

УДК 621.372.8: 621.396: 621.315

Совместные испытания оптических импульсных рефлектометров различных видов для ранней диагностики и обнаружения «проблемных» участков в оптических волокнах

И. В. Богачков, Н. И. Горлов

В статье приведены результаты экспериментальных исследований участков оптических волокон с измененными температурой и натяжением с помощью обычного и бриллюэновского оптических импульсных рефлектометров. Результаты испытаний подтвердили преимущество метода бриллюэновской рефлектометрии для ранней диагностики и обнаружения «проблемных» участков волоконно-оптических линий связи.

Ключевые слова: бриллюэновское рассеяние, рефлектометрия, ранняя диагностика, опто-волокно, бриллюэновская рефлектометрия.

1. Введение

Одним из основных направлений развития современных инфокоммуникационных технологий и систем связи является всестороннее совершенствование волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), обеспечивающих возможность передачи на значительные расстояния большого объема информации с наивысшей скоростью. Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) в настоящее время являются доминирующим видом высокоскоростных линий связи. Столь интенсивный прогресс волоконно-оптических телекоммуникационных технологий невозможен без организации контроля параметров ВОЛС.

Простои линий связи сокращают доходы операторов, ухудшают их репутацию, уменьшают приток инвестиций, снижают качество обслуживания. Поэтому в настоящее время операторы связи уделяют особое внимание мониторингу и ранней диагностике состояния линий связи [1–5].

Важной задачей мониторинга и ранней диагностики ВОЛС является получение своевременной и достоверной информации о физическом состоянии оптических волокон (ОВ), находящихся в проложенных оптических кабелях (ОК). Для обеспечения долговечной работы необходимы соответствующие условия эксплуатации, и главное из них – отсутствие механических напряжений в ОВ.

Все изгибы ОК с радиусом, меньшим рекомендованной величины, различного рода защемления или неправильный крепеж кабеля могут обернуться в итоге повышенным натяжением ОВ в ОК и его преждевременным разрушением.

Так как кварцевое волокно, защитная оболочка ОК, средства его крепежа, грунт 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 разрушению ОВ.

В данное время значительная часть современных инфокоммуникационных линий связи проложена под землей. Деформации грунта различного рода, проявляющиеся по разным причинам, будут влиять на возникновение напряжений в ОВ. Даже незначительные подвижки слоев грунта могут привести к разрушению ОВ.

В настоящее время все более популярным становится метод прокладки ВОЛС с подвешиванием ОК на высоковольтных опорах ЛЭП. При этом возникает другая проблема – обледенение определенных участков кабеля в зимний период. Под весом льда могут появиться деформации ОК, что приведет к появлению напряжений внутри ОВ и может значительно сократить срок службы ОК [1–3].

Таким образом, для оценки надежности ВОЛС необходимо иметь достоверную информацию о **натяжении** ОВ в ОК.

Считается, что обычные оптические импульсные рефлектометры (OTDR) не в состоянии определить натяжение ОВ. Для обнаружения механически напряженных участков ВОЛС (натяжения ОВ) применяется метод бриллюэновской рефлектометрии [1–5].

2. Сведения из теории

Распространение световых импульсов повышенной мощности в ОВ сопряжено с проявлением нелинейных эффектов. Для дальнейшего анализа представляет интерес один из нелинейных эффектов – бриллюэновское рассеяние (БР), особенностью которого является его зависимость от таких параметров ОВ, как механическое натяжение и температура [1–11].

Как известно, при распространении излучения вдоль ОВ оно рассеивается на оптических неоднородностях. Большая часть света рассеивается на микроскопических изменениях плотности плавленого кварцевого стекла, это рассеяние называется рэлеевским рассеянием (рис. 1). На этом явлении основан принцип действия обычных OTDR, нашедших в настоящее время широкое применение.

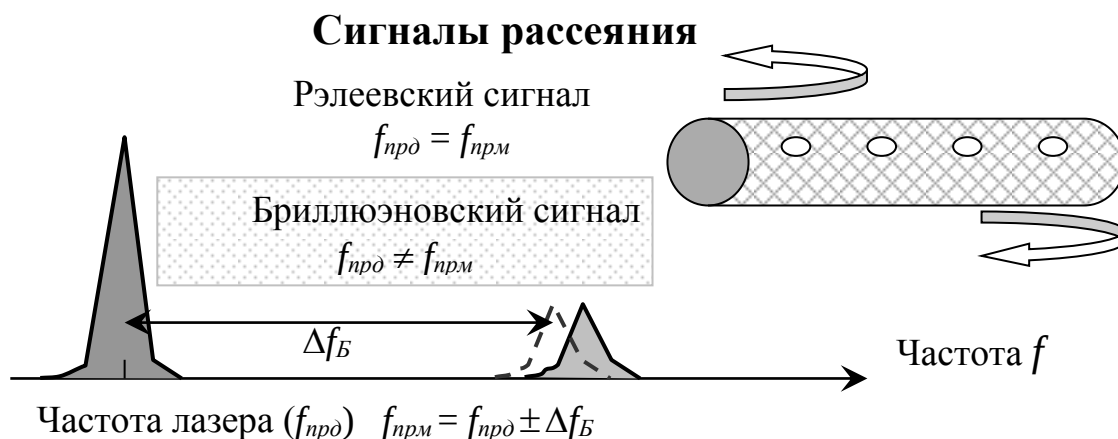


Рис. 1. Принцип действия бриллюэновских рефлектометров

Другой вид неоднородностей, имеющих в ОВ, обусловлен тепловыми колебаниями атомов. Так, подобно инфракрасному тепловому электромагнитному излучению, в оптоволокне всегда присутствуют гиперзвуковые волны. Рассеяние света на вызванных этими волнами подвижных неоднородностях показателя преломления и называется БР. Главным отличием БР от рэлеевского является то, что вызывающие его неоднородности подвижны и приводят к смещению частоты отраженного сигнала (рис. 1).

В твердом веществе молекулы расположены с очень большой плотностью и сила взаимодействия между микрочастицами велика, в результате чего продольные упругие колебания

передаются соседним молекулам и в веществе распространяется бегущая упругая (гиперакустическая) волна. Для возбуждения такой волны необходимо, чтобы возбуждающие её фотоны имели узкий частотный спектр порядка 50–100 МГц.

Энергетический спектр этих упругих колебаний также квантован, эти кванты называются акустическими фононами. Частотный спектр акустических фононов весьма широк и достигает диапазона частот порядка 10^{13} Гц. На этих фононах происходит рассеяние света.

Это явление и получило название рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (далее – бриллюэновское рассеяние, БР). Вследствие эффекта Доплера частота рассеянного оптического сигнала отличается от частоты лазера и, как следствие, от частоты рэлеевского рассеяния.

Бриллюэновский сдвиг частоты f_B пропорционален скорости гиперзвука и зависит от натяжения ОВ, подобно тому как натяжение струны меняет ее тон. Поэтому, измерив распределение величины f_B вдоль ОВ, можно понять картину распределения механических напряжений (натяжений) в нём. Для этого прибор должен совмещать возможности оптического рефлектометра и оптического спектрального анализатора. Так как эта частота пропорциональна величине натяжения в ОВ, то таким образом находится распределение этого натяжения вдоль ОВ (рис. 2).

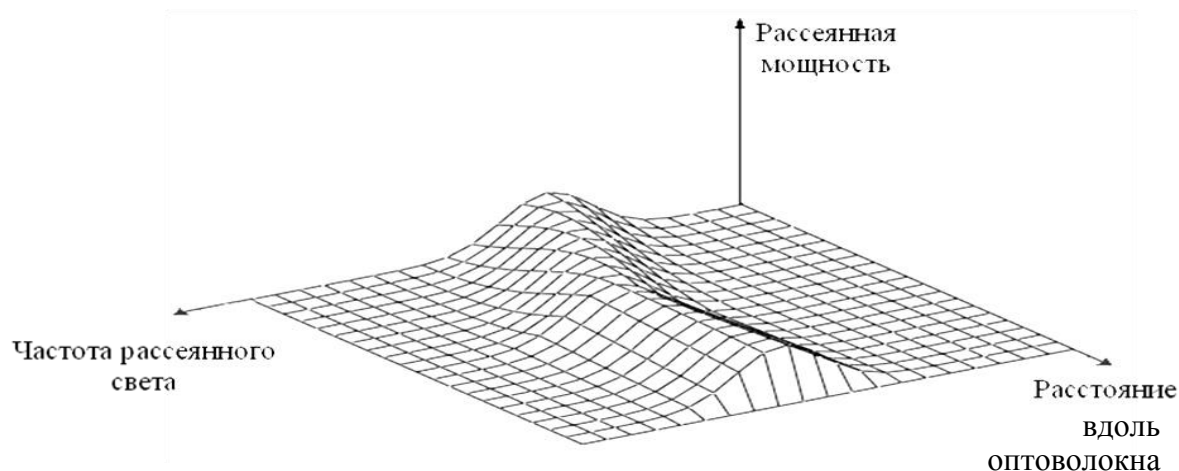


Рис. 2. Распределение спектра бриллюэновского рассеяния в ОВ

Рефлектограммы, полученные с помощью BOTDR, обладают двумя характерными особенностями.

Во-первых, в них отсутствуют выбросы сигнала, вызванные отражением импульсов света от оптических разъемов и торца волокна. В традиционных OTDR эти отраженные импульсы приводят к насыщению приемного устройства и появлению «мертвых зон». В BOTDR эти импульсы не регистрируются, так как при отражении от оптических разъемов и торца ОВ частота света не меняется (если нет изменений натяжения). В BOTDR регистрируются только те отраженные импульсы света, несущая частота которых смещена на величину f_B [3–11].

Во-вторых, в BOTDR рефлектограмма не зашумлена, как это должно было бы наблюдаться при когерентном приеме рассеянного излучения, потому что в BOTDR регистрируется свет, рассеянный не на рэлеевских центрах (замороженных в волокне флуктуациях показателя преломления), а на тепловых флуктуациях показателя преломления (акустических фононах). Так как время жизни акустического фонона ($t_a = 1/\Delta f = 10^{-8}$ сек) мало по сравнению со временем измерений, то амплитуда и фаза волн, рассеянных на этих неоднородностях, эффективно усредняется [1–3].

Метод бриллюэновской рефлектометрии является одним из эффективных методов определения степени натяжения ОВ. В его основе лежит регистрация и последующий анализ спектра вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в ОВ.

Зондируя ОВ короткими импульсами, сканируя несущую частоту этих импульсов и анализируя картину распределения спектра бриллюэновского рассеяния (СБР) в ОВ, можно обнаружить местоположение распределенных нерегулярностей в ОВ и определить их характеристики [1–7].

3. Постановка задачи

С целью проверки результатов моделирования и выявления общих закономерностей рефлектограмм при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура» были проведены экспериментальные исследования с бриллюэновским оптическим импульсным рефлектометром (BOTDR) «Ando AQ 8603» и с обычным оптическим импульсным рефлектометром (OTDR) «EXFO FTB-400» участков ОВ с измененной температурой и натяжением.

4. Результаты экспериментов

Для экспериментальных исследований световод был составлен из обычного одномодового ОВ нормализующей катушки (длина 1.22 км).

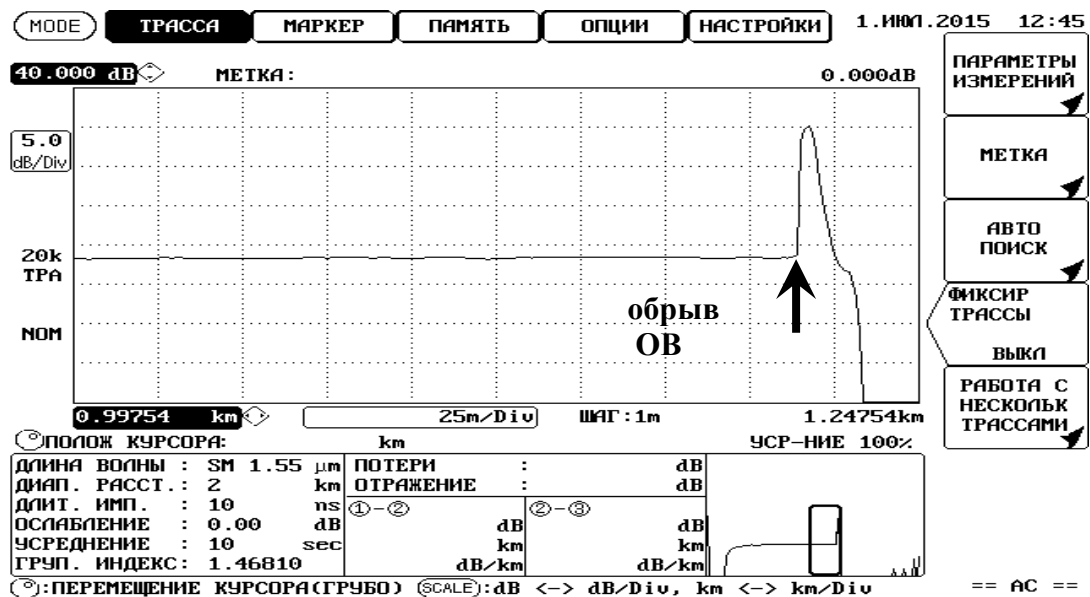


Рис. 3. Рефлектограмма OTDR при 25 °C

Ниже приведены примеры рефлектограмм OTDR и BOTDR для одного и того же световода, участок которого подвергался нагреву или продольному растяжению.

На рис. 3 приведена рефлектограмма OTDR.

Кроме «всплеска», характерного для конца (обрыва) ОВ, каких-либо «событий» в ОВ мы не наблюдаем.

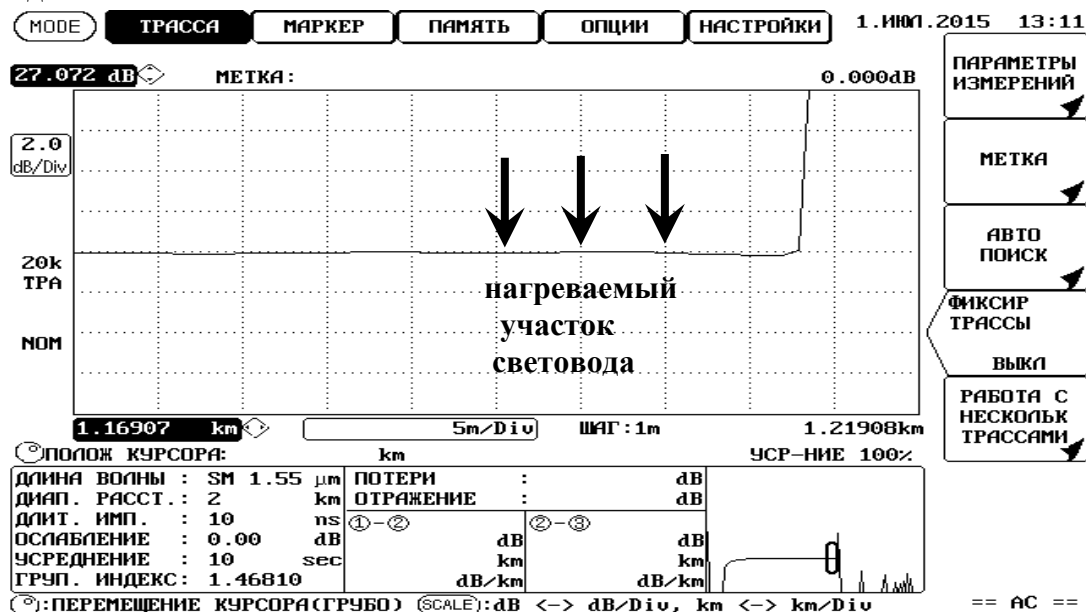


Рис. 4. Развернутая рефлектограмма OTDR для участка световода при 50 °C

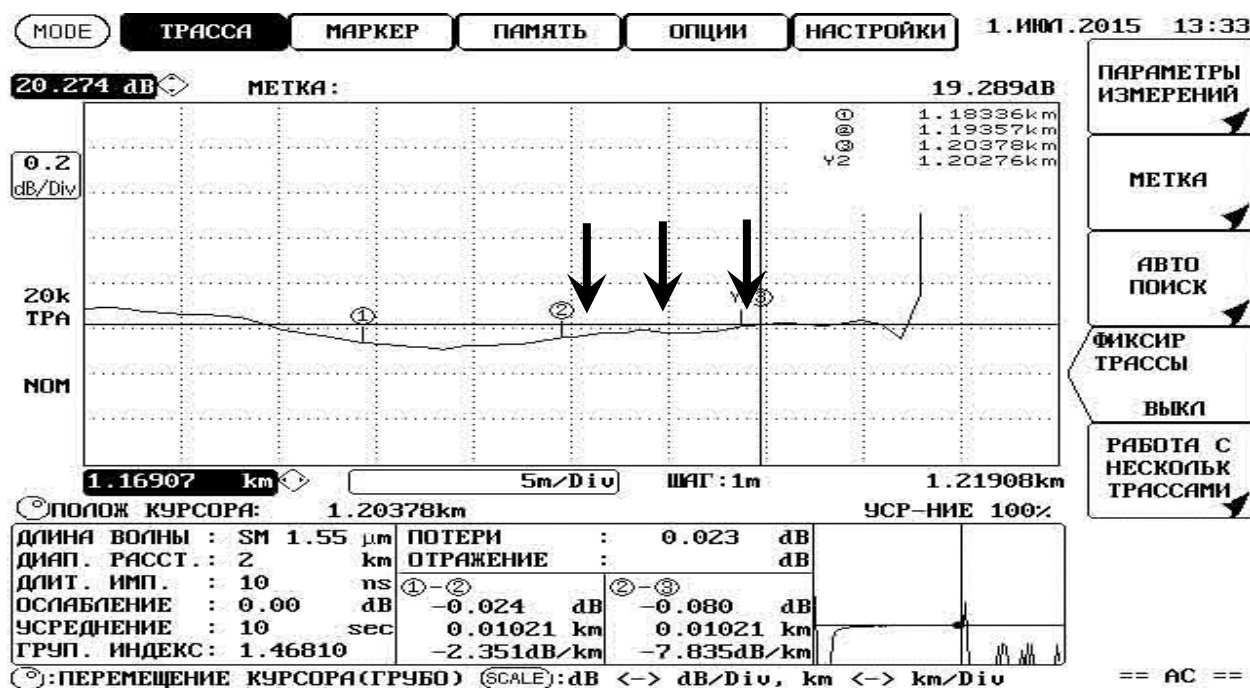


Рис. 5. Развернутая рефлектограмма OTDR для участка световода при 100 °C

На рис. 4 и 5 представлены развернутые рефлектограммы OTDR с участком, нагретым (в области 1.20 км) до 50 °C и 100 °C соответственно.

Каких-либо изменений на проблемном участке в рефлектограммах не наблюдается. Изменения на рис. 5 на исследуемом участке находятся в пределах ± 0.1 dB, это в пределах погрешности OTDR.

Увеличение температуры до 150 °C или приложение продольной растягивающей силы (до 4 Н) на рефлектограммах OTDR не обнаруживается.

Кроме приведенных выше рефлектограмм OTDR для сравнения на рис. 6 и 7 приведены рефлектограммы BOTDR для того же световода, нагретого до 100 °C.

На рис. 6 показана картина СБР в световоде при нагреве участка до 100 °C.

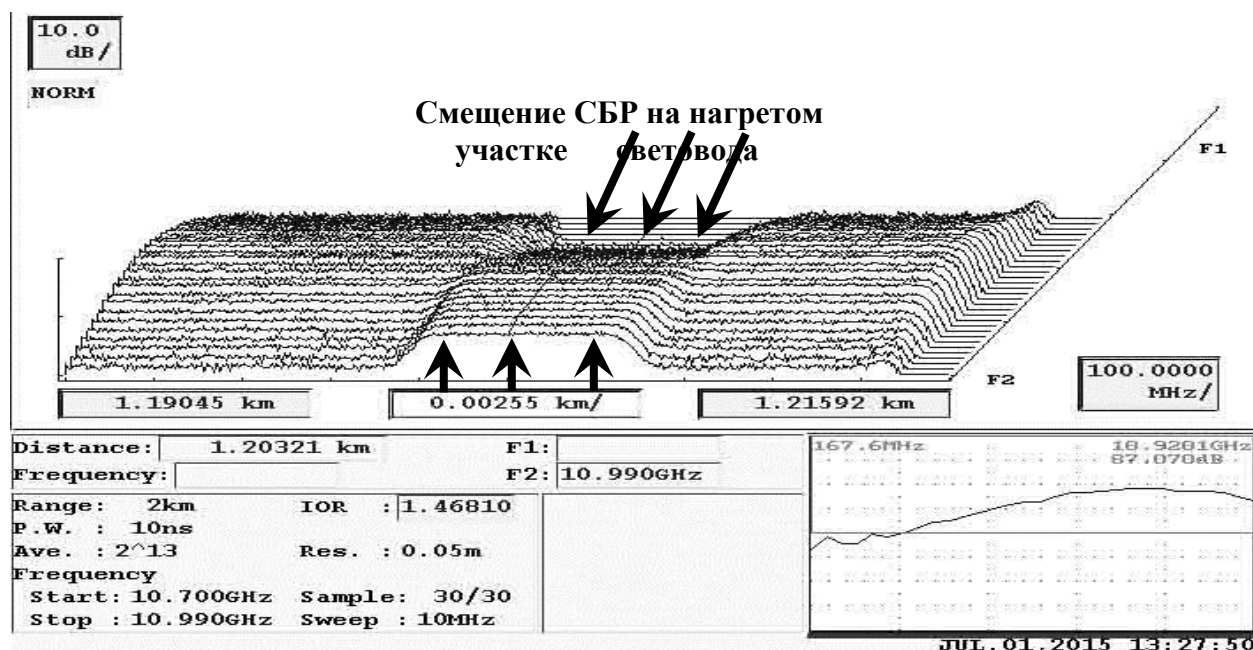


Рис. 6. Картина СБР (BOTDR) для того же участка ОВ при нагреве до 100 °C

Нагретый участок уверенно обнаруживается уже при нагреве до 35 °С и для более высоких температур отличается только масштабом [1–7]. Очевидна линейная зависимость.

На рис. 7 показана соответствующая картина распределения натяжения вдоль световода (при нагреве участка до 100 °С).

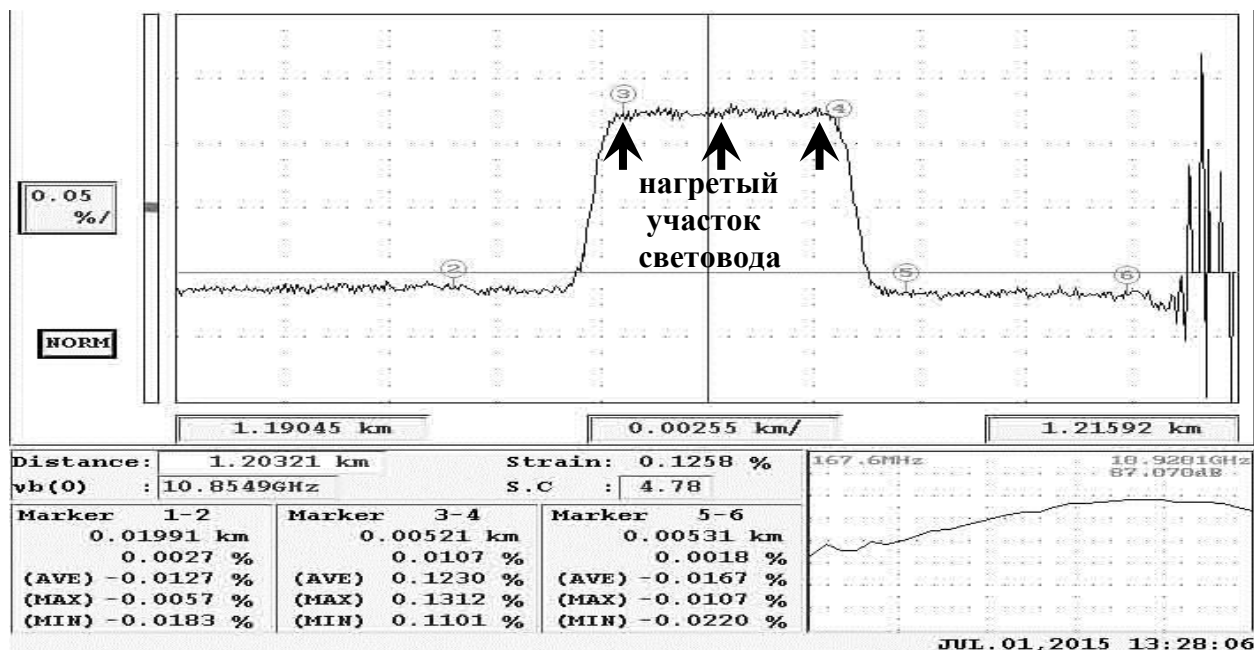


Рис. 7. Картина распределения натяжения вдоль световода при 100 °С

На рис. 8 приведена 3D-рефлектограмма (картина распределения СБР вдоль ОВ) BOTDR «Ando AQ 8603» для ОВ, находящегося внутри проложенного ОК длиной более 70 км. Стрелками обозначены изменения СБР вдоль ОВ.

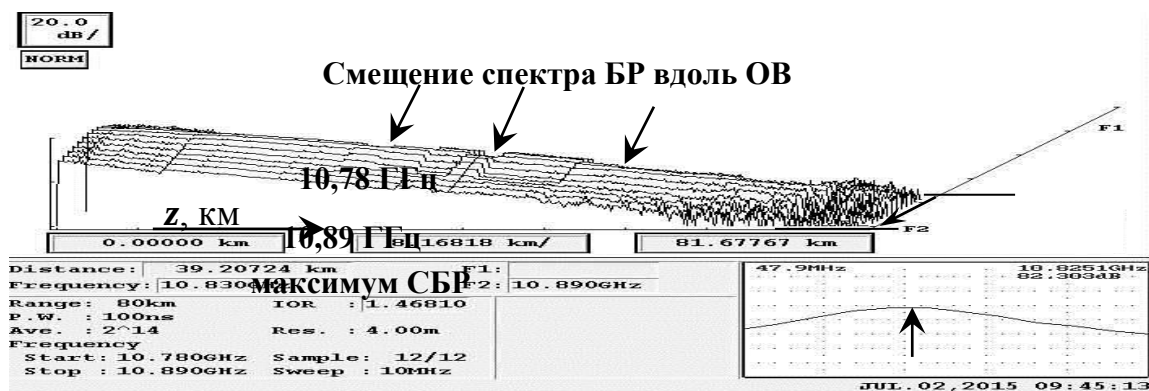


Рис. 8. Картина распределения СБР вдоль ОВ, находящегося в проложенном ОК длиной более 70 км

Каждое сечение 3D-рефлектограммы вдоль оси расстояний z является рефлектограммой ОВ для фиксированной частоты. Каждое сечение вдоль оси частот ($z = \text{const}$) – профиль СБР в этом сечении ОВ.

В правом нижнем углу рефлектограммы отображается максимум СБР для заданной координаты линии, а также характеристика профиля СБР в данном сечении ОВ. Например, в сечении ОВ $z = 39.2$ км максимум СБР будет наблюдаться на частоте 10.828 ГГц.

После обработки рефлектограммы СБР получается картина распределения натяжения этого ОВ вдоль продольной координаты, которая представлена на рис. 9.

Стрелками на рис. 9 обозначены участки линии, на которых заметны изменения натяжения ОВ.



Рис. 9. Картина распределения натяжения (strain) вдоль ОВ, соответствующая 3D-рефлектограмме, представленной на рис. 8.

Анализ показывает, что в данном случае эти натяжения не опасны (натяжение становится потенциально опасным при превышении уровня 0.2 %), но имеет смысл проверить ОК в центральной части трассы на наличие потенциально опасных факторов.

При этом аналогичная рефлектограмма OTDR «проблемных» участков ВОЛС не обнаруживает – выделяется только конец ВОЛС и стыки ОВ, полученные сварочным способом соединения ОВ.

При испытаниях BOTDR успешно обнаружил проблемный участок как с измененной температурой, так и с не критически измененным натяжением.

В настоящее время лидером в использовании бриллюэновской рефлектометрии является Япония. Это объясняется не только высоким уровнем технической культуры и оптоэлектроники, но и рядом географических факторов.

Из-за частых землетрясений японским операторам междугородной связи приходится решать вопрос о возможности дальнейшего использования ВОЛС. Из-за высокой стоимости выполнения землеотвода большинство линий выполнены по подвесной технологии и подвержены избыточным нагрузкам из-за ветра и обледенения. Также кабельные коллекторы в современных городах часто проходят вблизи транспортных магистралей и подвергаются вибрациям. На ОК также могут оказывать воздействие техногенные деформации грунта вблизи мостов и небоскребов [1, 3].

5. Заключение

Полученные результаты подтвердили, что BOTDR успешно обнаружил проблемный участок как с измененной температурой, так и с измененным натяжением.

Таким образом, метод бриллюэновской рефлектометрии позволяет осуществлять раннюю диагностику ВОЛС и устранять проблемы в ОВ на ранней стадии, пока изменения в ОВ не стали необратимыми и не привели к разрушению ОВ.

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.* Проектирование, строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий передачи: учеб. пособие: в 5 ч. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2013–2015.
4. *Bogachkov I. V., Maistrenko V. A.* The Modeling of the Brillouin Backscattering for Searching of Mechanical Strained Places in Optical Fibers // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2015. Omsk, 2015. P. 1–3.
5. *Bogachkov I. V., Ovchinnikov S. V., Maistrenko V. A.* Applying of Brillouin Scattering Spectrum Analysis for Detection of Distributed Irregularities in Optic Fibers and Estimation of Irregularities Parameters // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2013. Proceedings. Krasnoyarsk: Siberian Federal University. P. 1–5.
6. *Bogachkov I. V., Maistrenko V. A.* Experimental examinations of changes influence of the Brillouin backscattering spectrum in optical fibers on their characteristics // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, Dynamics 2014. Proceedings. P. 1–10.
7. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Экспериментальные исследования влияния продольных растягивающих нагрузок на спектр бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. 2015. Вып. 3 (31). С. 81–88.
8. *Bogachkov I. V., Gorlov N. I.* Experimental Examination of the Strain Characteristics of Optical Fibers // IEEE 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. V. 1. P. 223–227.
9. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Экспериментальные исследования характеристик натяжения оптических волокон // Тр. XII-ой междунар. конф. IEEE АПЭП. 2014. Т. 3. С. 119–123.
10. *Bogachkov I. V., Gorlov N. I.* Experimental Researches of the Temperature Influence on Brillouin Backscattering Spectrum and Strain Characteristics of Optical Fibers // IEEE 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. V. 1. P. 190–194.
11. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Экспериментальные исследования влияния температуры на спектр бриллюэновского рассеяния и механические характеристики оптических волокон // Тр. XII-ой междунар. конф. IEEE АПЭП. 2014. Т. 3. С. 74–79.

*Статья поступила в редакцию 19.04.2016;
переработанный вариант – 06.05.2016*

Богачков Игорь Викторович

к.т.н., доцент, доцент кафедры средств связи и информационной безопасности Омского государственного технического университета, член IEEE, e-mail: bogachkov@mail.ru.

Горлов Николай Ильич

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой линии связи Сибирского государственного университета телекоммуникации и информатики, действительный член Метрологической академии, e-mail: gorlovnik@yandex.ru.

Joint examinations of optical pulse reflectometers of various kinds for early diagnostics and detection of "problem" sections in optical fibers

I. V. Bogachkov, N. I. Gorlov

The results of experimental examinations of optical fiber sections with temperature variations and strain by means of normal and Brillouin optical pulse reflectometers are presented in this paper. Results of the tests confirmed advantage of Brillouin reflectometry method for early diagnostics and detection of "problem" sections in fiber-optical communication lines.

Keywords: Brillouin backscattering, reflectometry, early diagnostics, optical fiber, Brillouin reflectometry.