ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

**04201454412**

*На правах рукописи*



**Дмитриев Евгений Владимирович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА  
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ НА  
ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ**

Специальность 05.12ЛЗ -  
Системы, сети и устройства телекоммуникаций  
диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

**Бурдин Владимир Александрович**

Самара — 2013

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Таблица используемых сокращений 5

[Введение 7](#bookmark1)

**Глава 1. Разработка метода выявления и локализации дефектов в**

**оболочке световода оптического волокна 20**

1. Методы выявления новых событий в процессе

мониторинга оптических волокон 20

1. Описание предлагаемого метода определения места

повреждения ОВ 25

1. [Экспериментальная апробация метода 30](#bookmark14)
2. [Выводы 38](#bookmark51)

[**Глава 2. Моделирование поляризационных характеристик обратного рассеяния с локальными событиями и воздействиями 41**](#bookmark18)

1. [Общие положения 41](#bookmark19)
2. Модель поляризационной характеристики обратного

рассеяния ОВ 42

1. [Модели отдельных событий на ВОЛП 44](#bookmark22)
2. [Модель микротрещины 49](#bookmark23)
3. Двулучепреломление стандартного ступенчатого оптического волокна с микротрещиной

в оболочке световода 49

1. Модель микротрещины на поверхности

оболочки световода 50

1. Расчет оценок двулучепреломления,

обусловленного асимметрией распределения механических напряжений в сечении световода 54

з

1. Оценка составляющей двулучепреломления,

обусловленной действием механических напряжений 57

1. Расчет двулучепреломления и длины биений

ступенчатого ОВ в зависимости от размера микротрещины 59

1. Модель кусочно-регулярной модели ВОЛЛ

с локальными событиями 62

1. Исследование возможности применения вращения

поляризации для локализации новых событий 69

1. Исследование возможности локализации

последовательности событий 73

1. [Выводы 73](#bookmark35)

**Глава 3. Экспериментальные исследования на физических**

**моделях 77**

1. [Общая схема эксперимента 77](#bookmark39)
2. Методы физического моделирования дефектов оптического

волокна 80

1. [Физические модели участка ВОЛЛ 83](#bookmark41)
2. [Локализация событий разного типа 83](#bookmark42)
3. Локализация событий с применением контроллера

поляризации 89

1. Оценка погрешности локализации нового события

в ОВ по результатам сравнения ПХОР 91

1. [Выводы 95](#bookmark45)

**Глава 4. Рекомендации по мониторингу оптических волокон**

**кабельных линий с использованием POTDR 98**

[4.1. Общие положения по технической эксплуатации транспортных сетей связи 98](#bookmark47)

1. Реализация системы мониторинга оптических волокон по

[поляризационным характеристикам обратного рассеяния 100](#bookmark20)

1. Оценка эффективности мониторинга оптических волокон по поляризационным характеристикам

обратного рассеяния 105

1. Выводы ИЗ

[Заключение 115](#bookmark52)

[Список литературы 121](#bookmark53)

Приложение А. Акты внедрения результатов диссертационной работы 133

**Заключение**

Представлен сравнительный анализ известных на сегодняшний день подходов и разработанных на их основе методов выявления различных воз­действий на ОВ, реализованных как в коммерческих RFTS, так и лаборатор­ных измерительных системах. Проведенный обзор позволил выделить отдель­ную группу методов контроля состояния ОВ по поляризационным характери­стикам, как наиболее чувствительные к изменению напряжений в ОВ. Однако, как показали результаты выполненного сравнительного анализа, возможности применения данных методов для решения поставленной задачи локализации повреждения/дефекта ОВ в оболочке на ранней стадии достаточно ограничены и требуют проведения соответствующей доработки и адаптации.

Предложен альтернативный метод для определения места положения повреждения ОВ в оболочке, который базируется на сравнении контрольной и текущей ПХОР, измеряемых в процессе мониторинга ОВ. При этом, в отличие от известных решений, алгоритм сравнения основан на построении скользя­щего коэффициента корреляции между указанными ПХОР, распределение ко­торого по длине ОВ представляет собой корреляционную характеристику.

Проведена экспериментальная апробация предложенного метода на раз­работанной физической модели. Полученные результаты подтвердили воз­можность обнаружения и локализации дефектов в оболочке ОВ на ранней ста­дии, которые не определяются традиционной рефлектометрией.

При этом в ходе проведения экспериментальных измерений и последу­ющей обработки результатов было выявлено следующее:

* использованный способ физического моделирования дефекта в обо­лочке ОВ не позволяет разделить факторы, изменяющие состояние поляриза­ции;
* при повторном подключении POTDR к ОВ через оптический разъем ПХОР, измеренные до и после повторного подключения могут быть некорел- лированы;

- если в процессе мониторинга POTDR не отключали, то на ближнем конце ПХОР коррелированы, а уже за первым от ближнего конца дефектом они некоррелированы, что объясняется локальным изменением состояния по­ляризации на разъемном соединении, дефектах ОВ и прочих локальных собы­тиях.

Очевидно, что, в общем случае, изменение состояния поляризации на локальном участке ОВ, содержащем событие, можно компенсировать путем включения контроллера поляризации на входе POTDR. Однако это предполо­жение требует проведения соответствующих дополнительных исследований. При этом необходимы дальнейшие исследования оценки потенциальных воз­можностей использования разработанного метода для выявления иных отдель­ных событий на линии и возможности обнаружения и локализации отдельно для каждого фактора, приводящего к локальному изменению состояния поля­ризации: например, локальной радиальной нагрузки на ОВ, изгиба волокна, механического сростка, сварного соединения.

Построена математическая модель ПХОР с локальными событиями, ос­нованная на известном кусочно-регулярном представлении ВОЛП с учетом статистического характера вариации длины биений и длины корреляции. При этом моделировались следующие наиболее часто встречающиеся типа собы­тий: изгиб ОВ, локальная радиальная нагрузка на ОВ и микротрещина. Для описания последней использовался подход, основанный на оценивании ради­уса зеркальной зоны, а двулучепреломление представлено в виде суммы двух составляющих Bg— компонента, обусловленная нарушением осевой симмет­рии профиля показателя преломления световода, и Bs — компонента, обуслов­ленная асимметрией распределений механических напряжений в сечении све­товода.

Это позволило разработать методику расчета двулучепреломления ОВ в зависимости от параметров микротрещины. Проведенные на ее основании расчеты показали, что результирующая величина двулучепреломления и, со­ответственно, длина биений ступенчатого ОВ, обусловленные ростом микро­трещины в оболочке световода, полностью определяются составляющей Bg. В частности, при уменьшении радиуса зеркальной зоны длина биений возрастает и при (гх/а) —» 0 стремится к бесконечности, что соответствует идеально круглому световоду. Однако с увеличением радиуса зеркальной зоны уже при значениях более полутора радиусов сердцевины световода значения длины би­ений снижаются примерно на порядок и более по сравнению с типичными зна­чениями для промышленных образцов ОВ в кабелях связи. Все это указывает на высокую чувствительность ПХОР ОВ к появлению новых локальных де­фектов в оболочке световода волокна даже на ранней стадии их развития в процессе технической эксплуатации ВОЛП.

На основании разработанной модели проведены теоретические расчеты ПХОР ОВ без и с внесенным локальным событием с последующим сопостав­лением контрольной и текущей ПХОР, согласно предложенному в гл. 1 ме­тоду. Здесь участок, на котором имеет место повреждение ОВ, соответствует участку ПХОР, на котором коэффициент корреляции изменяется на величину, превышающую некоторое пороговое значение.

Анализ полученных результатов сравнения корреляционных характери­стик модельных ПХОР ОВ без событий и с новым локальным событием пока­зал возможность его выявления с погрешностью не более 10 м. Установлено, что локальное механическое воздействие на ОВ существенно изменяет ПХОР на участке от положения события до конца линии.

Проведено моделирование ПХОР ОВ с подключением контроллера по­ляризации на выходе POTDR к тестируемой ВОЛП. Анализ полученных ре­зультатов подтвердил возможность компенсации изменения состояния поля­ризации на локальном участке ОВ, содержащем новое событие, с помощью контроллера поляризации. Благодаря включению данного устройства обеспе­чивается получение текущих ПХОР с максимальным коэффициентом корре­ляции на ближнем и дальнем конце линии относительно положения событий.

В результате участок линии, на котором имеет место повреждение ОВ, иден­тифицируется как участок, на котором коэффициент корреляции изменяется на величину, превышающую некоторое пороговое значение, а расстояние до места повреждения определяется как расстояние до точки пересечения корре­ляционных характеристик контрольной и текущих ПХОР, полученных при максимальных значениях коэффициента корреляции на ближнем и дальнем конце, соответственно.

Проведено моделирование ПХОР кусочно-регулярной ВОЛП с несколь­кими последовательно расположенными новыми локальными событиями и подключенным на выходе POTDR контроллером поляризации. Полученные результаты продемонстрировали возможность выявления последовательно расположенных локальных событий.

Все это позволило разработать метод обнаружения последовательно рас­положенных локальных событий, который, в отличие от известных решений, заключается в сравнении контрольной и текущих ПХОР, полученных при мак­симальных значениях коэффициента корреляции на ближнем и дальнем конце, соответственно.

Для исследования потенциальных возможностей использования разра­ботанного метода поляризационной рефлектометрии для выявления и локали­зации событий разного типа проведены серии экспериментальных исследова­ний на физических моделях ВОЛП.

На основании предварительно сформулированных критериев были раз­работаны физические модели следующих видов событий на промышленных образцах ОВ, уложенных в бухты, длиной по 600...700 м каждая: изгиб ОВ, локальная радиальная нагрузка на ОВ, микротрещина в оболочке световода волокна. Также дополнительно исследовались типовые механические сростки и сварные соединения волоконных световодов, реализованные с помощью ти­повых комплектов оборудования для монтажа ОВ.

Анализ полученных в результате первой серии экспериментальных из­мерений корреляционных зависимостей показал возможность локализации от­дельных видов событий с погрешностью не более 10 м. Последующее сопо­ставление результатов измерений с расчетными данными, полученными на ос­нове разработанной модели, также показало хорошее совпадение.

Полученные результаты экспериментально подтвердили чувствитель­ность изменения ПХОР к появлению новых локальных событий вне зависимо­сти от их вида и степени проявления. Это позволило при проведении следую­щих серий тестов ограничиться введением локальной радиальной нагрузки на ОВ как наиболее простого, с точки зрения практической реализации, локаль­ного события.

Далее, исходя из результатов теоретических расчетов, проведенных в гл. 2, для снижения погрешности локализации событий, при проведении следую­щей серии измерений выход POTDR подключался к тестируемой линии через контроллер поляризации. При этом после формирования дефекта добивались совмещения исходной и текущей ПХОР сначала на ближнем конце линии, а затем - на дальнем. Анализ полученных в результате второй серии экспери­ментальных измерений корреляционных характеристик подтвердил возмож­ность использования контроллера поляризации для компенсации локального изменения состояния поляризации на длине ОВ, а также согласование текущей ПХОР с контрольной в случае переподключения POTDR.

На третьем этапе были проведены экспериментальные исследования возможности локализации последовательно расположенных дефектов. Для этого на макете формировалось два события в виде радиальной нагрузки на расстоянии 230 м друг от друга. Измерения и последующая обработка ПХОР проводились в соответствии с разработанным методом обнаружения последо­вательно расположенных локальных событий. Анализ полученных результа­тов сопоставления модельных и измеренных ПХОР показал хорошее совпаде­ние.

Далее последнем этапе были проведены экспериментальные исследова­ния количественной оценки погрешности локализации нового события в ОВ в зависимости от длительности зондирующего импульса и длины «скользящего окна», используемого при построении корреляционной характеристики. Со­гласно полученным результатам, погрешность локализации уменьшается вплоть до нескольких метров при вычислении корреляционной характери­стики с использованием «скользящего окна» длиной примерно 10 и более длин зондирующего импульса.

На основании полученных в гл. 1 - 3 результатов теоретических и экс­периментальных исследований потенциальных возможностей предложенного подхода для выявления дефектов ОВ на ранней стадии развития с помощью поляризационной рефлектометрии был разработан способ и на основании его методика определения места повреждения ОВ.

Разработаны практические рекомендации по модернизации уже инстал­лированных на сети систем мониторинга ОК без демонтажа удаленного ком­плекта RFTS путем включения описанного выше оптического модуля, вноси­мое затухание которого составляет не более 2 дБ, к выходу типового OTDR и установки дополнительного соответствующего программного обеспечения.

На основании предложенного способа определения места повреждения ОВ разработана методика перевода линии в режим «Предупреждение», а также идентификации состояния линии «Предупреждение» и «Повреждение» в системах мониторинга ВОЛП.