от различных факторов были проведены экспериментальные исследования с BOTDR «Ando AQ 8603» с различными ОВ при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены ниже, проводились с обычным одномодовым ОВ (G.652) и с ОВ с ненулевой смещённой дисперсией (NZDSF – G.655).

В первом эксперименте изучалось влияние диаметра изгиба ОВ на СРМБ.

На рисунке 1 представлены изменения на BOTDR рефлектограмме в зависимости от диаметра изгиба ОВ.

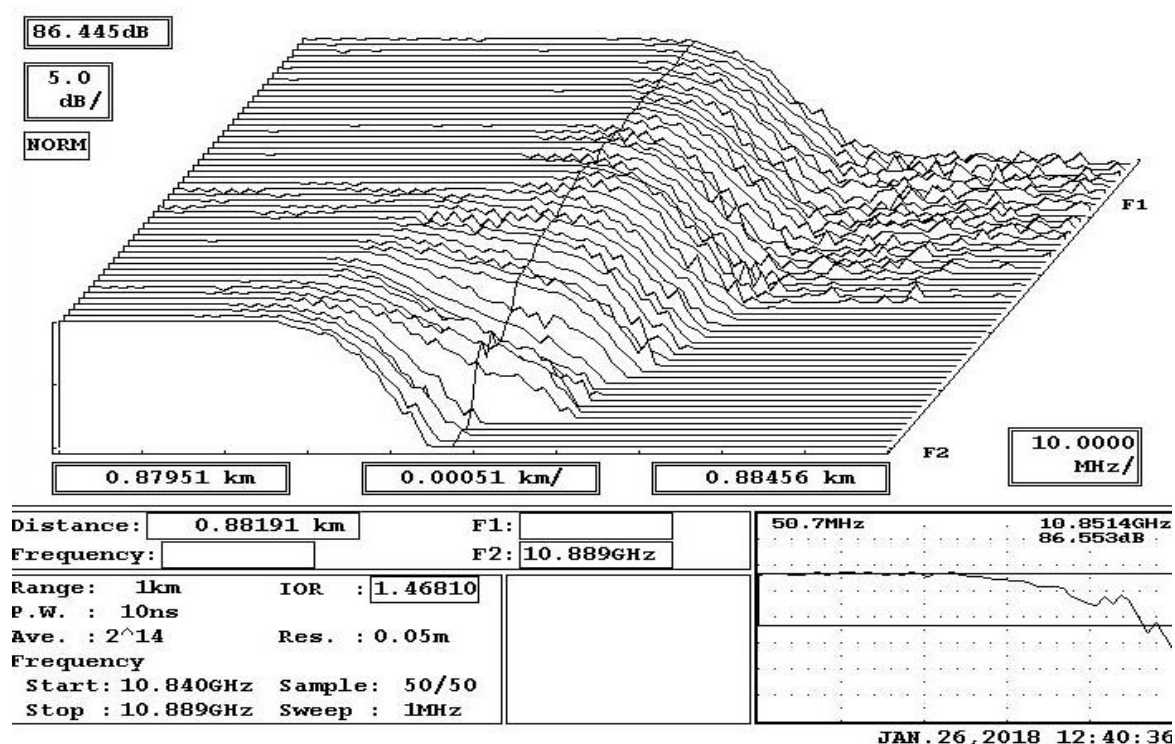


Рис. 1. BOTDR-рефлектограмма в месте изгиба ОВ G.652

Место изгиба ОВ представляло собой полукруг (полупетлю) определенного диаметра. Диаметр изгиба полупетли изменялся от 40 мм (начальная область – F1) до 10 мм (конечная область – F2). Исследования показали, что уменьшение диаметра изгиба менее 25 мм становится заметным на рефлектограмме за счет уменьшения амплитуды и изменения крутизны наклона характеристики в зависимости от диаметра изгиба.

На рисунке 2 представлены результаты аналогичного эксперимента с NZDSF (G.655).

Диаметр изгиба полупетли ОВ изменялся аналогичным образом.

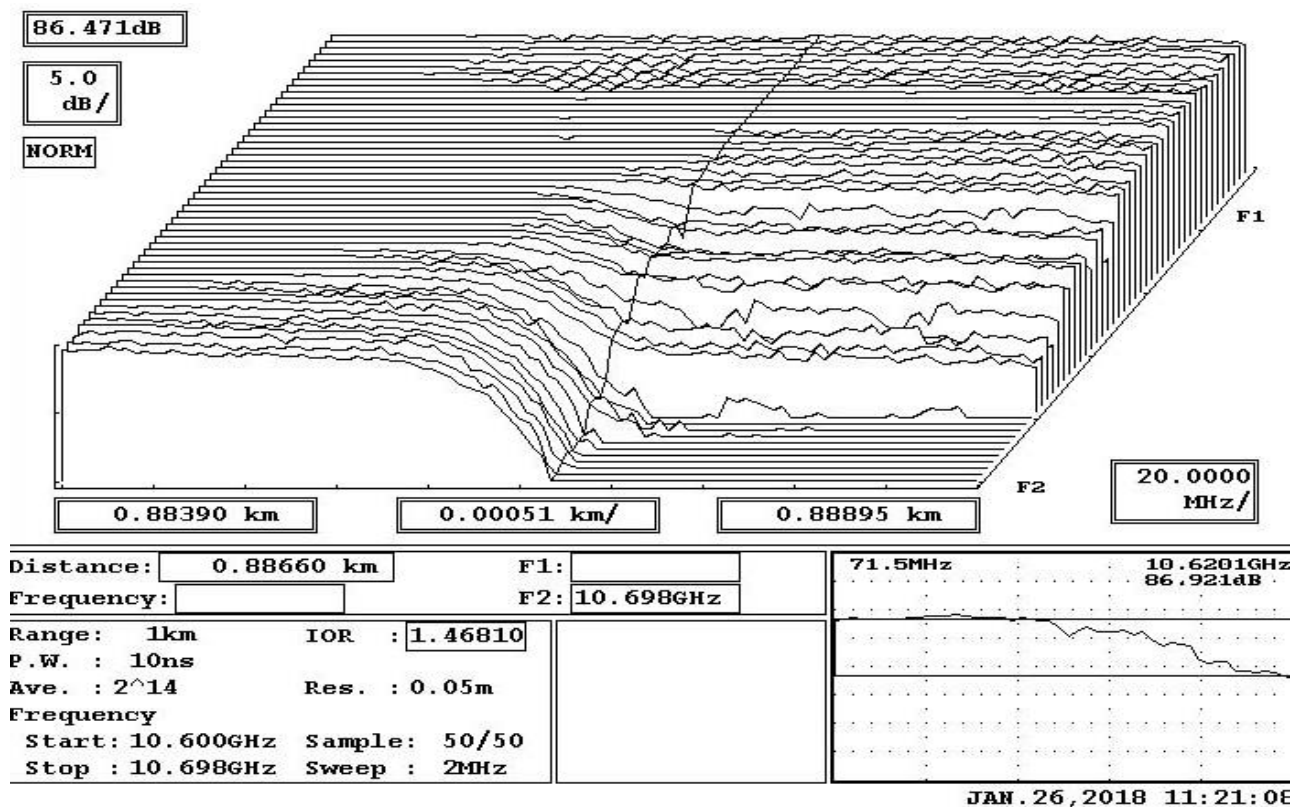


Рис. 2. BOTDR-рефлектограмма в месте изгиба NZDSF – G.655

Как видно из рисунка 1 и рисунка 2, изгибы ОВ хорошо заметны на BOTDR-рефлектограммах.

Исследования для NZDSF показали, что уменьшение диаметра изгиба менее 26 мм становится заметным на рефлектограмме за счет уменьшения амплитуды и изменения крутизны наклона характеристики в зависимости от диаметра изгиба.

Таким образом, в рассмотренных случаях BOTDR смог зафиксировать место воздействия. Из рефлектограммы видно, что BOTDR обнаруживает изгиб ОВ, и это происходит из-за резкого изменения уровня отраженного сигнала.

Представляет интерес проведение аналогичных исследований с другими разновидностями ОВ, в том числе с ОВ с повышенной устойчивостью к изгибам (G.657).

1. Богачков И.В., Горлов Н.И., Трухина А.И. Исследование влияний изгибов оптических волокон на спектр бриллюэновского рассеяния // Сб. докладов I-й Всерос. науч.-практ. конф. «Оптическая рефлектометрия – 2016». – Пермь: Печатный салон «Гармония», 2016. – С. 17 – 19.
2. Bogachkov I.V., Trukhina A.I. Detection of sections with slightly changed optical characteristics in fiber optical communication lines // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2017. – Astana, 2017. – pp. 1 – 6.
3. Богачков И.В., Трухина А.И. Повышение эффективности обнаружения каналов утечки в оптических волокнах // Сборник трудов VI Междунар. конф. по фотонике и информационно-оптике. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 362 – 363.

РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

¹Богачков И.В., ²Горлов Н.И., ²Квиткова И.Г., ²Шайгараева Т.Н.

¹-Омский государственный технический университет, Омск

²-Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
Новосибирск

Аннотация

В работе рассмотрены каналы утечки информации из волоконно-оптической линии связи, а также проанализированы основные методы их определения.

В настоящее время волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) имеют более высокую степень защищенности информации от несанкционированного доступа, чем какие либо другие линии связи. Это связано с физическими принципами передачи информации, которые основываются на модуляции света распространяющегося в оптическом волноводе. В связи с широкой распространенностью ВОЛС возникают проблемы информационной безопасности при их эксплуатации. Защита информации волоконно-оптических линиях связи - это комплекс организационных, организационно-технических и технических мероприятий, исключающих или ослабляющих бесконтрольный выход конфиденциальной информации за пределы контролируемой зоны. В данном случае утечка информации напрямую связаны с интенсивностью светового потока. Чтобы снять информацию требуется физический контакт с оптическим каналом передачи – оптоволокном. Это требование является одним из главных факторов защищенности информации в волоконно-оптических системах передачи.

Формирование каналов утечки информации из ВОЛС можно разделить на три типа, которые связаны с возможными особенностями распространения света в волоконно-оптических линиях связи [1]:

1. Нарушение полного внутреннего отражения.

Данный способ основан на отводе части светового потока из оптического волновода при нарушении полного внутреннего отражения. В идеальном случае свет не выходит из оптического волокна вследствие полного внутреннего отражения на его границах. Любые отклонения в распространении света приводят к выходу части излучения из волновода, которое образует канал утечки информации. Каналы утечки информации из ВОЛС при нарушении полного внутреннего отражения можно разделить по виду воздействия на оптоволокно:

- механическое воздействие;
- акустическое воздействие;
- оптическое туннелирование света.

2. Нарушение отношения показателей преломления.

Примером может служить растяжение, которое представляет собой механическое воздействие без изменения формы волокна.

3. Регистрация рассеянного излучения.

Рассеянное излучение позволяет сформировать каналы утечки информации, основанные на следующих физических принципах:

- прямое измерение рассеянного излучения на длинах волн носителя информации;
- регистрация рассеянного излучения на комбинационных частотах;
- специальная “обработка” оптоволокна внешними полями (тепловым, электромагнитным, радиационным), с целью увеличения интенсивности рассеянного излучения.

С помощью внешнего воздействия можно усилить потери в световоде на локальных участках формирования каналов утечки, что вызовет увеличение сигнала утечки. Основой системы выявления несанкционированного доступа (НД) является система диагностики

состояния (СДС) оптического тракта. СДС можно построить с анализом либо прошедшего через оптический тракт сигнала, либо отраженного сигнала (рефлектометрические СДС). СДС с анализом прошедшего сигнала является наиболее простой диагностической системой. На приемной части ВОЛС анализируется прошедший сигнал. При несанкционированном доступе происходит изменение сигнала, это изменение фиксируется и передается в блок управления ВОЛС.

Основным недостатком СДС с анализом прошедшего сигнала является отсутствие информации о координате появившейся неоднородности, что не позволяет проводить более тонкий анализ изменений режимов работы ВОЛС.

Основными методами определения каналов утечки информации являются:

- импульсная рефлектометрия (optical time domain reflectometer, OTDR);
- частотная рефлектометрия (optical frequency domain reflectometer, OFDR).

Первый метод связан с разработкой устройств контроля параметров отраженных оптических сигналов на входе ОВ. Для контроля величины мощности сигнала обратного рассеяния в ОВ в настоящее время используется метод импульсного зондирования, применяемый во всех образцах отечественных и зарубежных рефлектометров. Суть его состоит в том, что в исследуемое ОВ вводится мощный короткий импульс и затем на этом же конце регистрируется излучение. Рассеянное в обратном направлении на различных неоднородностях, по интенсивности которого можно судить о потерях в ОВ, распределенных по его длине (расстояние до 100 - 120 км.) Указанный метод является эффективным при обнаружении места несанкционированного подключения к ОВ с точностью до нескольких метров на расстоянии до 15 - 20 км. Однако при более высоких требованиях на пространственное разрешение начинают проявляться ограничения метода импульсного зондирования. Так при контроле одномодовых ОВ большой протяженности (более 20 км), где требуется высокое пространственное разрешение, чувствительность метода недостаточна.

Снять ограничения импульсной рефлектометрии и существенно повысить чувствительность и разрешение при контроле сигнала обратного рассеяния можно с помощью метода частотно-модулированного зондирования. Его суть заключается в том, в контролируемое ОВ вместе с информационным оптическим сигналом, но на другой длине волны вводится оптическое излучение, частота которого изменяется в соответствии с заданной функцией модуляции. Прошедшее по ВОЛС и отраженное в обратном направлении излучение смешивается с незадержанным сигналом. Информация об эволюции зондирующего оптического сигнала содержится в частотном спектре биений, где образуется в результате смешивания двух сигналов. Использование данного метода позволяет реализовать относительно дешевую аппаратуру контроля с высоким разрешением.

1. *Рефлектометрический метод определения каналов утечки информации в волоконно-оптических линиях связи. - Н.Р. Рахимов, СГТ А, Новосибирск <https://cyberleninka.ru/article/n/reflektometricheskii-metod-opredeleniya-kanalov-utechki-informatsii-v-volonno-opticheskikh-liniyah-svyazi>*

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОМОДОВЫХ РЕЖИМОВ МНОГОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С НАНЕСЕННЫМИ ПРЕЦИЗИОННЫМИ МАКРОСТРУКТУРНЫМИ ДЕФЕКТАМИ И ВОЛОКОННЫМИ РЕШЕТКАМИ БРЭГГА

¹Бурдин А.В., ¹Бурдин В.А., ²Морозов О.Г., ²Василец А.А., ¹Барашкин А.Ю.,
¹Евтушенко А.С., ¹Казаков В.С., ¹Кармолин А.С., ¹Минаева А.Ю., ¹Соколов Е.Д.

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, г. Самара
²Казанский национальный исследовательский университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментальных исследований маломодовых эффектов, возникающих в процессе передачи оптических сигналов, возбуждаемых когерентными источниками оптического излучения, по кварцевым многомодовым оптическим волокнам в маломодовом режиме с включением отрезков световодов с нанесенными волоконными решетками Брэгга поверх или в непосредственной близости от предварительно сформированных прецизионных макроструктурных дефектов типа «бочка» и «перетяжка».

На сегодняшний день известно большое количество работ, посвященных вопросам практической реализации формирования прецизионных макродефектов в структуре кварцевых волоконных световодов и практическому приложению таких волоконно-оптических элементов в различных областях волоконной оптики и фотоники. Отдельный интерес представляет применение так называемых, «перетяжек» («tapers») и «бочек» («up-tapers») в локальных сенсорах внешних воздействий измерительных систем на базе волоконно-оптических датчиков [1], а также интерферометрии [2]. Нередко эти дефекты используются в сочетании с волоконными решетками Брэгга (ВРБ), которые могут быть записаны как в непосредственной близости от ВРБ – буквально на расстоянии в несколько диаметров световода, так и поверх предварительно сформированного дефекта [3, 4].

В отличие от известных решений, в данной работе предлагается возбуждать когерентными источниками оптического излучения как короткие, так и протяженные (сотни и более метров) многомодовые (ММ) ОВ с включением отрезков также ММ волоконных световодов, на которые нанесены ВРБ в сочетании с описанными макро-дефектами, тем самым формируя маломодовый режим передачи оптического сигнала. При этом ВРБ, дополненная макроструктурным дефектом соответствующего типа, рассматривается уже не в виде волоконно-оптического рефрактора заданной оптической несущей, а в качестве нового волоконно-оптического элемента, обеспечивающего управление модовым составом маломодового оптического сигнала. В данной работе представлены результаты серии экспериментальных исследований спектральных и импульсных откликов маломодовых оптических сигналов, возбуждаемых когерентными источниками излучения, при прохождении различных вариантов реализации разработанных измерительных схем регистрации внешних механических воздействий на базе ММ ОВ с сильным проявлением ДМЗ, дополненных включением ВРБ, записанных на многомодовых световодах с предварительно сформированными «бочками» и «перетяжками», – от простого каскадного включения ММ ОВ и описанной волоконно-оптической структуры до многокомпонентной квази-интерферометрической конфигурации, приведенной на рисунке 2.

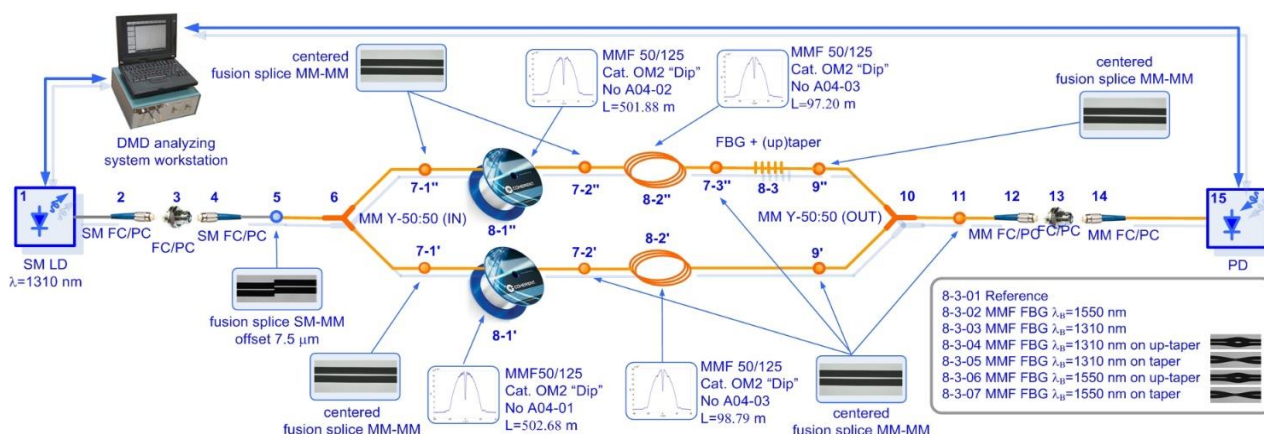


Рис. 1. Структурная схема квази-интерферометрической схемы регистрации внешних механических воздействий на основе анализа импульсного отклика маломодового оптического сигнала

Данная схема базируется на каскадном соединении ММ Y-разветвителей 50:50 «6» и «10». Вход разветвителя «6» оконцован одномодовым (SM) пигтейлом «4» с помощью сварочного аппарата с сильным осевым смещением 7.5 мкм «5», в то время как выход разветвителя «10» подварен к ММ пигтейлу «12» строго соосно «11». Плечи «8» схемы представляют собой последовательное соединение катушек ММ ОВ длиной порядка 500 м и бухт ММ ОВ протяженностью около 100 м, выполняющих роль распределенного сенсора. На первом этапе описанные длины выравнивались с помощью OTDR, далее – с применением анализатора ДМЗ R2D2 [7], таким образом, чтобы результирующий импульсный отклик, снимаемый на выходе схемы, располагался в пределах масштабной шкалы 0...10 нс. При этом в одно из плеч схемы включен описанная выше волоконно-оптическая структура «8-3»: отрезок ММ ОВ кат. OM2+/OM3 с ВРБ, записанной поверх предварительно сформированных в ММ ОВ прецизионных макроструктурных дефектов типа «бочка» и «перетяжка», с длиной волны Брэгга 1550 либо 1310 нм. Для описанной измерительной схемы была проведена серия тестов, ориентированных на исследования слабых механических воздействий 2...20 Н, в зависимости от степени приложенного воздействия. Некоторые результаты измерения динамики импульсных откликов – базовой конфигурации схемы и с включением элемента «ВРБ_1310+бочка» – представлены на рис. 2.

Анализ полученных результатов демонстрирует потенциальные возможности использования предложенного подхода для регистрации механических воздействий в альтернативных сенсорных системах на базе маломодовых эффектов. При этом, исходя из полученных данных, в качестве чувствительного элемента может использоваться как протяженное ММ ОВ с сильным проявлением ДМЗ (распределенный сенсор), так и непосредственно сама ВРБ (локальный сенсор), в то время как включение дополнительных волоконно-оптических структур – ВРБ в сочетании с прецизионными макродефектами – позволяет управлять чувствительностью таких функционирующих в маломодовом режиме альтернативных сенсорных схем.

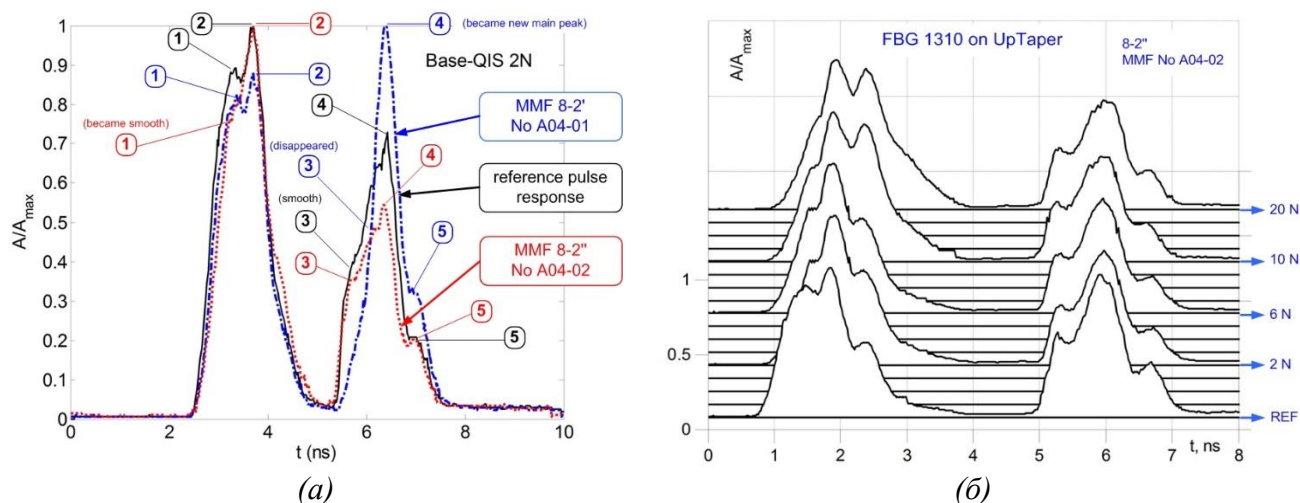


Рис. 2. Сводные диаграммы динамики импульсного отклика маломодового оптического сигнала, измеренного на выходе квази-интерферометрической схемы соответствующей конфигурации в условиях приложенного внешнего механического воздействия: (а) «8-3-01» базовая; (б) «8-3-04» с включением элемента «ВРБ_1310+бочка»

Работа подготовлена при финансовой поддержке грантов РФФИ в рамках научных проектов № 16-37-6001515 мол_а_дк, № 16-37-50087 мол_нр, № 16-37-50089 мол_нр

1. Bobb L.C., Krumboltz H.D., Shankar P.M. Pressure sensor that uses bent biconically tapered single-mode fibers // *Optics Letters*. – 1991. – vol. 16(2). – P. 112 – 114.
2. Zhang Sh., Zhang W., Gao Sh., Geng P., Xue X. Fiber-optic bending vector sensor based on Mach-Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper // *Optics Letters*. 2012. vol. 37(21). P. 4480 – 4482.

3. Frazao O., Falate R., Fabris L., Santos J.L., Ferreira L.A., Araújo F.M. Optical inclinometer based on a single long-period fiber grating combined with a fused taper // *Optics Letters*. 2006. vol. 31(20). P. 2960 – 2962.
4. Tao Qi, Shilin Xiao, Jie Shi, Lilin Yi, Zhao Zhou, Meihua Bi, Weisheng Hu. Cladding-mode backward-recoupling-based displacement sensor incorporating fiber up-taper and Bragg grating // *IEEE Photonics Journal*. 2013. vol. 5(4). P. 7100608-1 – 7100608-8.
5. Андреев В.А., Бурдин А.В., Бурдин В.А., Василец А.А., Гаврюшин С.А., Евтушенко А.С., Казаков В.С., Морозов О.Г., Севрук Н.Л., Соколов Е.Д. Разработка методики формирования прецизионных макродефектов в структуре кварцевых волоконных световодов // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2017. – №1. – С. 18 – 29.
6. Evtushenko A.S., Faskhutdinov L.M., Kafarova A.M., Kazakov V.S., Kuznetsov A.A., Minaeva A. Yu., Sevruck N.L., Nureev I.I., Vasilets A.A., Andreev V.A., Morozov O.G., Burdin V.A., Bourdine A.V. Technique for writing of fiber Bragg gratings over or near preliminary formed macro-structure defects in silica optical fibers // *Proceedings of SPIE*. 2017. vol. 10342. P. 103420X-1 - 103420X-11.
7. Бурдин А.В., Дмитриев Е.В., Прапорщиков Д.Е., Севрук Н.Л. Применение кварцевых многомодовых волоконных световодов с габаритным центральным дефектом профиля показателя преломления в распределенных сенсорах волоконно-оптических датчиков на базе маломодовых эффектов // *Прикладная Фотоника*. – 2016. – Т.3, №3. – С. 252 – 279.

МОНИТОРИНГ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В СЕТЯХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Митченкова О.Г.

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск

Аннотация

В работе рассмотрен мониторинг оптического волокна и высокоскоростных потоков, как концепция стандартов взаимной совместимости административных и технологических уровней эксплуатации оптической сети.

В настоящее время объем передаваемой информации в волоконно-оптических линиях передачи непрерывно увеличивается. Современная техника временного и спектрального мультиплексирования обеспечивает скорость передачи в канале волоконно-оптических линий передачи до 40 Гбит/сек, а число каналов передачи в одном ОВ может достигать до 100 каналов спектрально-мультиплексированных.

Развитие техники широкополосных усилителей оптического сигнала увеличивает длины регенерационных участков ВОЛП. Информационная емкость современного информационного канала на основе ВОЛП может составлять 1 Тбит/сек для одного ОВ при расстояниях между регенераторами 200 км.

Совершенствование технологии увеличила срок службы ВОЛП, что при постоянном высоком приросте и минимальном выводе из эксплуатации обеспечило непрерывный количественный их рост.

Волоконно-оптические системы передачи становятся всё более сложными и всеобъемлющими, увеличивается значимость этих систем. Поэтому повышение их надежности приобретает всё более важное значение.

Современное состояние волоконно-оптических линий передачи имеет следующие особенности:[1]

1. Наблюдается значительный рост числа функционирующих ВОЛП;
2. Усложняется топология волоконно-оптических сетей;
3. Информационная емкость ВОЛП непрерывно увеличивается;

4. Увеличивается доля информации и значимость трафика, передаваемых по ВОЛП;

5. Растёт цена простоев при авариях.

Однако за последние десятилетия проявилась проблема преждевременного старения и деградации ВОЛП, которые находятся под воздействием повышенных механических напряжений. Параметры и методы испытания ОВ и ОК регламентируются рекомендациями Международного Союза Электросвязи, секции телекоммуникаций (МСЭ-Т): G-650, G-651, G-653, G-654, G-655.

Все преимущества, которые дают ВОСП, можно реализовать лишь при условии строгого соблюдения технологии монтажа волоконно-оптического тракта и контроля параметров в процессе эксплуатации.

Неисправности и простои ВОЛП сокращают доходы операторов, ухудшают их репутацию, уменьшают приток инвестиций, снижают показатели качества обслуживания, поэтому в последние годы операторы связи начинают инвестировать значительные средства в развитие инфраструктуры своих волоконно-оптических сетей с акцентом на внедрение и совершенствование систем управления (ЦУС-Центров Управления Сетью) и автоматического мониторинга состояния оптического волокна (объекты линейно-кабельных сооружений) и каналов связи (секции технической эксплуатации СТЭ, ЛАЦ).

Эффективное использование средств инвесторов обеспечивает:

1. система автоматического мониторинга ВОЛП;
2. управление телекоммуникационным оборудованием.

Важнейшими функциями системы автоматического мониторинга оптической сети являются: постоянной автоматический сбор и статистический анализ результатов тестирования оптических волокон. Статистический анализ с использованием корреляционных, многофакторных методов, а также современных нейросетевых методов позволяет обнаруживать и прогнозировать неполадки волокна задолго до того, как они приведут к серьёзным проблемам в сети. На основе мониторинга сети с помощью системы контроля можно проводить плановый и профилактический ремонт оптического кабеля в сети, не дожидаясь появления серьёзных повреждений и аварий в кабельной системе. Метод бриллюэновской рефлектометрии практически единственный оптический метод позволяющий измерить величину абсолютного натяжения волокна. Для этого достаточно измерить частоту максимального сигнала в спектре бриллюэновского рассеяния. Так как это частота пропорционально величине натяжения в оптическом волокне, то таким образом находится распределение этого натяжения вдоль оптического волокна. Рефлектограммы, полученные с помощью рефлектометра, обладают двумя характерными особенностями. Во-первых, в них отсутствуют выбросы сигнала, вызванные отражением импульса света от оптических разъемов и торца волокна. Во-вторых, осуществляется когерентный прием излучения, рефлектограмма не зашумлена, как это должно наблюдаться при когерентном приёме рассеянного излучения [2].

Опыт и практика создания систем мониторинга и управления телекоммуникационным оборудованием, анализ известных международных стандартов свидетельствует о необходимости деления задач мониторинга и управления по принципу на 4-ре уровня.

1. Контроль за состоянием элементов (ЛКС) ;
2. Контроль за состоянием сети (СТЭ, ЛАЦ) ;
3. Контроль и управление обслуживанием (ЦУС) ;
4. Административное управление (Руководство ЛКС, ЦУС, СТЭ) ;

Первый и второй уровни обеспечивают контроль технологических сетевых элементов ВОЛС и коммутационных станций.

На третьем уровне (ЦУС) осуществляется контроль бизнес процесса в зависимости от конкретных условий функционирования разных подразделений (СТЭ, ЛКС).

На четвертом уровне административного управления, система мониторинга представляет руководителям среднего и верхнего звена удобный инструмент для аналитической обработки данных, собранных с других уровней системы.

Увеличение объемов волоконно-оптических кабелей и сокращения компонентов аппаратуры связи изменяет структуру управления при взаимодействии специалистов третьего уровня и специалистов первого и второго уровней.

Изменяется форма управления: центр управления сетью создает центр управления ЛКС, специалисты которого взаимодействуя с технической средой специалистов ЛКС, оптимально сочетают автоматизированные и ручные процедуры в рамках одного бизнес-процесса.

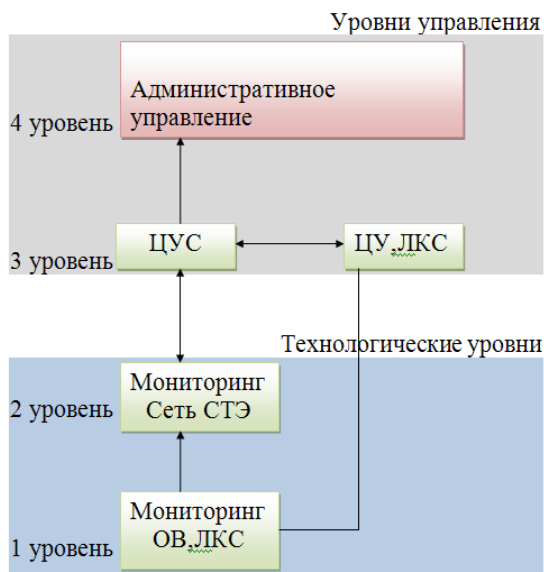


Рис.1. Иерархический принцип системы мониторинга в сетях телекоммуникаций.

Условные обозначения: сеть СТЭ-сеть высокоскоростных потоков секции технической эксплуатации. ОВ,ЛКС-оптическое волокно линейно-кабельных сооружений

Объединение технологических объектов (ЦУС, ЛКС, СТЭ) иерархией мониторинга, обеспечивает качество и содержание сетей связи, согласно нормативным требованиям при условии роста объемов трафика и процессов интеграции в диалектическом единстве настоящего и будущего сетей телекоммуникаций.

1. И.В. Богачков, Н.И. Горлов Методы и средства мониторинга и ранней диагностики волоконно-оптических линий передачи: монография/И.В. Богачков, Н.И. Горлов; Минобрнауки России, ОмГТУ. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 192 с.: ил.
2. Шмалько А.В Цифровые сети связи, Издательство: М.: Эко-Трендз Год: 2001 Страниц: 282

МИНИАТЮРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА ФАБРИ-ПЕРО

¹Минкин А.М., ^{2,3}Созонов Н.С., ^{1,3}Фадеев К.М., ¹Шевцов Д.И.

¹ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Пермь

²ООО «Инверсия-Сенсор», Пермь

³Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

Аннотация

В работе представлена конструкция миниатюрного датчика давления, который потенциально способен выдерживать давление более 50 бар. Датчик давления основан на интерферометре Фабри-Перо. Чувствительным элементом датчика является мембрана,

выполненная из боросиликатного стекла. Анализ значений изменения давления проводится по смещению интерференционной картины, которая образуется благодаря обратным отражениям от торца оптического волокна, внутренней и внешней частей мембраны. В докладе представлены результаты эксперимента, в которых показана работоспособность датчика давления такого типа. Чувствительность датчика составляет 150 нм/бар.

Датчики давления широко используются в большом количестве приложений от аэрокосмической промышленности до медицины. По сравнению с электрическими датчиками волоконно-оптические датчики имеют преимущества в виде высокого разрешения, высокой чувствительности, собственной электрической пассивности и невосприимчивости к электромагнитному излучению. Интерферометрические датчики с высоким разрешением и большим динамическим диапазоном являются одним из основных типов волоконно-оптических датчиков давления (ВОДД). Интерферометр Фабри-Перо является наиболее привлекательным для создания датчика давления из-за его простоты и компактности.

В докладе демонстрируется новый миниатюрный вариант реализации ВОДД, потенциально способный выдерживать давление более 50 бар и рассматриваются результаты, полученные на одном из первых образцов. Датчик давления, рассматриваемый в докладе, потенциально может быть произведен только из кварцевых компонентов, что делает его идеальным для использования в условиях высоких температур (>600 °C), например, внутри авиадвигателя.

Чувствительным элементом ВОДД является мембрана, выполненная из боросиликатного стекла по технологии травления. Толщина мембраны в чувствительной области составляет 50 мкм, диаметр чувствительной области 600 мкм. При воздействии давления происходит прогиб мембраны ΔL . Если выход оптического волокна расположен к центру мембраны, то можно рассматривать только прогиб в центральной точке ΔL_c , который можно найти следующим образом:

$$\Delta L_c = \frac{3(1-\mu^2)}{16Ed^3} \Delta P,$$

где R и d – радиус и толщина мембраны, соответственно, E – модуль Юнга и μ – коэффициент Пуассона. Если диафрагма выполнена из боросиликатного стекла, то $E = 63$ ГПа, $\mu = 0,20$. Датчик верно работает на линейном диапазоне деформации мембраны, то есть когда смещение не превышает 30% от толщины мембраны, что значит $\Delta L_c < 0,3d$ [1]. Деформации мембраны такой величины соответствует значение давления $P_{\max} = 5,1$ Мпа = 51 бар.

Конструкция датчика показана на рис. 1. Одномодовое оптическое волокно в ферулле проводит свет от источника к датчику через циркулятор. В чувствительной части, излучение частично отражается и частично проходит через полость, сформированную торцом оптического волокна и внутренней стенкой мембраны. Воздушная полость составляет 450 мкм. Далее свет частично проходит в мембрану, где частично отражается третий раз от внешней стенки мембраны. Таким образом, чувствительная часть датчика создаёт три отражения: одно от торца оптического волокна и два других от двух поверхностей диафрагмы.

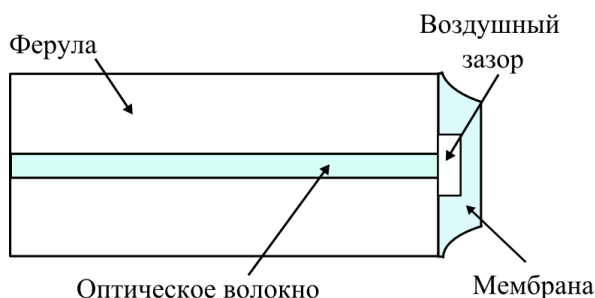


Рис. 1. Схема конструкции волоконно-оптического датчика давления

Они будут интерферировать между собой, и общая интенсивность обратного отражения может быть записана как [2]

$$I(\lambda) = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 - 2A_1A_2 \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda}\right) - 2A_2A_3 \cos\left(\frac{4\pi nL}{\lambda}\right) + 2A_3A_2 \cos\left(\frac{4\pi(L+nd)}{\lambda}\right),$$

где A_1 , A_2 и A_3 – амплитуда света от отражений торца оптического волокна, внутренней и внешней части мембраны, L – длина воздушной полости, d – толщина мембраны, n – показатель преломления материала мембраны, λ – длина волны света.

Благодаря взаимодействию отраженных лучей на фотоприемнике образуется интерференционная картина. Под действием внешних параметров (температуры или давления) происходит смещение спектра интерференционной картины.

Во время эксперимента датчик погружался в герметичную барокамеру и подключался к источнику излучения и приемнику. Тестирование датчиков на давление проводилось в установке гидравлического нагружения с рабочей жидкостью этиленгликоль. Схема эксперимента представлена ниже (рис. 2).

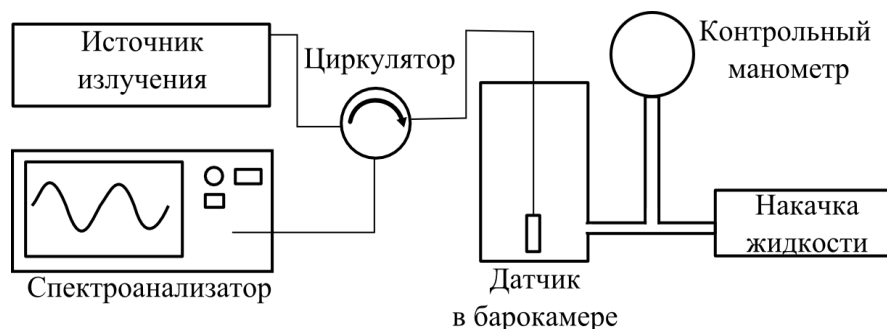


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

По результатам эксперимента, вследствие изменения давления, действующего на мембрану датчика, происходило смещение спектра (рис. 3). Чувствительность датчика к давлению составляет 150 пм/бар.

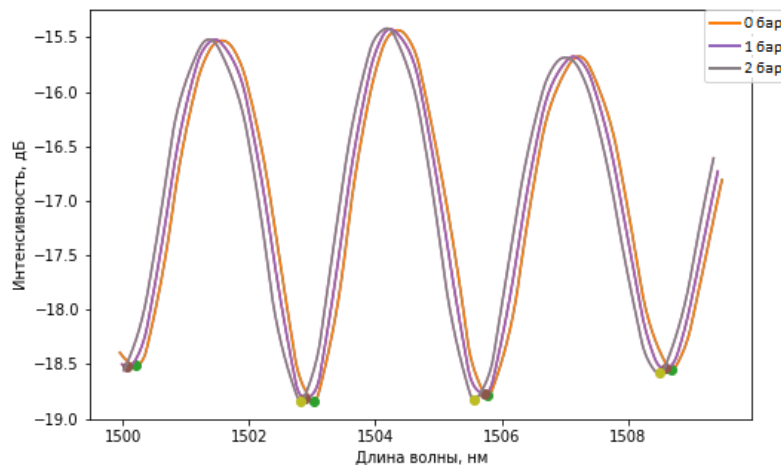


Рис. 3. Смещение спектра под действием давления

Датчик также чувствителен к температурным изменениям. Чувствительность датчика составляет 20 пм/°C.

Анализ полученных результатов демонстрирует потенциальные возможности использования такой конструкции ВОДД для регистрации давления в средах с экстремально высокими значениями температуры.

1. Fang G.C. et al. MEMS fiber-optic Fabry-Perot pressure sensor for high temperature application //Optical Measurement Technology and Instrumentation. – International Society for Optics and Photonics, 2016. – Т. 10155. – С. 101552H.
2. Zhu Y., Wang A. Miniature fiber-optic pressure sensor //IEEE Photonics Technology Letters. – 2005. – Т. 17. – №. 2. – С. 447-449.

ИМПУЛЬСНЫЕ СУБНАНОСЕКУНДНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД

²Гордеев К.Е., ¹Дураев В.П., ²Шестаков А.А., ³Шестаков А.В.

¹АО «Нолатех», Москва

²ООО «ЭЛС-94», Москва

³АО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва

Аннотация

В работе представлены результаты исследования гибридных полупроводниковых лазеров с селективным волоконным резонатором, работающим в режиме синхронизации мод. Благодаря большой длине резонатора лазеры такого типа могут генерировать ультракороткие импульсы излучения большой амплитуды при частотах повторения 1...1000 МГц. Длительность импульсов лазерного излучения в значительной степени определяется селективностью внешнего волоконного резонатора и может быть в практически интересном диапазоне 10-100 ps.

Традиционным методом получения лазерного излучения с ультракороткой длительностью импульсов является реализация режима синхронизации продольных мод резонатора. Предельно малая длительность импульсов определяется количеством и обратной шириной спектра возбуждаемых мод резонатора. Несмотря на большую ширину спектра усиления в типичных полупроводниковых лазерах ($\delta\lambda_0=20-40$ нм) из-за малой длины резонатора ($d=0,3...1$ мм) велик спектральный интервал между соседними продольными модами ($\delta\lambda_0=0,5-5$ нм) и в контуре усиления оказывается незначительное количество мод. Эффекты случайной синхронизации мод в полупроводниковых лазерах наблюдались уже в первых работах по исследованию динамики излучения [1], однако только при использовании внешнего оптического резонатора удалось уверенно продемонстрировать непрерывную генерацию ультракоротких импульсов длительностью около 20 ps во внешнем резонаторе с частотой повторения 3 GHz. Развитие волоконной оптики и, в частности, технологий «пигтейлирования» лазерных диодов и изготовления «брэгговских» зеркал в фоторефрактивных волокнах открывает широкие возможности использования известных методов получения режимов синхронизации мод в полупроводниковых лазерах. Следует отметить значительное число публикаций по изучению режимов активной или пассивной синхронизации мод в полупроводниковых лазерах [3].

Целью настоящей работы явилась разработка субнаносекундного лазерного источника для последующего использования в качестве задающего генератора в волоконных или твердотельных усилителях. Лазеры такого типа могут использоваться и в рефлектометрии. Основным элементом исследуемого лазера является усилительный модуль, включающий активный элемент специальной конструкции в котором один из торцов элемента снабжен «глухим» зеркалом, а излучение на второй торец с антиотражающим покрытием излучение попадает из активного полоска под углом несколько градусов. Излучение из активного элемента вводится в одномодовое волокно hi1060. К торцу волокна приварено волоконное «брэгговское» зеркало сформированное в волокне hi1060 с коэффициентом отражения около 10 % на длине волны 1064.1 нм и спектральной шириной 0.5 нм. В наших экспериментах

длина резонатора была около 10 м, что определяло частоту межмодовых биений, которая составила 10,634 МГц. Для получения генерации в режиме активной синхронизации мод на усиливающий элемент подавался импульсный ток с частотой 9 межмодовых биений. Разработанный генератор тока, обеспечивал генерацию электрических импульсов тока амплитудой до 200 мА, длительностью около 5 нс в диапазоне частот 1-20 МГц. При увеличении амплитуды тока выше порогового значения ($I=50$ мА) и точной подстройки частоты (+100Hz) наблюдалось значительное увеличение амплитуды сигнала скоростного фотоприемного устройства (Textronix SD-48) на экране осциллографа (Agilent 54855A DSO). Разрешение аппаратуры при регистрации фотосигнала было не более 100 ps, что определялось при измерении длительности импульсов фемтосекундного волоконного лазера. На рис.1 изображена осциллограмма импульса выходного излучения. Как видно отсюда, наблюдаемая длительность близка к пределу разрешения аппаратуры, поэтому можно полагать, что реальная длительность импульсов не превышает 100 ps. Проводимые в настоящее время исследования позволят уточнить основные параметры излучения полупроводникового лазера с линейным волоконным резонатором, в том числе длительность и стабильность импульсов, ширины спектра излучения при изменении режимов генерации.

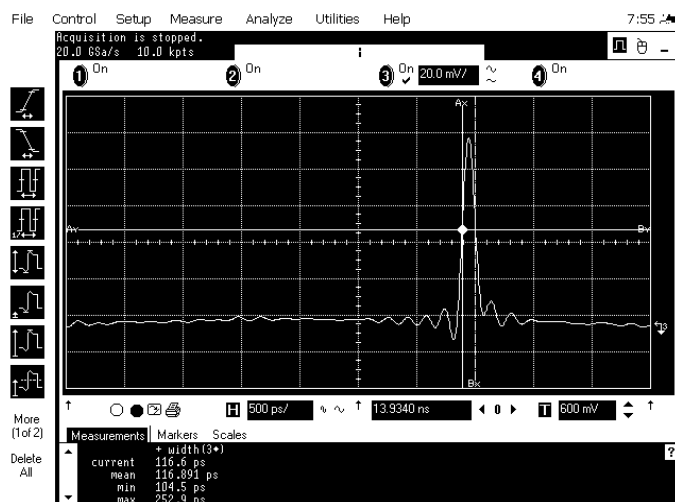


Рис. 1. Импульс выходного излучения

1. N.G. Basov, V.V. Nikitin, A.S. Semenov. *Sov.Phys-Usqtkhi* 12, (1969) 219
2. P.T. Ho, L.A. Glasser, E.P. Ippeb, H.A. Haus. *Appl.Phys. Lett.* 33 (1978) 241
3. Акпаров В.В., Дураев В.П., Логгинов А.С., Неделин Е.Т. *Вестник МГУ, серия 3*, 2006, №3

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Алексеев А.С. 63
Алексеев А.Э. 24, 40
Алексеев В.Н. 45, 71

Б

Барашкин А.Ю. 81
Барков Ф.Л. 30
Богачков И.В. 12, 16, 60, 74, 77, 80
Будылин Г.С. 50
Бурдин А.В. 10, 55, 81
Бурдин В.А. 10, 55, 81

В

Василец А.А., 81
Вдовенко В.С. 40

Г

Гейдер Р.Ф., 52
Гордеев К.Е., 89
Горлов Н.И. 16, 74, 80
Горшков Б.Г. 08, 17, 21, 40, 50
Горшков Г.Б. 21, 50
Греков М.В. 52
Григорьев В.В. 26, 36

Д

Дашков М.В. 10, 57
Дельмухаметов О.Р. 55
Донченко С.С. 38
Дураев В.П. 89

Е

Евтушенко А.С. 81

Ж

Желудков М.А. 55
Жуков К.М. 28, 50

З

Зайцева Е.С. 55

И

Иваненко В.А. 45, 71
Иниватов Д.П. 74

К

Казаков В.С. 81
Казаров В.А. 45, 71
Кармолин А.С. 81
Квиткова И.Г. 80
Киреев А.П. 74
Клод Д. 30
Колмогоров О.В. 38
Константинов Ю.А. 30
Кормщиков Д.С. 33
Кравцов В.Е. 26, 36
Кривошеев А.И. 30
Кузнецов А.А. 45, 68, 71
Куликов Е.В. 68

Л

Лобач И.А. 30

М

Минаева А.Ю. 81
Минкин А.М. 86
Мисбахов Р.Ш. 45, 68, 71
Митченкова О.Г. 84
Митюрёв А.К. 26, 36
Мороз Е.А. 26, 36
Морозов О.Г. 43, 45, 68, 71, 81
Москалев Д.Н. 65

Н

Новиков С.Г. 63
Носова Е.А. 30
Нуреев И.И., 45, 68, 71

П

Парамонов В.М. 50
Паршаков О.С. 33
Погоньшев А.О. 26
Подюкова Л.В. 36
Пономарев Р.С. 35, 65
Потапов В.Т. 24, 40
Прохоров Д.В. 38
Пуртов В.В. 45, 71

С

Савкин К.Б. 26, 36
Салгаева У.О. 65
Сахабутдинов А.Ж. 43, 45, 68, 71
Светухин В.В. 63
Симикин Д. Е. 28, 40, 50
Смирнов В.С. 52
Созонов Н.С. 86
Соколов Е.Д. 81

Т

Таранов М.А. 17, 21, 28
Тезадов Я.А. 24
Тихомиров С.В. 26, 36
Токарева И.А. 16
Трегубов А.В. 63
Трухина А.И. 77

Ф

Фадеев К.М. 86
Феофилактов С.В. 45, 68, 71
Фотиади А.А. 52
Фролов И.В. 48

Ш

Шайгараева Т.Н. 80
Шевцов Д.И. 35, 86
Шестаков А.А. 89
Шестаков А.В. 89
Шубин А.В. 52
Щипунов А.Н. 38

Я

Якубович А.А. 52

**II ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ОПТИЧЕСКАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ – 2018»**

Сборник тезисов II Всероссийской конференции «Оптическая рефлектометрия – 2018»

Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН

29-31 мая 2018, Пермь, Россия

Печатается в авторской редакции

Ответственные за выпуск:

Ю.А. Константинов, Р.И. Петрова, Е.Ю. Филиппова, А.Г. Вотинова,
И.А. Лобач, А.С. Смирнов

Подписано в печать 21.05.2018

Тираж 120 экз.