УДК 621.372.8: 621.396: 621.315

Экспериментальные исследования спектра бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах со смещённой дисперсией

И. В. Богачков, Н. И. Горлов

В работе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик спектра бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах со смещённой дисперсией.

Ключевые слова: бриллюэновская рефлектометрия, ранняя диагностика, оптоволокно, смещённая дисперсия.

1. Введение

Важной задачей мониторинга и ранней диагностики волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является получение достоверной информации о физическом состоянии оптического волокна (ОВ). Для оценки надежности ВОЛС необходимо иметь достоверную информацию о натяжении ОВ в оптическом кабеле (ОК).

Обычные оптические импульсные рефлектометры не в состоянии определить натяжение ОВ. Одним из эффективных методов определения степени натяжения ОВ является метод бриллюэновской рефлектометрии [1–3], в основе которого лежит регистрация и последующий анализ спектра вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (далее – бриллюэновского рассеяния, БР) в ОВ. Для обнаружения механически напряженных участков (натяжения) ОВ разработаны бриллюэновские оптические рефлектометры (БОИР).

Одномодовые ОВ со смещённой дисперсией (DSF, dispersion-shifted single mode fiber) нашли распространение в протяженных ВОЛС, длина регенерационных участков которых составляет более 100 км. Эти ОВ хорошо зарекомендовали себя как по удельному затуханию, так и по пропускной способности. Однако известно, что в DSF нелинейные эффекты проявляются гораздо сильнее, чем в обычных ОВ.

Известно [1–4], что для получения необходимых для бриллюэновской рефлектометрии спектральных составляющих, обусловленных БР света, необходимо вводить сигнал повышенной мощности, превышающей порог БР.

Таким образом, в ОВ со смещенной дисперсией представляет особый интерес анализ спектра бриллюэновского рассеяния (СБР) и определение характеристик механически напряженных участков.

2. Сведения из теории

Распространение световых импульсов в ОВ сопряжено с одновременным воздействием нескольких нелинейных эффектов. Одним из эффектов, представляющих интерес для дальнейшего анализа, является БР, особенностью которого является его зависимость от таких параметров ОВ, как механическое натяжение и температура. В работах [1–4] были рассмотрены вопросы построения математических моделей БР в ОВ и исследования влияния параметров натяжения ОВ на его спектр.

Зондируя ОВ короткими импульсами повышенной мощности и сканируя несущую частоту этих импульсов, можно найти распределение спектра бриллюэновского рассеяния вдоль ОВ. Анализируя картину СБР в ОВ, можно обнаружить местоположение распределенных нерегулярностей в ОВ и определить их характеристики.

В ОВ со смещённой дисперсией частотная характеристика дисперсии смещена так, что минимальная («нулевая») дисперсия попадает в «окно» $\lambda = 1550$ нм. Это позволило достичь улучшения характеристик ОВ как по удельному затуханию, так и по пропускной способности.

Однако известно, что применение этих ОВ в волоконно-оптических системах со спектральным уплотнением (WDM, Wavelength Division Multiplexing) натолкнулось на трудности, связанные с проявлением нелинейных эффектов, таких как четырехволновое смешение (смешивание). Данная проблема потребовала поиска новых решений, что привело к появлению ОВ с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF), оптимизированных именно для протяженных WDM-систем.

Поскольку при работе БОИР уровни мощности сигнала, вводимого в ОВ, значительны и принципиально приводят к нелинейным эффектам (необходимым для реализации метода бриллюэновской рефлектометрии), представляет особый интерес анализ СБР и определение механически напряженных участков в ОВ со смещенной дисперсией.

3. Постановка задачи

С целью уточнения моделей, рассмотренных в [1–4], и выявления закономерностей рефлектограмм, полученных на основе анализа СБР, были проведены экспериментальные исследования ОВ со смещённой дисперсией (DSF) с БОИР «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель–Фуджикура».

4. Результаты экспериментов

В рассматриваемом ниже эксперименте изучался СБР в ОВ со смещённой дисперсией, оценивались его характеристики натяжения, был проведён анализ взаимного влияния ОВ с различными законами изменения дисперсии.

Световод был составлен из ОВ 1 нормализующей катушки (длина около 950 м), сваренного с протяженным ОВ 2 (катушка более 1.5 км) ***со смещённой дисперсией*** (DSF).

Оба ОВ – одномодовые.

На рис. 1 представлена картина СБР (3D-рефлектограмма) в области места сварки, на которой видно распределение СБР по длине световода.

Место сварки хорошо заметно по резкому изменению распределения СБР и натяжения. Взаимное проникновение СБР волокон друг в друга в месте сварки может привести к существенным искажениям результатов.

На рис. 2 показана соответствующая полученным картинам СБР в DSF в области стыка ОВ зависимость (мульти-рефлектограмма) натяжения (Strain), СБР, ширины СБР (B.S.W) и потерь (Loss).

Из рис. 1, 2 видно, что картина СБР у ОВ 2 (DSF) вместо обычного ярко выраженного «горба» на характеристике (что наблюдается у обычных ОВ) имеет 3 «горба», разделенных двумя провалами [5–8]. При этом отраженная от ОВ 2 волна со смещённым спектром проникла в ОВ 1 и привела к некоторому искажению спектра на небольшом участке ОВ 1, прилегающем к месту сварки [6–8].

Для сравнения на рис. 3 приведена мульти-рефлектограмма, взятая на участке световода с обычным ОВ (ОВ 1), на которой СБР имеет обычный характер (только один «горб»).

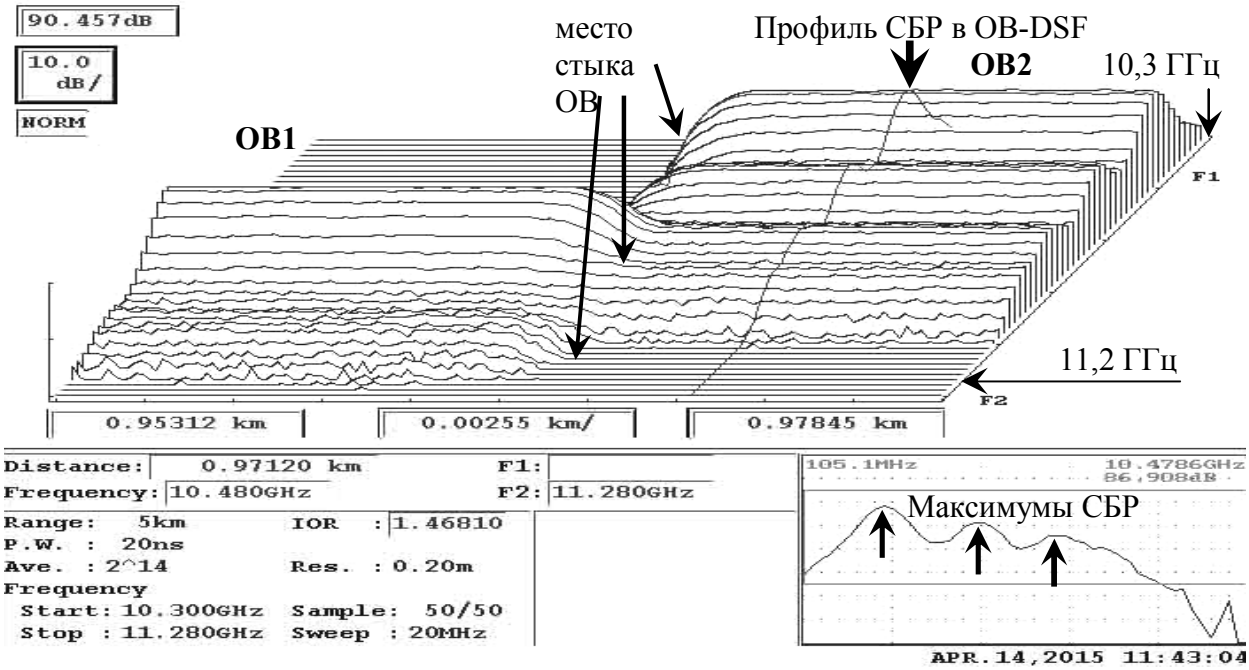

Рис. 1. Картина распределения СБР в области стыка с ОВ-DSF

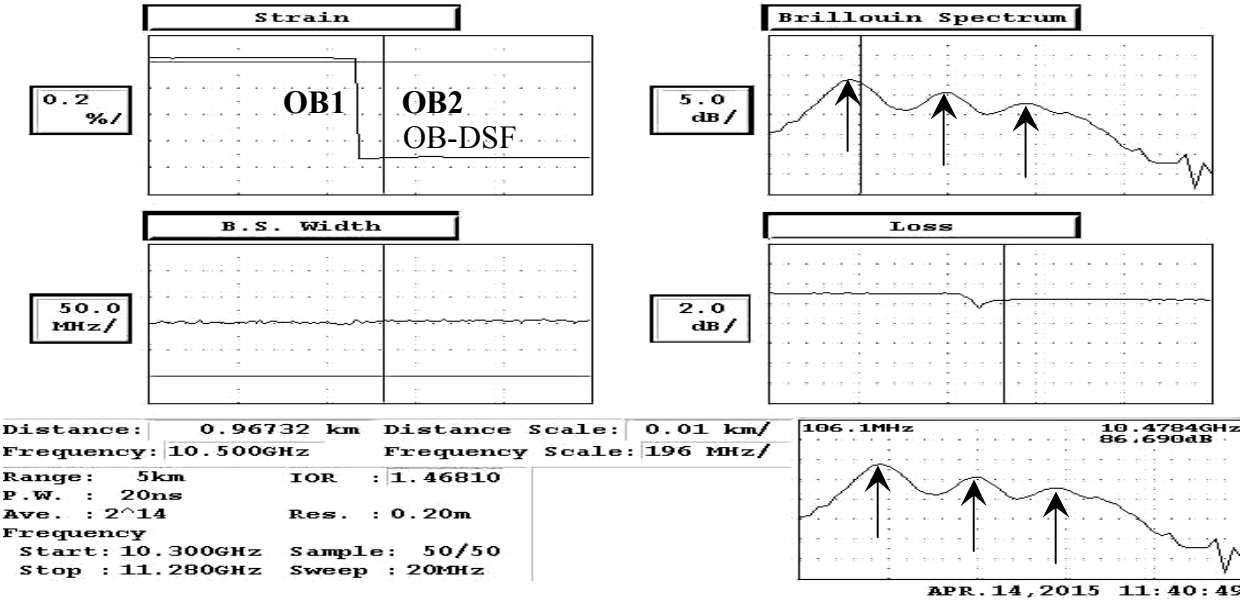

Рис. 2. Мульти-рефлектограмма DSF в области стыка ОВ

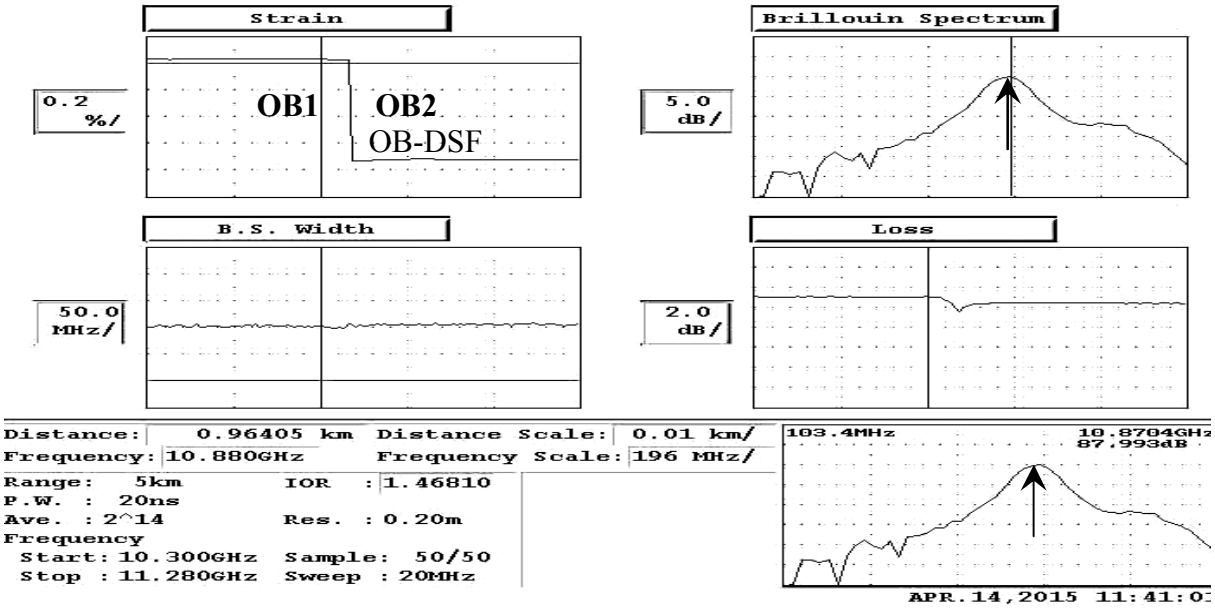

Рис. 3. Мульти-рефлектограмма ОВ1 в области стыка с ОВ-DSF

Обычно для анализа СБР и определения натяжения в ОВ анализируют первый «горб» [5, 8], хотя в DSF явно наблюдается перераспределение спектра, аналогичное явлению четырехволнового смешения [6–8].

На рис. 4 показан СБР DSF, а штриховой линией показаны два смешиваемых спектра, которые и образуют итоговую картину.

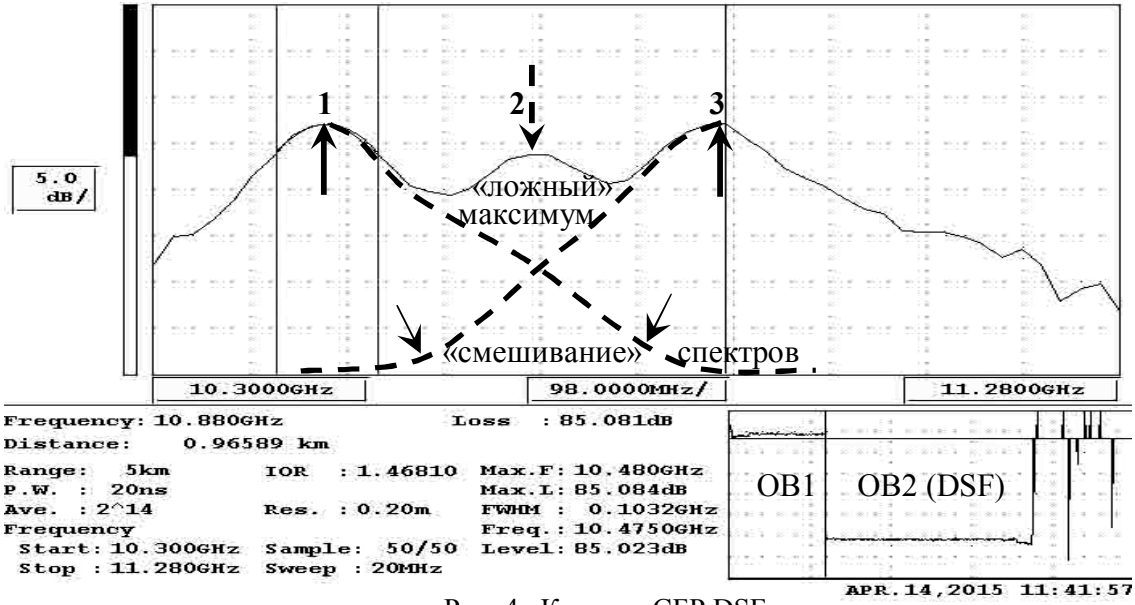

Рис. 4. Картина СБР DSF

Первый максимум обнаруживается на частоте 10.47 ГГц, третий – на частоте 10.87 ГГц. Между ними образуется второй максимум на частоте 10.67 ГГц.

Из графиков следует, что полученные оценки СБР для различных максимумов и всех соответствующих характеристик различаются.

Второе волокно (ОВ-DSF) по данным измерений (график натяжения на рис. 2, 3) и оценке по первому максимуму оказалось «сжатым» (отрицательное натяжение) до 0.75 %, хотя каких-либо предпосылок для этого (например, охлаждения до температур порядка −50 °С) не было.

При оценке по третьему максимуму мы получили бы положительное натяжение примерно 0.05 %, что практически совпадает с натяжением обычного ОВ (ОВ1) и больше соответствует физическому смыслу.

Анализ результатов эксперимента показал, что в ОВ со смещённой дисперсией СБР имеет явные отличия от обычных одномодовых ОВ и обычный алгоритм определения характеристик натяжения («проблемных» участков) [5] в этом случае дает недостоверные результаты.

Необходимо производить коррекцию алгоритма вычисления натяжения ОВ с учетом перераспределения спектральных составляющих, получаемых БОИР, аналогично явлению четырехволнового смешения.

При соединении ОВ-DSF с другими типами ОВ следует учитывать, что СБР волокон проникают друг в друга, что вызывает существенные искажения результатов измерений и вычислений, поэтому измерения характеристик ОВ необходимо проводить как можно дальше от места соединения [6–8].

На рис. 5 – 12 приведены примеры изменения СБР при изменениях температуры или продольной растягивающей силы и, соответственно, характеристик ОВ-DSF.

На рис. 5 показана картина распределения СБР при нагреве участка ОВ-DSF до 100 °С.

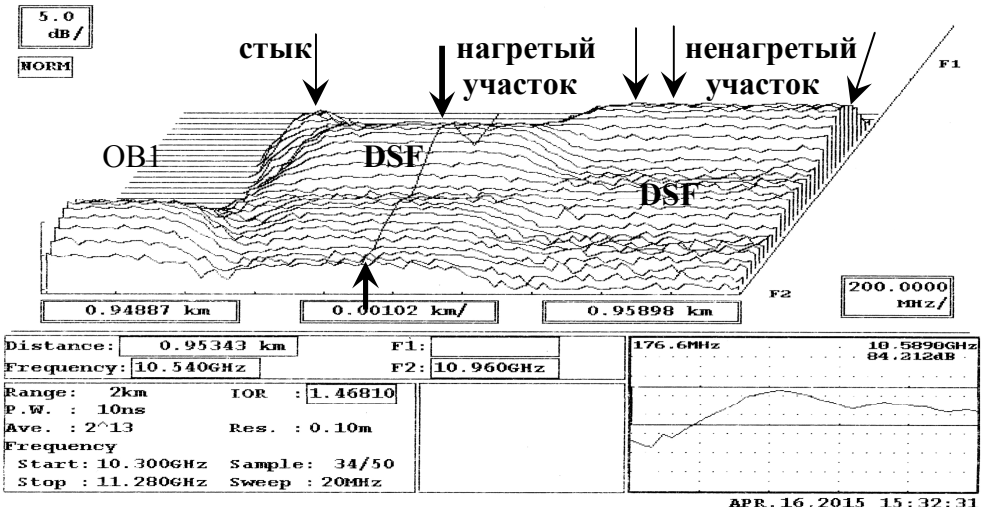

Рис. 5. Изменение СБР при нагреве участка OB-DSF

На рис. 6 представлена соответствующая мультирефлектограмма, а на рис. 7 – картина изменения натяжения в ОВ.

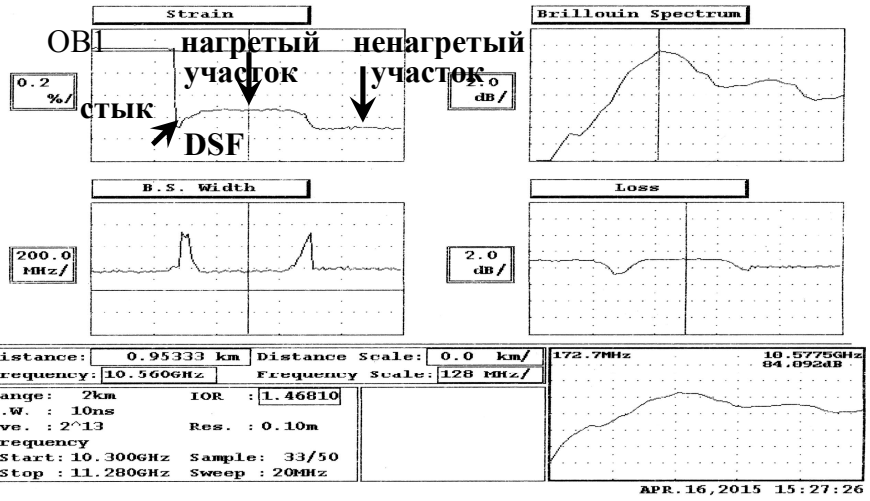

Рис. 6. Мульти-рефлектограмма при нагреве участка OB-DSF

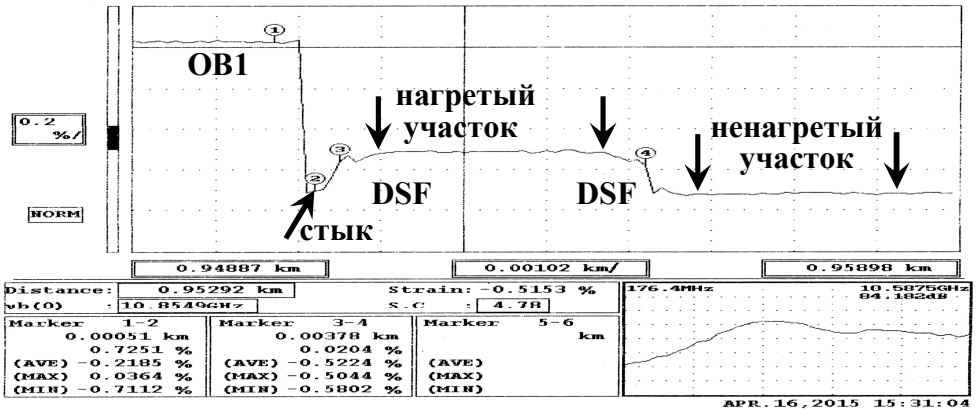

Рис. 7. Картина распределения натяжения при нагреве OB-DSF

Как и у обычного ОВ, наблюдается очевидное смещение СБР и, как следствие, изменение натяжения.

На рис. 8 показана картина распределения СБР в световоде при охлаждении участка OB-DSF до −10 °C.

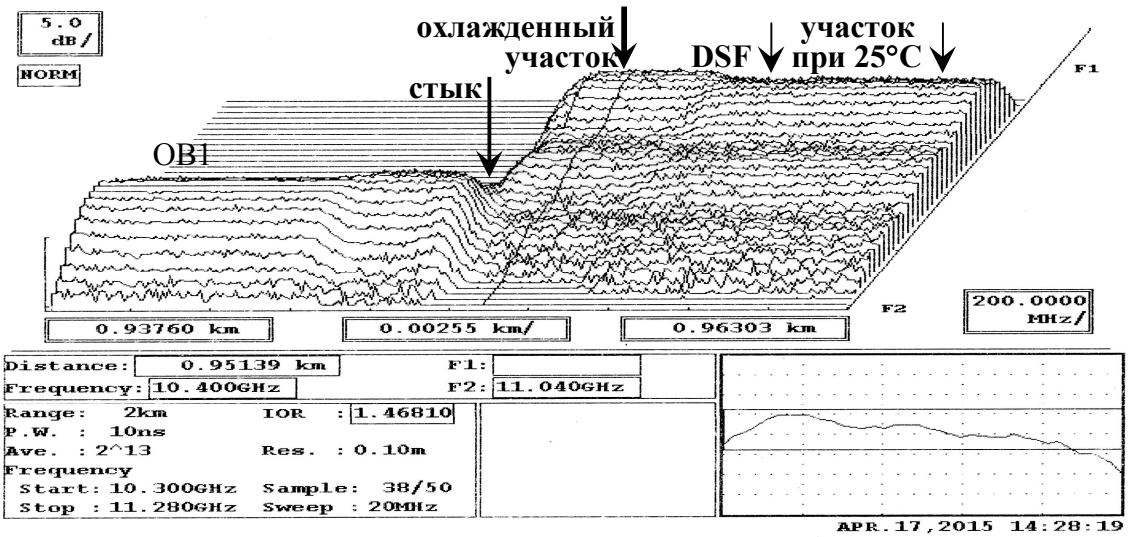

Рис. 8. Изменение СБР при охлаждении участка OB-DSF

На рис. 9 представлена соответствующая картина изменения натяжения при охлаждении участка OB-DSF.

В итоге при изменении температуры от −10 °C до 250 °C частота максимума СБР сместилась с 10.4 ГГц на 10.7 ГГц (наблюдалась линейная зависимость), при этом натяжение изменилось от −0.8 % до −0.3 % (также наблюдалась линейная зависимость).

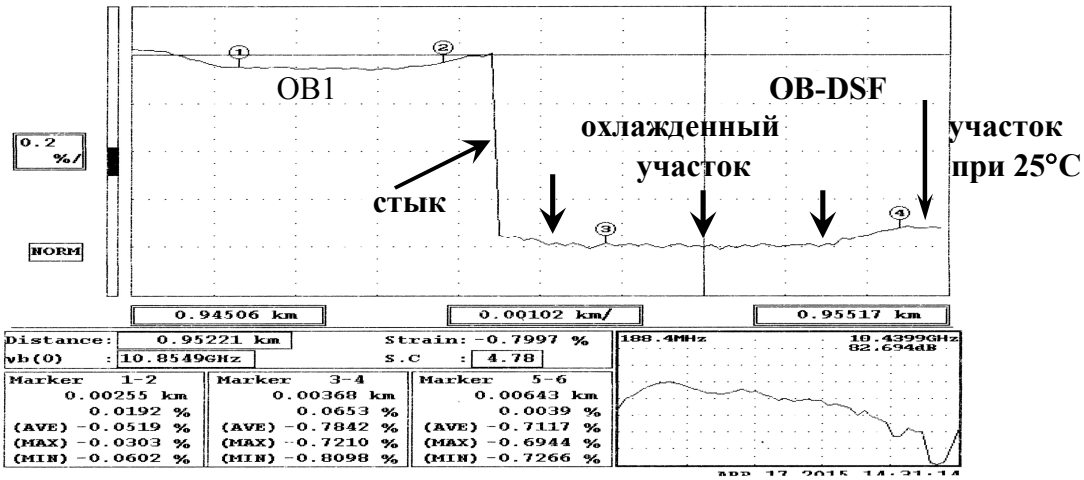

Рис. 9. Картина распределения натяжения при охлаждении OB-DSF

На рис. 10 показана картина распределения СБР при наличии продольной растягивающей силы 2 Н (гиря в 200 г) в OB-DSF.

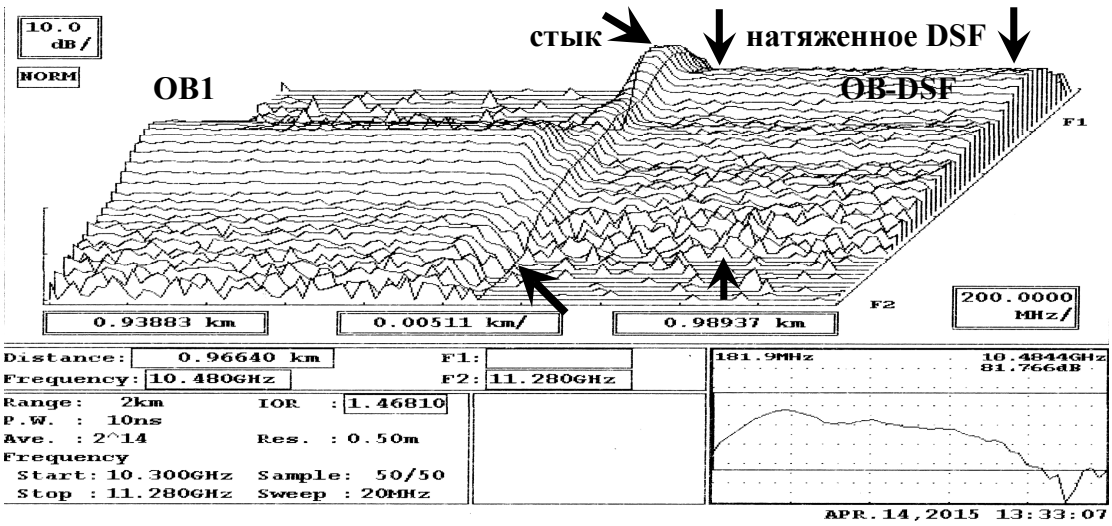

Рис. 10. Изменение СБР при натяжении участка OB-DSF

На рис. 11 представлена соответствующая мульти-рефлектограмма, а на рис. 12 – картина изменения натяжения в ОВ.

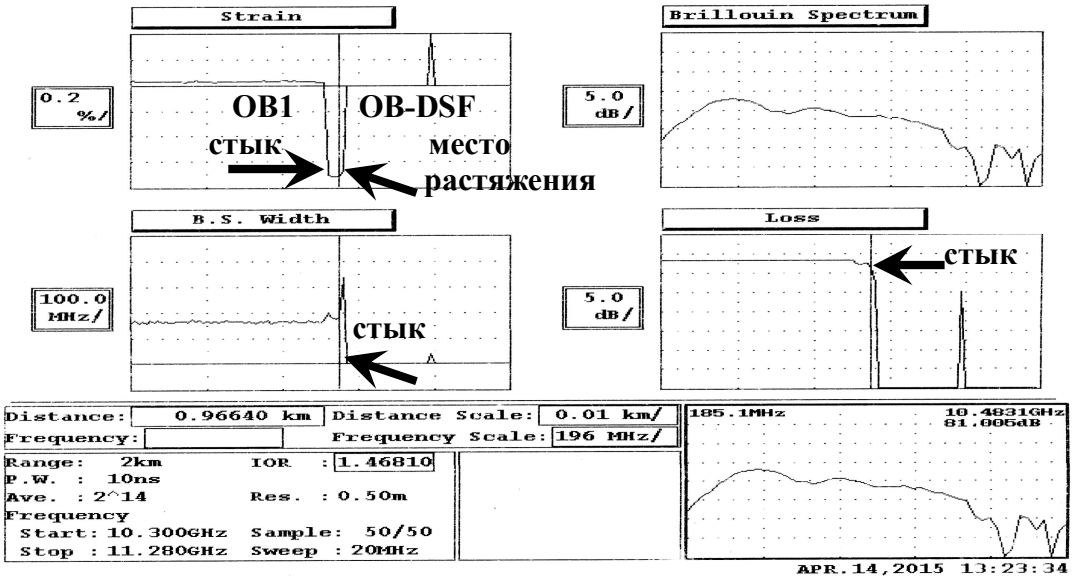

Рис. 11. Мульти-рефлектограмма при растяжении OB-DSF

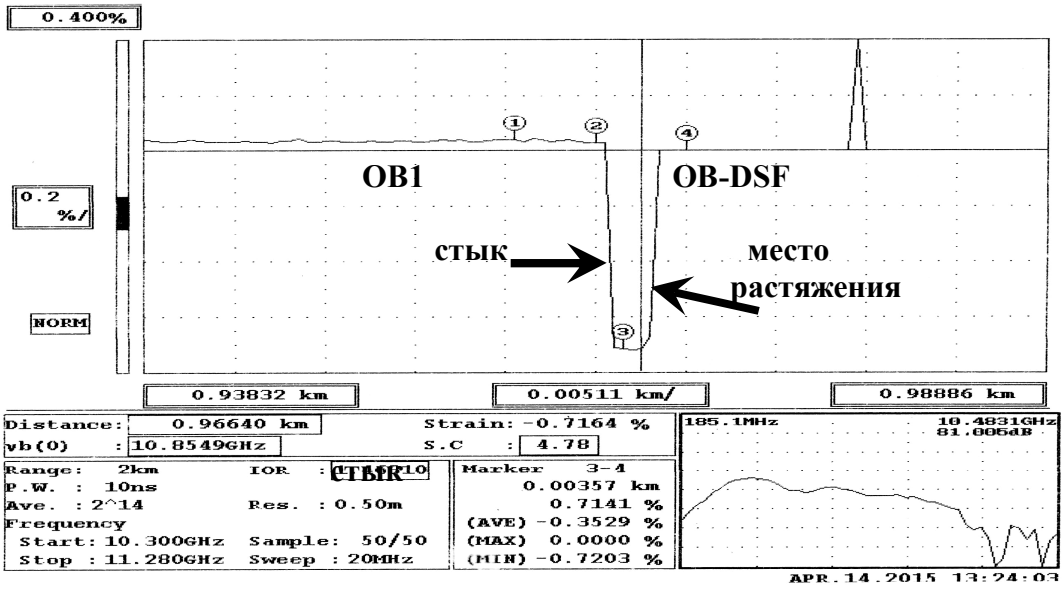

Рис. 12. Картина распределения натяжения при растяжении OB-DSF

Существенное падение уровня сигнала за местом растяжения ОВ в данном случае связано с появлением микроизгибов и поперечных сдавливаний в месте крепления гирь.

Таким образом, и в ОВ со смещенной дисперсией БОИР обнаружил проблемные участки, но при обработке результатов измерений необходимо учитывать специфику нелинейных эффектов в OB-DSF.

Степень натяжения ОВ по «стандартной» методике [5] определяется следующими формулами, использующими полученную зависимость СБР $f_Б(s_\varepsilon)$:

$$s_\varepsilon(z) = \frac{f(s_\varepsilon, z) - f_Б(0)}{f_Б(0) \cdot C_f}, \; \Delta s_\varepsilon(z) = \frac{\Delta f_Б(z)}{f_Б(0) \cdot C_f},$$

где $s_\varepsilon(z)$ – зависимость натяжения ОВ (strain) от продольной координаты z вдоль ОВ; $\Delta s_\varepsilon(z)$ – изменение натяжения ОВ относительно начального значения; $f(s_\varepsilon, z)$ – зависимость смещения частоты от натяжения и координаты z; $f_Б(0)$ – начальное значение $f_Б$; C_f = 493 МГц/°С; $\Delta f_Б(z)$ – изменение $f_Б$ от координаты z вдоль ОВ [5].

Изменение натяжения обнаруживается, однако «планка» ненатяженного уровня у OB-DSF оказывается смещенной вниз примерно на 0.8 % [8].

Анализ показал, что для правильной трактовки результатов измерений необходимо проводить корректировку при обработке результатов измерений [2, 8].

Например, можно снять рефлектограмму OB-DSF, находящегося в заведомо механически ненапряженном состоянии при комнатной температуре, установить начальный уровень OB-DSF и только после этого сравнивать рефлектограммы исследуемых ОВ с «эталонной».

Кроме того, проведенный анализ заставил усомниться в правильности оценки максимума СБР по первому максимуму [8].

Анализ изменения вводимой в ОВ мощности зондирующего сигнала в допустимых в БОИР пределах (есть три градации: нормальный уровень (“NORM”), повышенный (“HIGH”) и пониженный (“LOW” – 25 дБм)) не выявил существенных изменений рефлектограмм. Лишь можно отметить, что при пониженном уровне вводимой мощности рефлектограммы становились более «зашумленными».

5. Заключение

Полученные результаты подтвердили возможность обнаружения механически напряженных участков и оценки степени натяжения ОВ на основании анализа СБР при различных растягивающих нагрузках.

Однако были выявлены проблемы, связанные с некорректной трактовкой полученных результатов. Оказалось, что общепринятый метод обработки результатов измерений в OB-DSF приводит к смещению начального уровня натяжения в область отрицательных значений.

Взаимное проникновение друг в друга СБР волокон различных типов в месте стыка может привести к существенным искажениям результатов оценки натяжения ОВ.

Для разрешения полученных противоречий необходимы дополнительные исследования.

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. *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.
3. *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.
4. *Богачков И. В., Овчинников С. В., Майстренко В. А.* Применение анализа бриллюэновского рассеяния для обнаружения распределенных нерегулярностей в оптических волокнах и оценки их характеристик // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) 2013. Proceedings. Krasnoyarsk: Siberian Federal University.
5. AQ 8603. Optical fiber strain analyzer. Instruction manual AS-62577. Japan, Ando Electric Co Ltd, 2001. 190 p.
6. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Экспериментальные исследования бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах со смещённой дисперсией // Тр. XII-ой междунар. конф. IEEE АПЭП, Новосибирск. Т. 3. 2014. С. 80–85.
7. *Bogachkov I. V., Gorlov N. I.* Experimental Examination of the Brillouin Backscattering Spectrum in Dispersion-Shifted Optical Fibers // IEEE 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings. 2014. V. 1. P. 195–200.

8. *Богачков И. В.* Проблемы анализа спектра бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах со смещённой дисперсией // Сборник трудов Междунар. науч.-техн. конф. «Синхроинфо-2015», СПб, 29-30 июня 2015 г. М.: Медиа Паблишер, 2015. С. 65–68.

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 линий связи Сибирского государственного университета телекоммуникации и информатики, действительный член Метрологической академии, e-mail: gorlovnik@yandex.ru.

Experimental investigation of the Brillouin backscatter spectrum in dispersion-shifted optical fibers

I. V. Bogachkov, N. I. Gorlov

The results of experimental investigation of the Brillouin backscatter spectrum in dispersion-shifted optical fibers are presented in this paper.

Keywords: the Brillouin reflectometry, early diagnostics, a reflectometer, optical fiber, shifted dispersion.