

Поиск предаварийных участков в оптических волокнах с помощью рефлектометров

И. В. Богачков, Н. И. Горлов

В статье приведены результаты исследований участков оптических кабелей, находящихся в предаварийном состоянии из-за повышенного натяжения или измененной температуры оптических волокон, как с помощью обычных оптических импульсных рефлектометров, так и с помощью бриллюэновского оптического рефлектометра. Результаты исследований подтвердили преимущество метода бриллюэновской рефлектометрии для ранней диагностики и обнаружения «проблемных» участков волоконно-оптических линий связи.

Ключевые слова: оптическое волокно, ранняя диагностика, рассеяние Мандельштама–Бриллюэна, рефлектометрия, бриллюэновский рефлектометр.

1. Введение

Широкое распространение волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) в составе современных инфокоммуникационных систем сделало актуальной задачу мониторинга и ранней диагностики оптических волокон (ОВ) в проложенных оптических кабелях (ОК).

К основным задачам систем мониторинга можно отнести следующие:

- дистанционный контроль активных и пассивных волокон;
- автоматическое обнаружение дефектов с указанием их точного местоположения;
- управление процессом оповещения о повреждении ОК;
- своевременное документирование полученных результатов;
- прогнозирование изменений параметров ОК [1].

Эти задачи могут быть решены с помощью автоматических систем мониторинга ВОЛС, включающих в свой состав оптический импульсный рефлектометр (OTDR – optical time-domain reflectometer), который позволяет обнаруживать дефекты и повреждения ОВ, а также определять затухание в любой точке световода. Работа OTDR основана на методе обратного рассеяния [1, 2].

Системы дистанционного тестирования ОВ (RFTS – remote fiber test system) выпускаются рядом компаний. На российском рынке информационных технологий можно выделить несколько таких систем: ONMSi (компания «JDSU»), NQMSfiber (компания «EXFO»), Geozondas 7102 (компания «GEOZONDAS»), FiberTest (компания «Agizer»), ПРОФИМОКС (компания «2TEST») и другие.

Организация эффективного непрерывного мониторинга ВОЛС требует правильного выбора системы RFTS в зависимости от топологии сети, требований надежности, а также стоимости системы для всей планируемой сети и её дальнейшего развития [2].

Важной задачей мониторинга и ранней диагностики ВОЛС является своевременное обнаружение и устранение «проблемных» участков в ОВ: участков с нарушениями «оптического пути», участков с изменёнными температурой и натяжением, участков с изгибами и микроизгибами, участков с несанкционированным доступом (НСД) к ОВ ВОЛС и т.п. [1–5].

Для оценки надёжности волоконно-оптических линий связи необходимо иметь достоверную информацию о физическом состоянии ОВ в проложенных ОК.

Считается, что обычные оптические импульсные рефлектометры не в состоянии обнаружить участки с повышенным натяжением ОВ или с изменённой температурой. Для обнаружения подобных «проблемных» участков ВОЛС применяется метод бриллюэновской или рамановской рефлектометрии [1–6].

Многие организации, использующие ВОЛС, не особенно задумываются о контроле натяжения и температурных изменениях в ОВ, находящихся в проложенных ОК, и применяют традиционные OTDR.

Как будет доказано в данной статье ниже, организациям, которые заинтересованы в повышении надёжности и долговечности своих ВОЛС, в заблаговременном обнаружении «проблемных» участков ОВ с повышенным механическим напряжением и с изменённой температурой, рекомендуется включать в состав системы мониторинга бриллюэновский оптический импульсный рефлектометр (BOTDR – Brillouin optical time-domain reflectometer).

2. Сведения из теории

Для обеспечения долголетней работы необходимы соответствующие условия эксплуатации и главное из них – отсутствие механических напряжений в ОВ.

Долговечность ОВ зависит от степени его натяжения и температуры [1–3].

Повышенное натяжение ОВ (порядка 0.2 % и более) в проложенных ОК влияет на долговечность ВОЛС [6–10].

Для ОК, проложенных под землей, различного рода деформации грунта, проявляющиеся по той или иной причине, могут повлиять на возникновение натяжений в ОВ. Даже незначительные подвижки слоев грунта могут привести к опасным натяжениям ОВ в ОК [1–4].

Впервые с указанными проблемами столкнулись в Японии, что объясняется частыми землетрясениями и высокой плотностью расположения высотных зданий, мостов и транспортных магистралей.

Так как кварцевое волокно, защитные элементы ОК и материалы коммуникаций имеют различные коэффициенты теплового расширения, то в случае резкого перепада температуры могут возникать существенные напряжения внутри ОВ из-за неравномерного расширения соприкасающихся материалов. В результате большие колебания температуры окружающей среды могут привести к опасным натяжениям ОВ [6, 8].

В настоящее время все более популярным становится метод прокладки ВОЛС с использованием подвесной технологии (подвешивание ОК на высоковольтных опорах ЛЭП и т.п.). При этом, как и в случае с обычным электропроводом, возникает проблема обледенения определенных участков кабеля в зимний период. Под весом льда могут появиться деформации ОК, что приведет к появлению напряжений внутри ОВ и может значительно сократить долговечность ОК [1, 6, 9].

Другими факторами, влияющими на срок службы и эффективность работы ВОЛС, являются температурные изменения в ОВ [11, 12]. Изменение температуры участка ВОЛС может наблюдаться в результате повреждений на трассе прокладки ОК. Например, существенное повышение температуры участка ВОЛС может наблюдаться при прорыве теплотрассы в месте прокладки ОК. В зимнее время из-за появления трещин в почве или иных разрушений защитных элементов на трассе прокладки ОК будет наблюдаться понижение температуры «проблемного» участка ВОЛС [11]. Своевременное обнаружение такого участка позволяет принять необходимые меры по устранению аварии до разрушения ВОЛС.

В связи с наличием вышеперечисленных проблем возникает необходимость в получении достоверной информации о механических натяжениях и изменениях температуры в ОК.

Для обнаружения механически напряженных участков ВОЛС (натяжения ОВ) или участков с изменённой температурой применяются BOTDR [4–7].

В основу работы BOTDR положен метод бриллюэновской рефлектометрии, основанный на анализе спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (СРМБ) в световоде, которое наблюдается при введении в ОВ излучения повышенной мощности.

Компоненты СРМБ имеют частотный сдвиг на величину, пропорциональную натяжению ОВ и его температуре. Определив положение максимумов СРМБ вдоль световода и вычислив бриллюэновский сдвиг частоты (f_B – так называется частота максимума СРМБ), можно получить картину распределения натяжений в ОВ, найти их характеристики и проанализировать причины, вызвавшие эти изменения СРМБ [2–6].

3. Постановка задачи

С целью изучения особенностей рефлектограмм ОВ ВОЛС, находящихся под воздействием опасных факторов, с помощью рефлектометров различных видов были проведены экспериментальные исследования с OTDR E81162C JDSU, BOTDR «Ando AQ 8603», OTDR «EXFO FTB-400» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

Исследование поведения СРМБ ОВ различных типов, а также их зависимостей от внешних механических воздействий и температуры было проведено в предшествующих работах [7–12].

4. Результаты экспериментов

Для изучения реакции системы мониторинга ВОЛС ONMSi на неисправности был проведен следующий эксперимент. На одном из участков ВОЛС была создана аварийная ситуация: в тестируемом световоде было нарушено подключение патч-корда (было частично ослаблено крепление оптического соединителя, что привело к нарушению оптического пути).

После обнаружения этого события система мониторинга выдала сообщение в службу контроля об аварийной ситуации, в котором содержалась информация о месте повреждения, возможной причине, вызвавшей аварию, расстоянии до места повреждения, изменении затухания по сравнению с эталонной рефлектограммой и затухании в линии. В сообщении также приведены файлы с аварийными рефлектограммами.

На рис. 1 представлена рефлектограмма в «проблемном» месте в текущий момент времени (при аварии – «2»), а также рефлектограмма (эталонная – «1») нормально работающей линии (момент времени, предшествующий аварии).

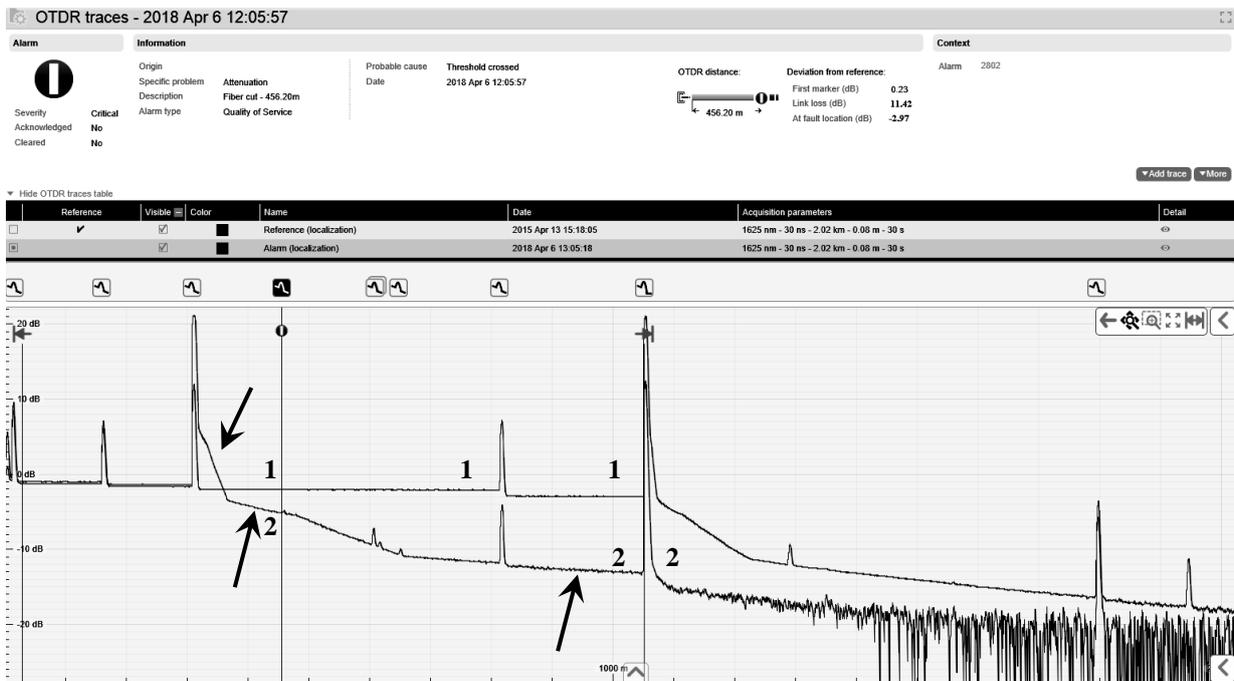


Рис. 1. «Эталонная» и «аварийная» рефлектограммы OTDR

Из рефлектограммы видно, что авария является критической. В месте аварии существенно превышен допустимый порог затухания, что и стало сигналом о наличии повреждения в ОВ. Так как OTDR измеряет именно оптическое расстояние в ОВ, для устранения повреждения необходимо провести расчет реальной физической длины ОВ и определить конкретное место повреждения в ВОЛС с учетом изгибов трассы прокладки ОК, показателя преломления ОВ и коэффициента повива ОВ в ОК [2, 5].

После восстановления контакта патч-корда (соединитель подключен с нормально закрепленным коннектором) система мониторинга отправила в службу контроля сообщение об устранении аварийной ситуации, в котором также содержится рефлектограмма текущего состояния ОВ ВОЛС, из которой следует, что рефлектограмма световода вернулась в исходное положение и теперь ОВ ВОЛС снова работает в нормальном режиме.

Особый интерес представляет обнаружение участков ВОЛС с повышенными напряжениями [8–10] и с измененной температурой [11, 12].

На рис. 2 представлена развернутая рефлектограмма OTDR с «проблемным» участком (в области 1.2 км), который подвергнулся нагреву, охлаждению и продольным растягивающим воздействиям.



Рис. 2. Рефлектограмма OTDR для «проблемного» участка

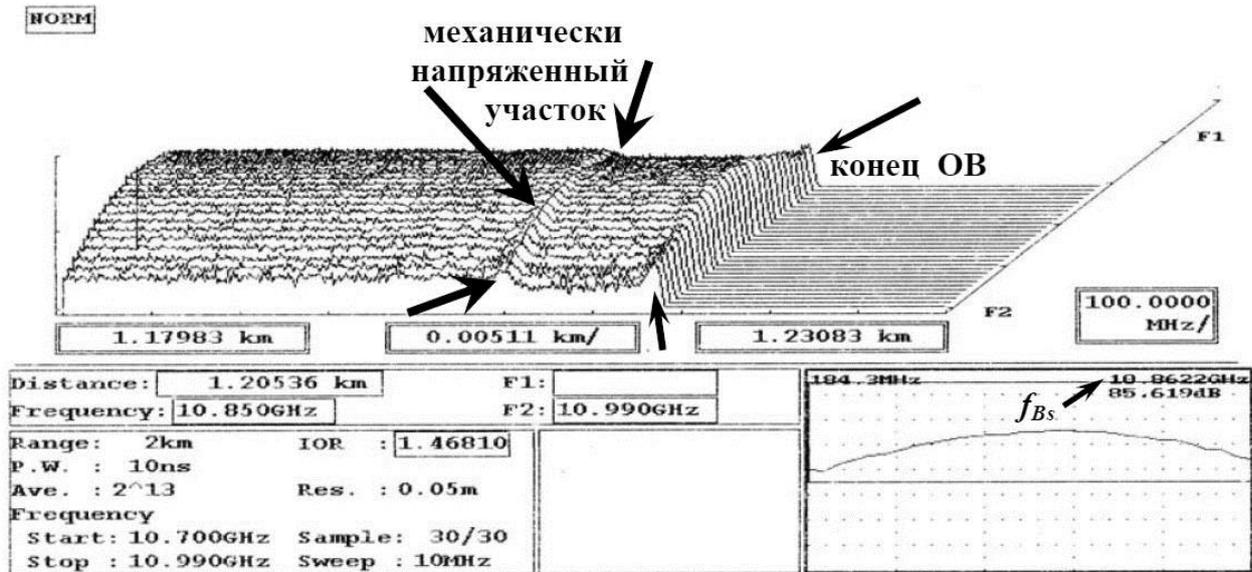


Рис. 5. Рефлектограмма BOTDR при растягивающем воздействии на участок ОВ

В растягиваемом месте (сплошная стрелка на рис. 6) наблюдается незначительное увеличение натяжения (на 0.03 %) относительно ненапряжённого участка (штриховые стрелки на рис. 6).



Рис. 6. График натяжения при растягивающем воздействии на участок ОВ

Таким образом, BOTDR успешно обнаружил «проблемный» участок ОВ как с изменённой температурой [3, 4], так и с повышенным натяжением [5, 6], которые на рефлектограммах OTDR не наблюдались.

В следующих экспериментах исследовались ОВ проложенного ОК, в котором были выявлены характерные «проблемные» участки, имеющие разные степени деградации ОВ.

Данная ситуация возникла после выхода из строя двух ОВ (OTDR системы мониторинга оператора связи показал обрыв ОВ) из ОК. При этом в других ОВ этого ОК OTDR проблем не обнаружил.

Световой сигнал в ОВ, находящихся при повышенном натяжении (более 0.2 %), вызывает «раскачивание» микротрещин, которые неизбежно возникают при кристаллизации квар-

цевого стекла в процессе производства ОВ. Это и приводит к росту этих микротрещин в процессе эксплуатации ВОЛС (медленному – при натяжении около 0.2 % или быстрому – при натяжении более 1 % [1, 2]), а в итоге – к деградации ОВ и его преждевременному разрушению.

На рис. 7 представлена BOTDR-рефлектограмма картины СРМБ вдоль ОВ. Сплошной стрелкой отмечен выявленный «проблемный» участок (f_{Bs}), на котором наблюдается существенное изменение СРМБ (f_{Bs} – смещение f_B). При этом профиль СРМБ на нормальном участке отмечен штриховой стрелкой (f_{Bs} составляет 10.82 ГГц).

На «проблемном» участке заметно смещение СРМБ в сторону высших частот (F2), что связано с существенным натяжением ОВ в данном месте.

С помощью BOTDR «Москабель–Фуджикура» было найдено «проблемное» место и обнаружены ОВ, находящиеся в предаварийном состоянии из-за повышенного натяжения.

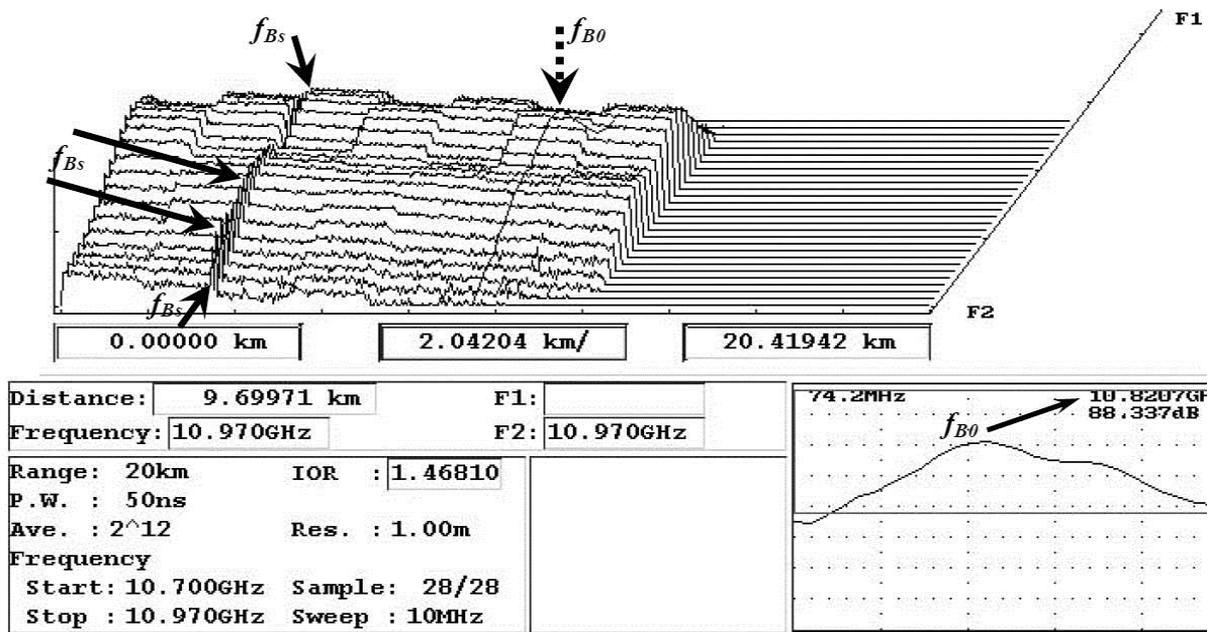


Рис. 7. BOTDR-рефлектограмма СРМБ в «проблемном» ОК

На рис. 8 представлена развёрнутая BOTDR-рефлектограмма картины СРМБ в «проблемном» месте ОВ.

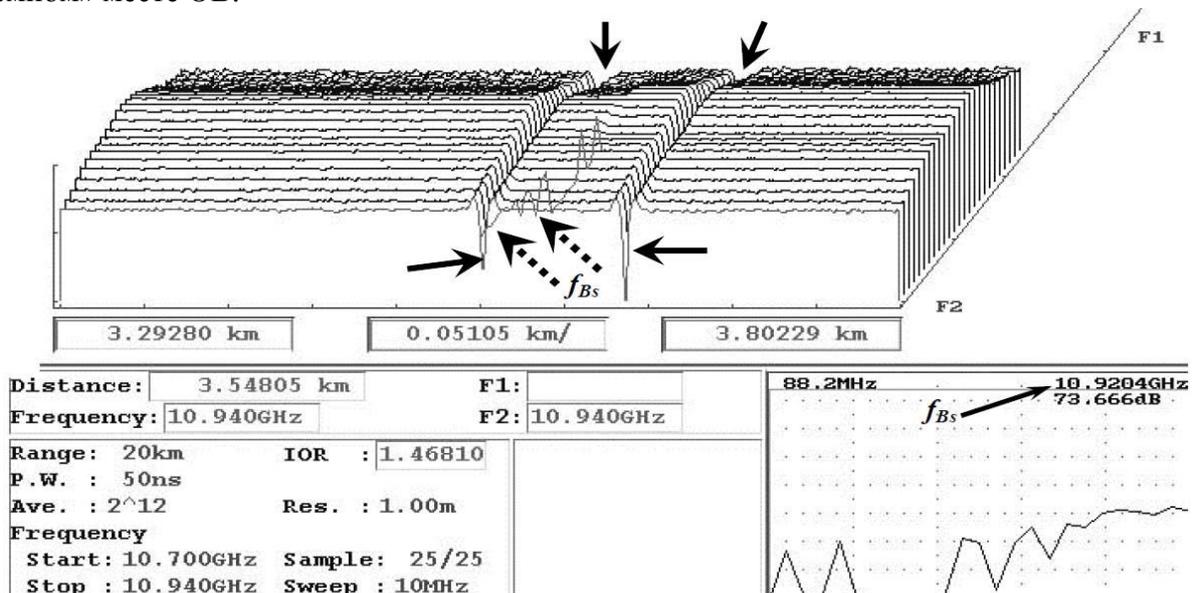


Рис. 8. Развёрнутая рефлектограмма СРМБ в «проблемном» месте ОВ

Сплошными стрелками отмечены изменения СРМБ в «проблемном» месте световода, а штриховыми – профиль СРМБ в «проблемном» месте.

Из рефлектограммы видно, что наблюдается смещение в сторону повышения частоты (F_2). f_{B_s} в этом месте составляет 10.93 ГГц.

Хотя данное ОВ находится в эксплуатации и информация по нему по-прежнему передаётся, а OTDR не находит каких-либо проблем, тем не менее это ОВ находится в предаварийном состоянии и со временем деградация его структуры приведёт к разрушению ОВ, что уже может обнаружить обычный OTDR.

Ниже представлены мульти-рефлектограммы BOTDR (зависимости по длине световода натяжения (Strain), профиля СРМБ, ширины СРМБ и потерь), на которых можно заметить как «предавварийное» состояние ОВ (рис. 9), так и еще только потенциально «опасное» (рис. 10).

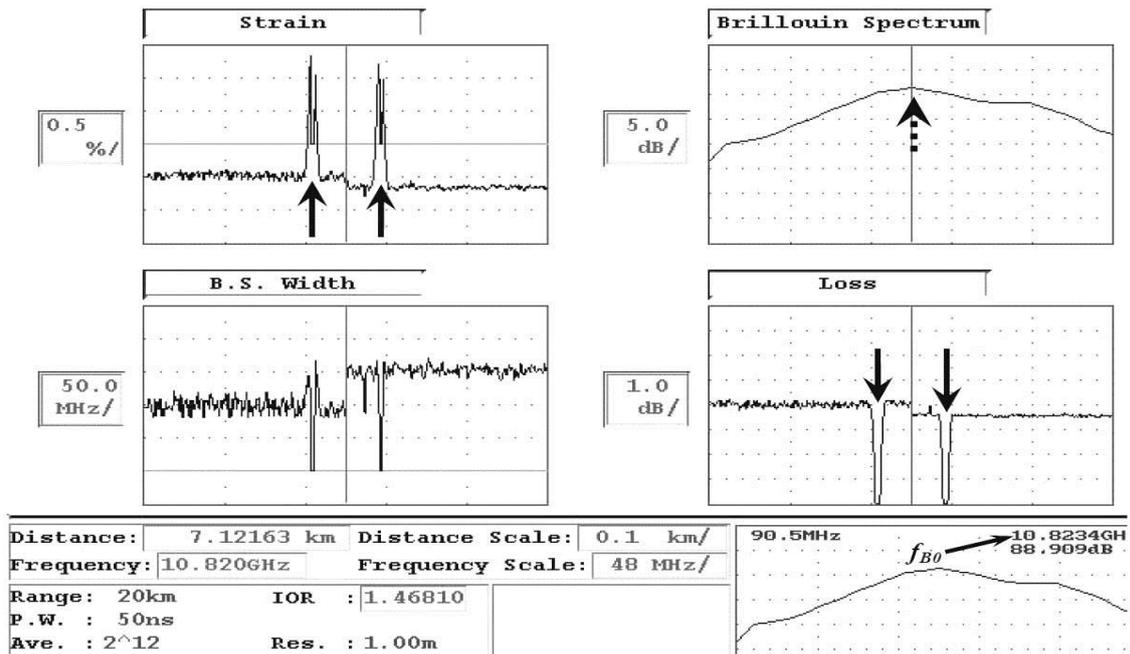


Рис. 9. Мульти-рефлектограмма BOTDR в «предавварийном» ОВ

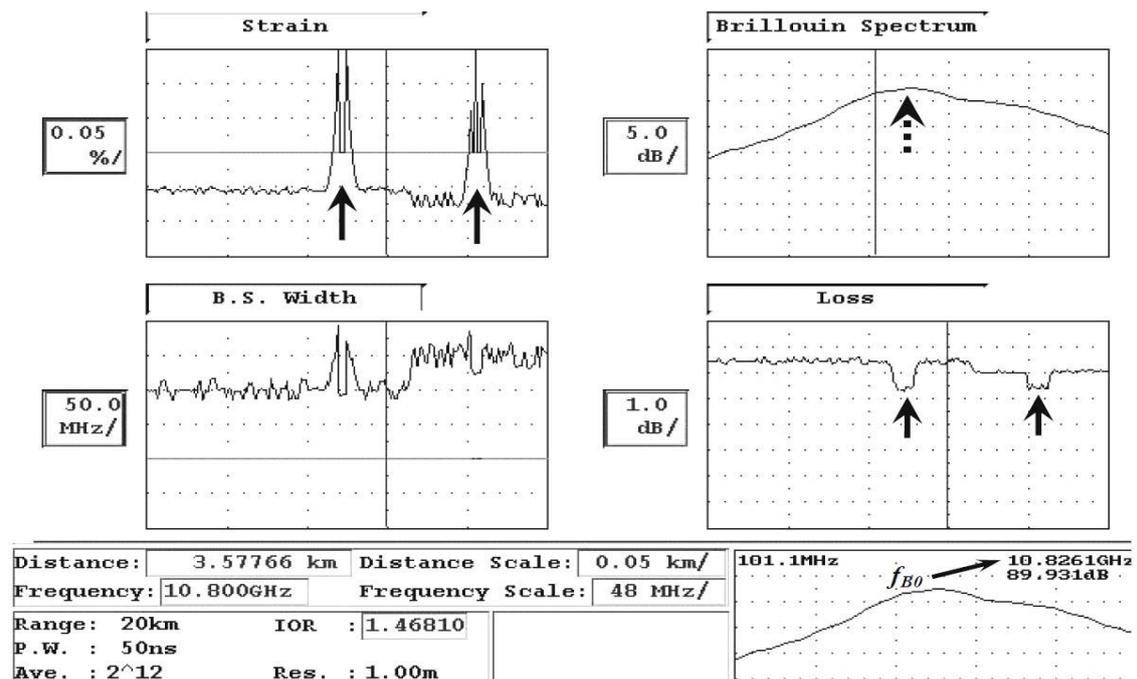


Рис. 10. Мульти-рефлектограмма BOTDR в ОВ с потенциально «опасным» местом

На мульти-рефлектограмме BOTDR в «предаварийном» состоянии ОВ (рис. 9) мы наблюдаем и натяжение более 1 %, и резкое повышение затухания, и нарушение профиля СРМБ (профиль этого СРМБ представлен на рис. 8 в правом нижнем углу).

Такое ОВ даже после устранения факторов, которые привели к сильной механической нагрузке на ОК, желательно заменить на новое, поскольку при таких условиях долговечность такого ОВ существенно уменьшается и в этом месте «заложено» возможное разрушение ОВ.

На мульти-рефлектограмме BOTDR, представленной на рис. 10, ОВ находится в потенциально «опасном» состоянии, но после устранения общего для всех волокон ОК раздавливающего фактора это волокно вернётся в нормальное состояние с сохранением заявленного производителем срока службы.

На рис. 11 показана развёрнутая картина натяжения вдоль световода, соответствующая мульти-рефлектограмме на рис. 10.

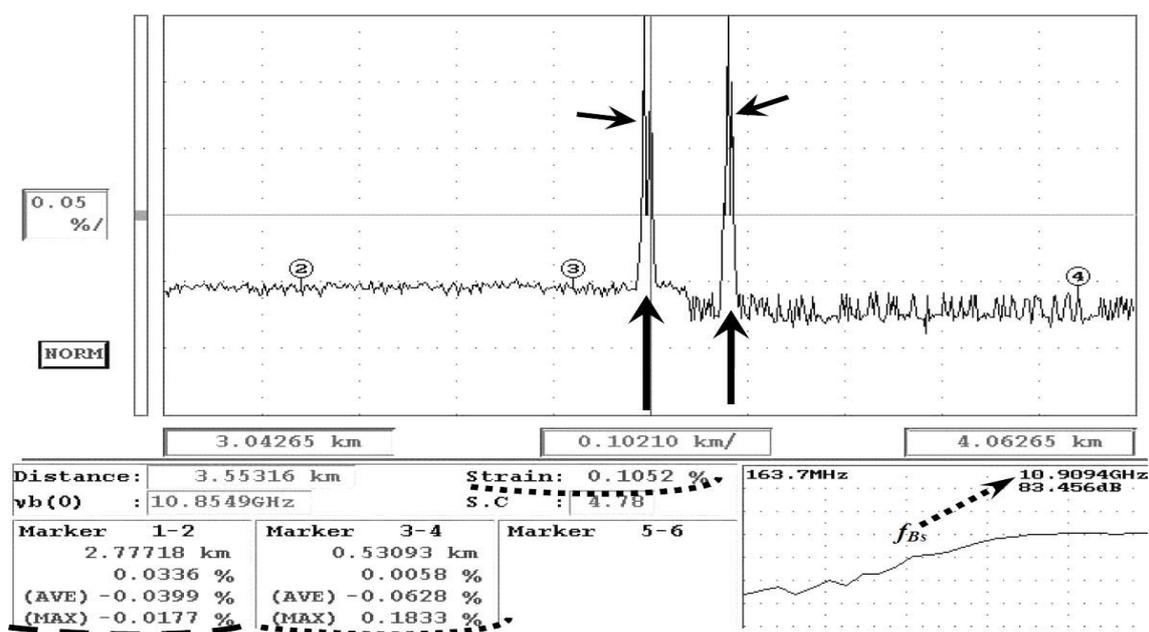


Рис. 11. Картина натяжения в ОВ с «опасным» местом

Из рис. 11 видно, что натяжение в этом месте повысилось на 0.2 % ($f_{Bs} = 10.91$ ГГц) относительно ненапряжённого состояния. Изменения максимума СРМБ показаны на рис. 11 штриховой стрелкой. Изменения натяжения на нормальном и напряжённом участках отмечены различными штриховыми линиями.

После проведённого анализа BOTDR-рефлектограмм для ОВ исследуемого ОК были локализованы участки трассы, требующие тщательного изучения факторов, которые вызвали опасные механические нагрузки на ОК. После устранения этих факторов и восстановления «проблемных» участков ОВ ВОЛС вернулась в нормальный рабочий режим.

5. Заключение

Проведённый анализ рефлектограмм предаварийных и потенциально «проблемных» участков показал, что BOTDR обнаружил такие участки ОВ заблаговременно до начала его разрушения ОВ, чего не смог сделать OTDR. OTDR может обнаружить такие участки только при уже нарушенном оптическом пути.

Метод бриллюэновской рефлектометрии позволяет осуществлять раннюю диагностику ОВ ВОЛС и устранять проблемы в ОВ на ранней стадии, что дает возможность при устранении мешающих факторов вернуть ВОЛС в безопасное работоспособное состояние. Системы мониторинга с обычными OTDR не могут решить эту задачу.

У ОВ различных классов наблюдается существенное различие профилей СРМБ, что можно использовать для классификации ОВ в ОК [13, 14]. Даже у однотипных ОВ различных производителей начальное значение f_B может отличаться [13, 14].

Источник финансирования

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).

Литература

1. Богачков И. В., Горлов Н. И. Методы и средства мониторинга и ранней диагностики волоконно-оптических линий передачи: монография. Омск: изд-во ОмГТУ, 2013. 192 с.
2. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон связи. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
3. Богачков И. В., Горлов Н. И. Совместные испытания оптических импульсных рефлектометров различных видов для ранней диагностики и обнаружения «проблемных» участков в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. 2017. № 37. С. 75–82.
4. Bogachkov I. V., Gorlov N. I. Joint testing of optical pulse reflectometers of various types for early diagnostics and detection of “problem” sections in optical fibers // IEEE 13th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings (APEIE). 2016. V. 1. P. 152–156.
5. Bogachkov I. V., Trukhina A. I. Detection of sections with slightly changed optical characteristics in fiber optical communication lines // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, 2017. P. 1–6.
6. Акопов С. Г., Васильев Н. А., Поляков М. А. Использование бриллюэновского рефлектометра при испытаниях оптического кабеля на растяжение // Lightwave. 2006. № 1. С. 23–25.
7. Богачков И. В., Горлов Н. И. Экспериментальные исследования влияния поперечных воздействий на оптические волокна на спектр бриллюэновского рассеяния и характеристики натяжения // Тр. XII-ой междунар. конф. IEEE АПЭП. Новосибирск, 2014. Т. 3. С. 124–130.
8. Bogachkov I. V. A Detection of strained sections in optical fibers on basis of the Brillouin relectometry method // T-comm. 2016. Т. 10, № 12. С. 85–91.
9. Богачков И. В., Горлов Н. И. Экспериментальные исследования характеристик натяжения оптических волокон // Тр. XII-ой междунар. конф. IEEE АПЭП. Новосибирск, 2014. Т. 3. С. 119–123.
10. Богачков И. В., Горлов Н. И. Экспериментальные исследования влияния продольных растягивающих нагрузок на спектр бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. 2015. № 31. С. 81–88.
11. Богачков И. В., Горлов Н. И. Обнаружение участков с измененной температурой волоконно-оптических линий связи методом бриллюэновской рефлектометрии // Вестник СибГУТИ. 2015. № 32. С. 74–81.
12. Bogachkov I. V. Experimental researches of temperature dependences of Brillouin backscatter spectrum in optical fibers of various types // Proc. Dynamics of systems, mechanisms and machines, 2016. P. 1–7.
13. Bogachkov I. V. Detection of initial level of Brillouin frequency shift in optical fibres of different types // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1015. P. 1–6.

14. *Bogachkov I. V.* A Definition of basis-level of the Brillouin frequency shift in optical fibers of various types // Moscow workshop on electronic and networking technologies (MWENT-2018), Moscow, 2018. P. 1–4.

*Статья поступила в редакцию 27.06.2018;
переработанный вариант – 10.07.2018.*

Богачков Игорь Викторович

к.т.н., доцент, доцент кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета (644050, Омск, пр-т Мира, 11), IEEE Senior Member, e-mail: bogachkov@mail.ru.

Горлов Николай Ильич

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Линии связи» Сибирского государственного университета телекоммуникации и информатики (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), действительный член Метрологической академии, e-mail: gorlovnik@yandex.ru.

Detection of the pre-accident optical fiber sections via reflectometers

I. V. Bogachkov, N. I. Gorlov

The research results of optical cable sections in the pre-emergency state due to the increased strain or its optical fiber temperature change both by means of traditional optical pulse reflectometers and with the help of the Brillouin optical reflectometer are presented in this paper. The results of the tests confirmed the advantage of the Brillouin reflectometry method for early diagnostics and detection of “problem” sections of fiber-optical communication lines.

Keywords: optical fiber, early diagnostics, Mandelstam–Brillouin Scatter, reflectometry, Brillouin reflectometry.