

УДК 621.372.8: 621.396: 621.315

Экспериментальные исследования влияния температуры на спектр бриллюэновского рассеяния и характеристики оптических волокон

И. В. Богачков, Н. И. Горлов

В работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния температуры на характеристики натяжения (механические напряжения) оптических волокон на основе анализа спектра бриллюэновского рассеяния.

Ключевые слова: бриллюэновская рефлектометрия, ранняя диагностика, рефлектометр, оптоволокно.

1. Введение

Важной задачей мониторинга и ранней диагностики волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является получение достоверной информации о физическом состоянии оптического волокна (ОВ) в оптическом кабеле (ОК).

Механические и температурные воздействия, приложенные к ОВ, изменяют его характеристики. Например, растягивающая сила, приложенная к ОВ, изменяет модуль Юнга (натяжение ОВ), который в свою очередь влияет на изменение скорости гипер акустической волны [1–5].

Натяжение ОВ появляется не только из-за растягивающих нагрузок, но и при изменении температуры ОВ [5–7].

Кроме того, резкое изменение температуры некоторого участка ОВ явно указывает на появление проблем на трассе прокладки ВОЛС.

Спектральные компоненты, обусловленные бриллюэновским рассеянием света (БР), обладают важным свойством, что их частота смещена на величину, пропорциональную натяжению волокна. Анализ распределения спектра бриллюэновского рассеяния (СБР) в ОВ позволяет определить местоположение распределенных нерегулярностей в ОВ и оценить их характеристики.

Для обнаружения механически напряженных участков ВОЛС или участков с существенно отличающейся температурой применяются бриллюэновские оптические рефлектометры (БОР).

Обычные оптические импульсные рефлектометры не в состоянии определить опасные изменения натяжения или температуры ОВ, пока они не достигнут критических величин.

2. Сведения из теории

Распространение световых импульсов в ОВ сопряжено с одновременным воздействием нескольких нелинейных эффектов. Одним из нелинейных эффектов, представляющих интерес для дальнейшего анализа, является БР, особенностью которого является его зависимость от таких параметров ОВ, как механическое натяжение и температура.

БР проявляется при превышении мощности вводимого излучения над определенным пороговым уровнем (порядка 23 дБмВт). БР приводит к образованию обратной волны в ОВ, поэтому, зондируя ОВ короткими импульсами и сканируя несущую частоту этих импульсов, можно найти распределение СБР вдоль ОВ.

БР отличается от рэлеевского рассеяния не только пороговым уровнем, но и тем, что вызывающие его неоднородности подвижны [1–3].

В работах [1–5] были рассмотрены вопросы построения математических моделей БР в ОВ и исследования влияния параметров натяжения ОВ на его спектр.

Основным выражением, связывающим частоту бриллюэновского частотного f_B сдвига и степень натяжения ОВ, является формула [3–5]:

$$f_B = \frac{2nv_a}{\lambda},$$

где n – коэффициент преломления, λ – длина волны падающего света, v_a – скорость акустической волны :

$$v_a = \sqrt{\frac{E_\varepsilon}{\rho}},$$

E_ε – модуль Юнга; ρ – плотность кварцевого стекла.

В случае ОВ (кварцевое стекло) считается, что вкладом нелинейности второго порядка индуцированной поляризации можно пренебречь, а учитывают только нелинейности третьего порядка [1–3].

Связь смещения максимума СБР Δf_B и интенсивности антистоксовой волны ΔI_{Bm} с изменениями модуля Юнга (натяжения) ΔE_ε и температуры ΔT может быть представлена в матричной форме [10]:

$$\begin{bmatrix} \Delta f_B \\ \Delta I_{Bm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_f^\varepsilon & C_f^T \\ C_I^\varepsilon & C_I^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix},$$

где C_f^ε , C_f^T , C_I^ε и C_I^T – коэффициенты связи для соответствующих параметров.

После получения картины распределения СБР определяются Δf_B и ΔI_{Bm} , после чего для определения ΔE_ε и ΔT необходимо произвести обращение матрицы [10].

$$\begin{bmatrix} \Delta E_\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \frac{1}{\begin{vmatrix} C_f^\varepsilon & -C_f^T \\ C_I^\varepsilon & C_I^T \end{vmatrix}} \begin{bmatrix} C_I^\varepsilon & -C_f^T \\ -C_I^T & C_f^\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_B \\ \Delta I_{Bm} \end{bmatrix}.$$

Для получения СБР, связывающего спектр зондирующего импульса $S_P(f)$, форму спектра бриллюэновского рассеяния $S_B(f)$ и спектр источника излучения $S_L(f)$ (символ $\otimes$ обозначает операцию свёртки), используем выражение [3–5]:

$$S(f) = S_P(f) \otimes S_B(f) \otimes S_L(f).$$

3. Постановка задачи

С целью уточнения моделей, рассмотренных в [1–5], и проверки результатов имитационного моделирования [8] были проведены экспериментальные исследования с БОР «Ando AQ 8603» при содействии ЗАО «Москабель-Фуджикура».

4. Результаты экспериментов

При экспериментальных исследованиях две катушки ОВ были соединены сваркой, а участок 4 м в области сварного соединения (по 2 метра каждого ОВ) помещался в камеру нагрева. Для экспериментальных исследований световод был составлен из ОВ нормализующей катушки (стрелка «1» на рис. 1) длиной 1.72 км, сваренного с ОВ (стрелка «3») длиной 3 км.

Место сварки и профиль СБР в нем обозначены стрелкой «2», а максимум СБР – стрелкой «4». Оба ОВ являются одномодовыми.

На рис. 1 представлена 3D-рефлектограмма, на которой показано распределение СБР по длине световода при комнатной температуре (25 °C). Профиль СБР в месте нагрева при комнатной температуре показан в области стрелки «2».

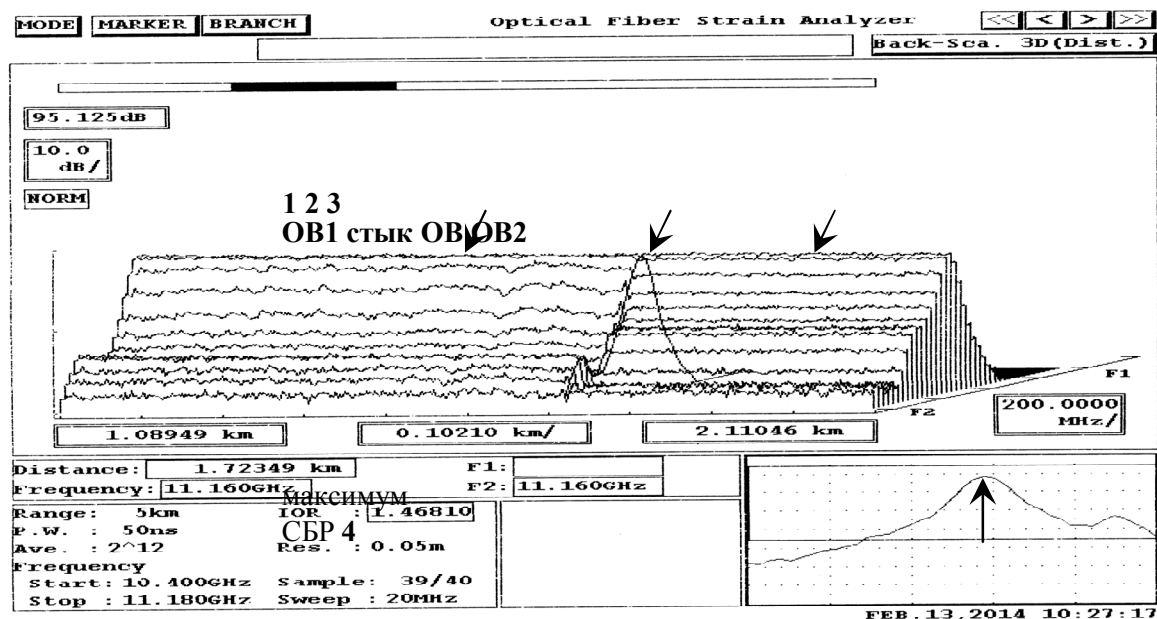


Рис. 1. Картина СБР в ОВ при температуре 25 °C

При нагреве участка в области сварного соединения анализировалось изменение СБР и изменение натяжения ОВ.

На рис. 2 приведена картина СБР при температуре 120 °C.

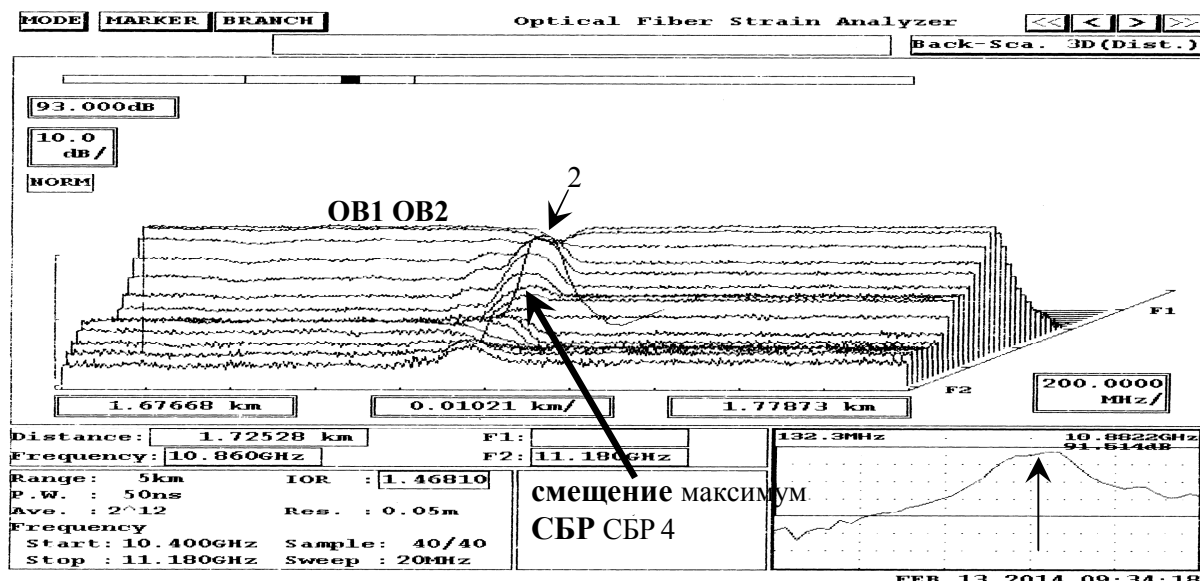


Рис. 2. Картина СБР в световоде при температуре 120 °C

На рис. 3 представлена картина СБР при 120 °С, развернутая в области нагрева (стыка OB1 и OB2) с максимальным пространственным разрешением (5 см).

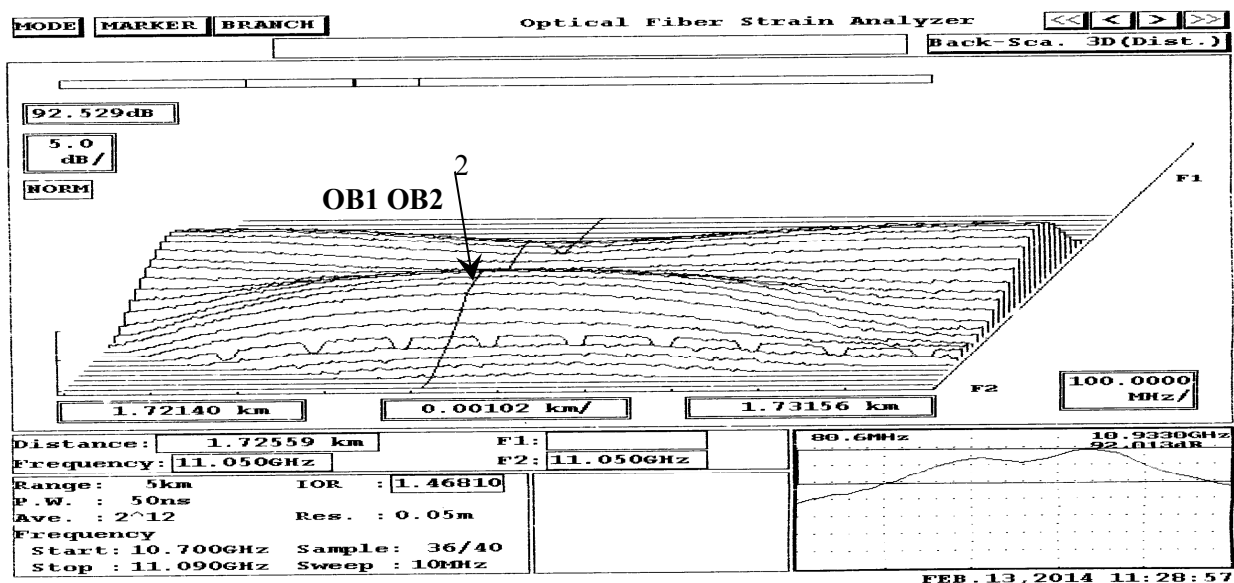


Рис. 3. Картина СБР в области места нагрева ОВ при температуре 120 °С

На рис. 4 представлена 3D-рефлектограмма, на которой показано распределение СБР по длине световода для участка стыка OB1 и OB2, нагретого до температуры 150 °С, при этом стрелками «1» и «3» отмечен СБР ненагретых ОВ (комнатная температура 25 °С).

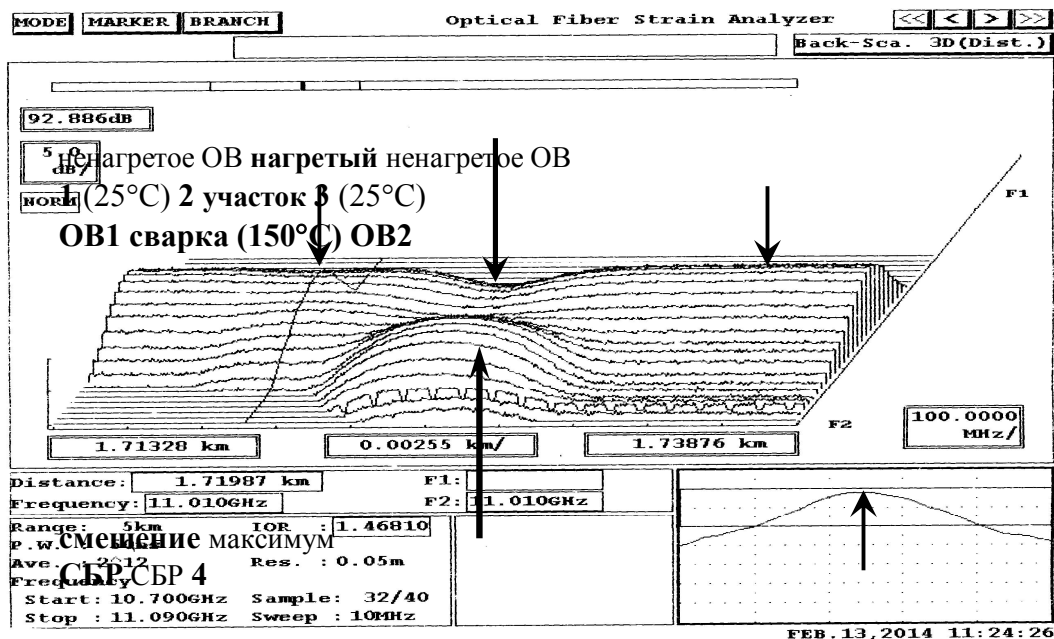


Рис. 4. Картина СБР в световоде при температуре нагрева 150 °С

Из рис. 2–4 видно, что в нагретом участке в области сварного соединения наблюдается существенное изменение СБР.

Аналогичные исследования были проведены при охлаждении ОВ до отрицательных температур.

При изменении температуры наблюдалось смещение максимума СБР от 10.82 ГГц (–20 °С) до 11.00 ГГц (197 °С), что соответствует изменению натяжения ОВ в нагреваемой области.

При комнатной температуре 25 °С максимум СБР наблюдался на частоте 10.85 ГГц.

Ширина СБР изменялась от 70 ... 100 МГц при комнатной температуре до 90 ... 220 МГц при высоких температурах.

На рис. 5–7 приведены соответствующие зависимости по длине световода (мульти-рефлектограммы) натяжения (Strain), СБР, ширины СБР (B.S.W) и потерь (Loss) в области места нагрева.

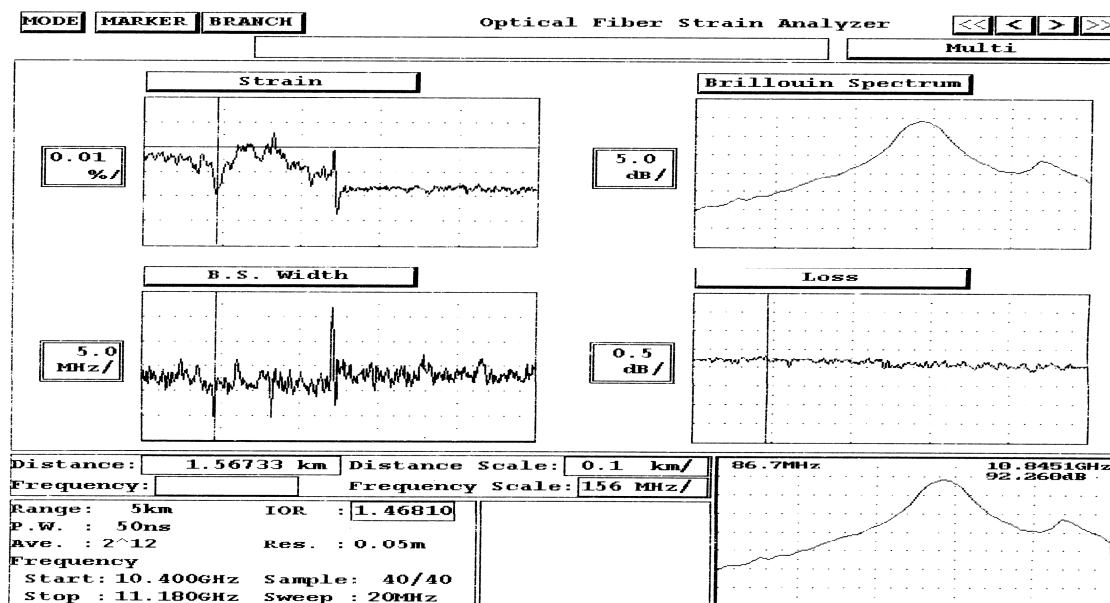


Рис. 5. Мульти-рефлектограмма световода при 25 °C

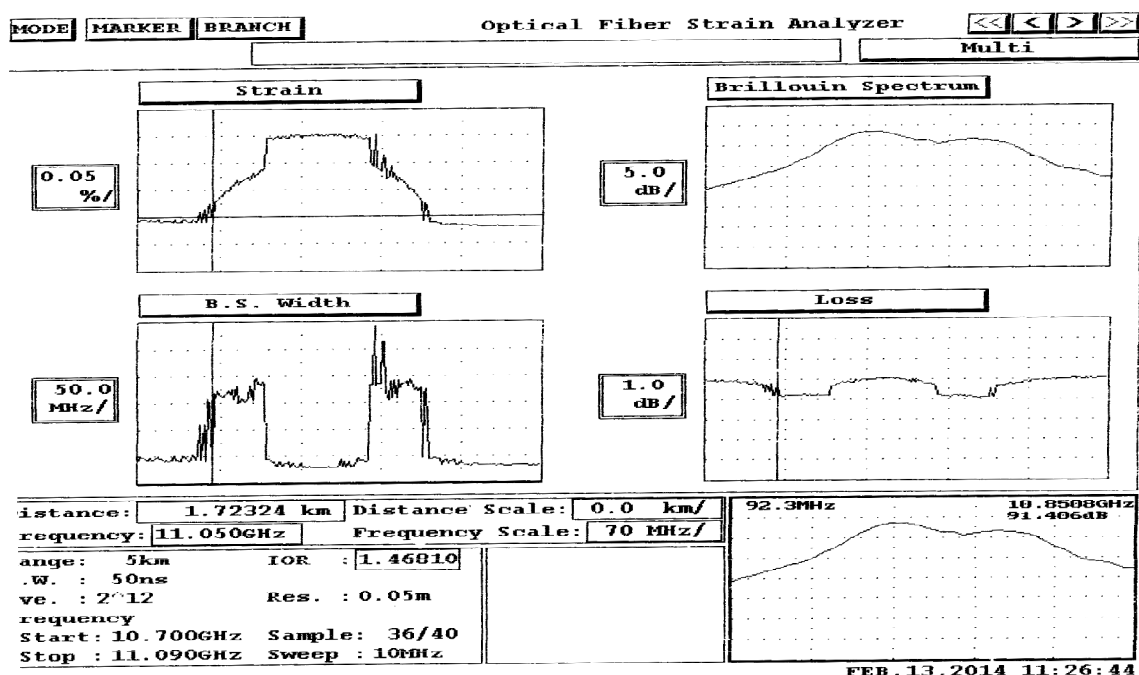


Рис. 6. Мульти-рефлектограмма световода при 120 °C

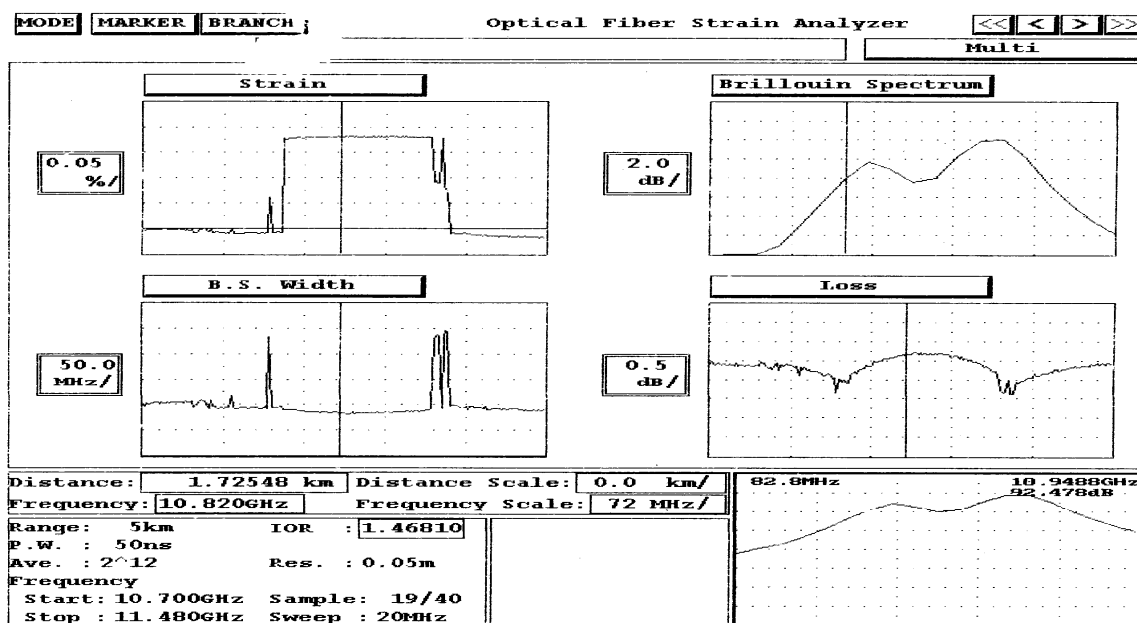


Рис. 7. Мульти-рефлектограмма световода при 150 °С

Из графиков видны заметные изменения рефлектограмм при изменении температуры.

На рис. 8–10 выделены характеристика натяжения (модуля Юнга) в области участка световода, нагретого до 90 °С (рис. 8), 120 °С (рис. 9) и 150 °С (рис. 10).

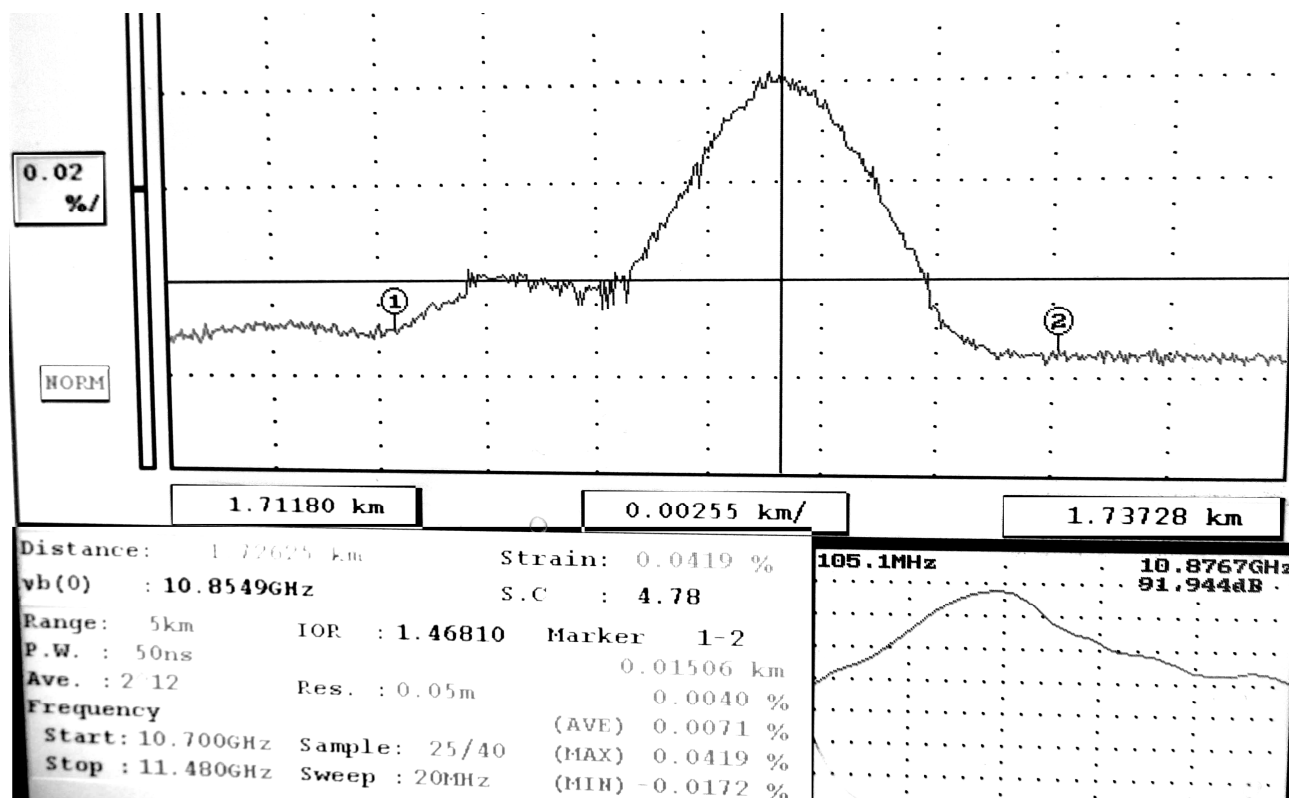


Рис. 8. График изменения натяжения по длине световода нагревании стыка ОВ до 90 °С

Анализ рис. 6–10 показывает, что при изменении температуры СБР и, соответственно, натяжение изменились. При 120 °С изменение натяжения составило 0.14 % (1 % = $10^4 \mu\epsilon$) и приблизилось к опасному участку. При увеличении температуры более 160 °С натяжение превысило критический уровень в 0.2 % (2000 $\mu\epsilon$).

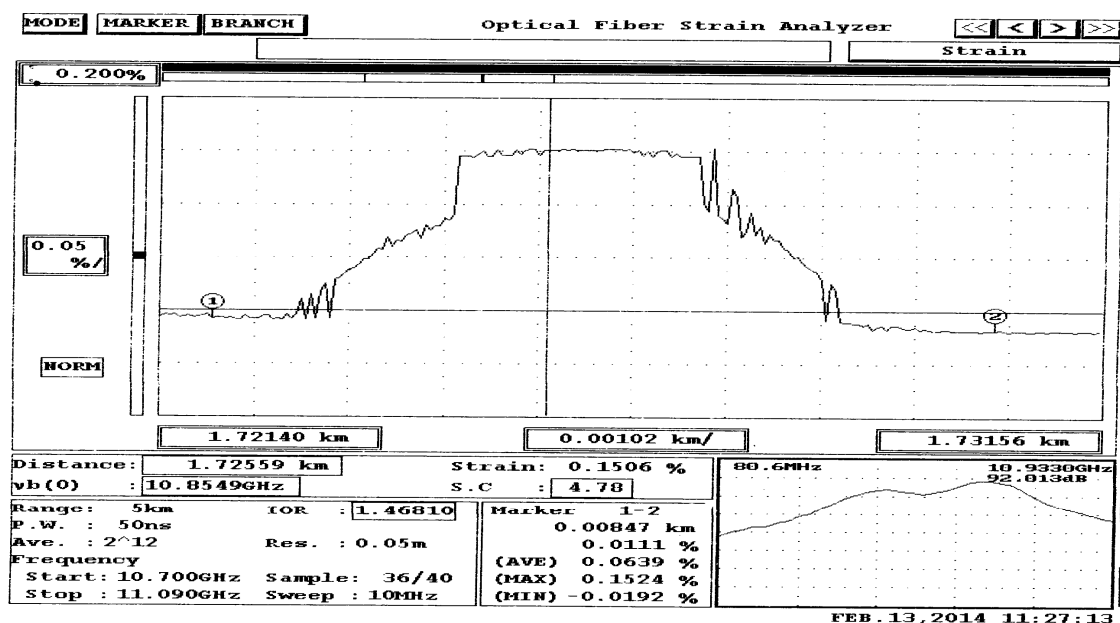


Рис. 9. График изменения натяжения по длине световода в месте нагрева до 120 °С

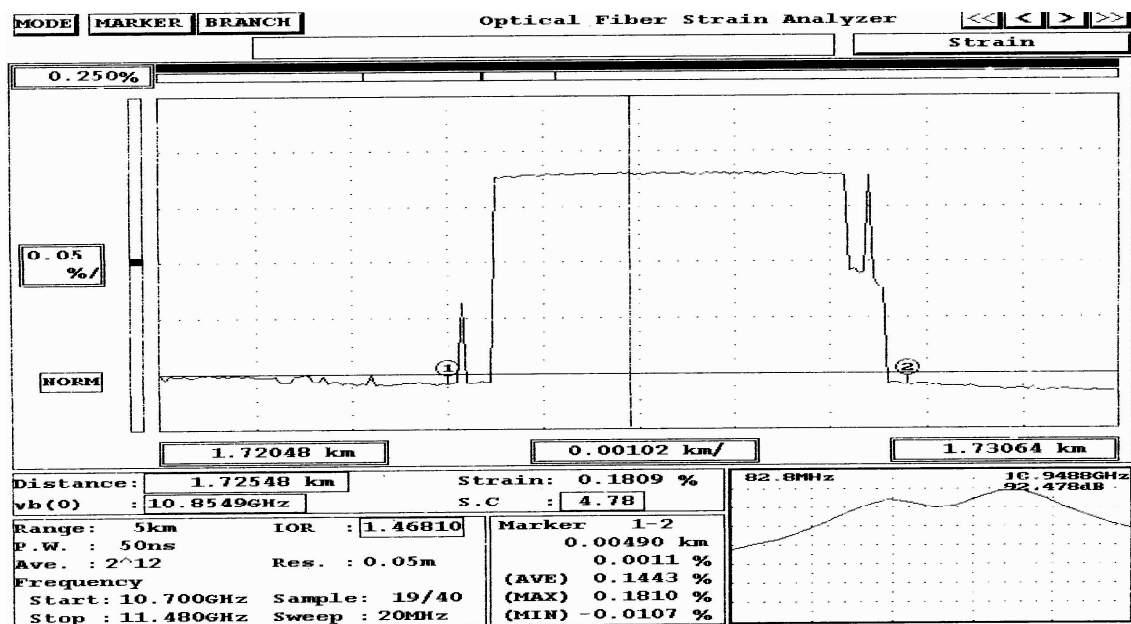


Рис. 10. График изменения натяжения по длине световода нагрывании стыка ОВ до 150 °С

Аналогичные исследования при охлаждении ОВ от комнатной температуры 25 °С до – 20 °С привели к сжатию ОВ (отрицательному натяжению) на 0.05 %.

После возвращения температуры к 25 °С характеристики ОВ в обоих случаях восстановились в исходное состояние.

Таким образом, БОИР успешно обнаружил проблемный участок и позволил обнаружить изменение модуля Юнга и температуры в ОВ.

На рис. 11 представлен график температурной зависимости максимума СБР в области места нагрева ОВ, полученный на основе анализа данных эксперимента.

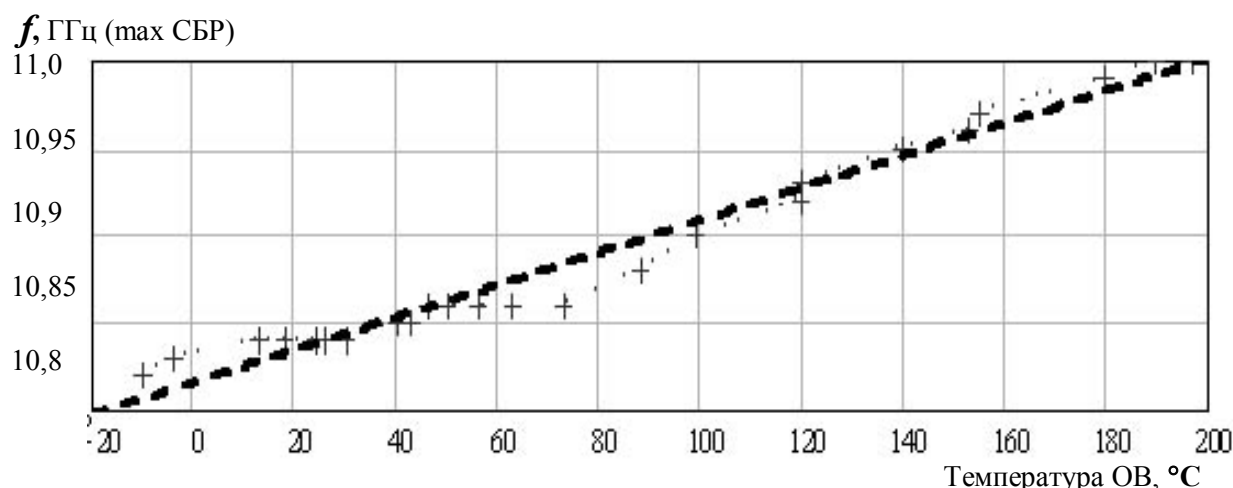


Рис. 11. График температурной зависимости максимума СБР в области места нагрева ОВ, полученной в эксперименте

График температурной зависимости натяжения ОВ в области места нагрева, полученный на основе анализа экспериментальных данных, представлен на рис. 12.

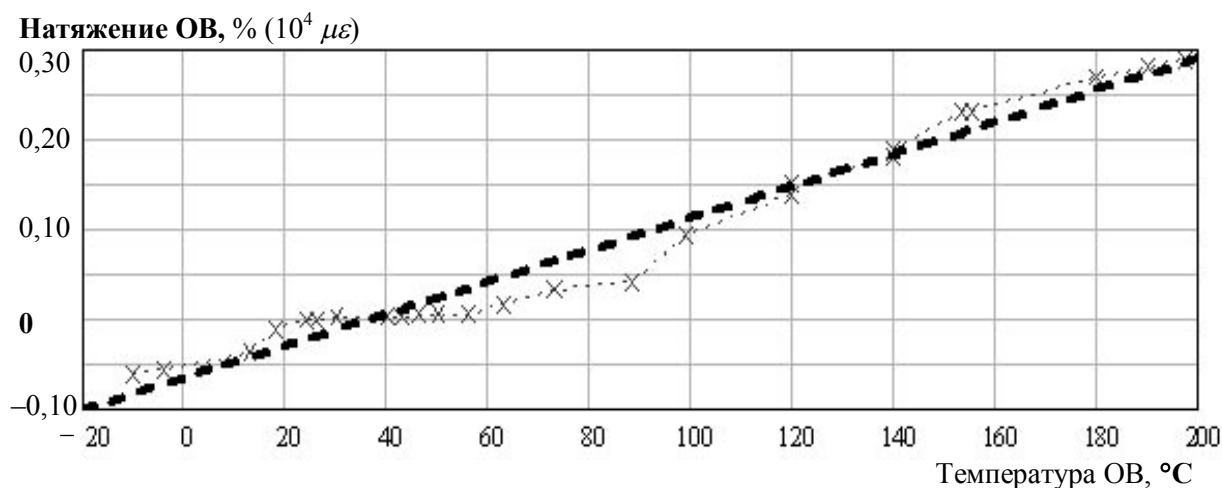


Рис. 12. График температурной зависимости натяжения ОВ в области места нагрева, полученной в эксперименте

В обоих графиках использованы линейные регрессии экспериментальных данных (штриховая линия чёрного цвета), так как предполагалась линейная функциональная зависимость от температуры [1, 8–10].

Полученные результаты имеют сходство с результатами, приведенными в [6–10].

На рис. 13 представлены зависимости максимума СБР в зависимости от натяжения (модуля Юнга) при различных температурах ОВ [10], полученные другими способами.

Данные эксперимента, описанного в нашей статье, на графике показаны штриховой линией со стрелкой. Очевидно, что графики имеют хорошее совпадение.

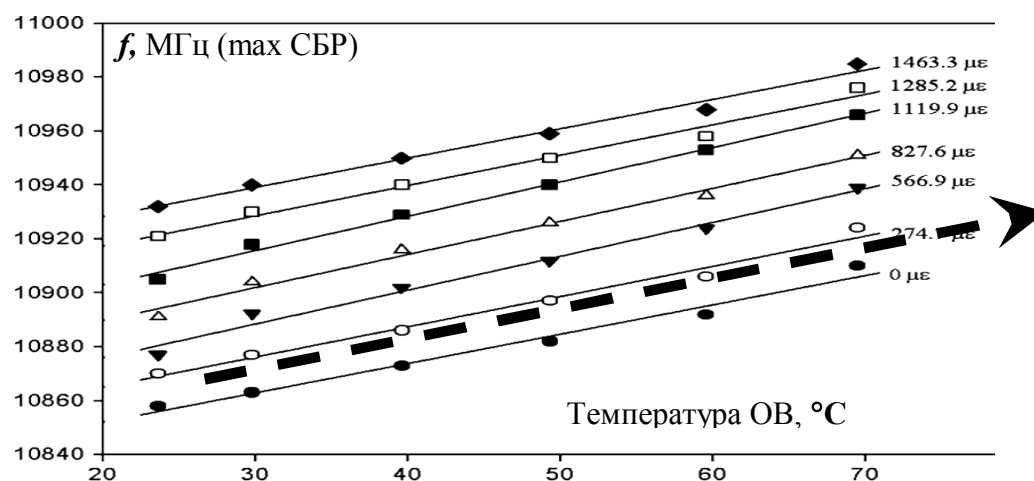


Рис. 13. График изменения максимума СБР в зависимости от температуры при различных натяжениях ОВ

5. Заключение

Полученные результаты подтвердили возможность оценки изменения температуры ОВ (степени натяжения ОВ) на основании анализа СБР.

Данный эффект можно использовать для построения распределенных датчиков температуры на основе ОВ с эластичной защитной оболочкой.

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., Овчинников С. В., Горлов Н. И., Ситнов Н. Ю. Применение численных методов анализа бриллюэновского рассеяния для оценки распределенных нерегулярностей в волоконно-оптических линиях связи // Телекоммуникации №2, 2014. – М.: Наука и технологии, 2014 – С. 16–20.
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. Богачков И. В., Овчинников С. В., Горлов Н. И. Повышение точности оценки распределенных нерегулярностей в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2012. – Вып. 4 (20). – С. 3–13.
6. Ситнов Н. Ю., Горлов Н. И., Богачков И. В. Экспериментальная проверка метода рефлектометрии в частотной области с широкополосным зондирующим сигналом // Вестник СибГУТИ. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2012. – Вып. 3 (19). – С. 59–80.
7. 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.

8. *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, Т. 3. Новосибирск, 2014. – С. 74–79.
9. *Григорьев В. В., Лященко О. В., Митюрёв А. К., Наумов А. Н.* Результаты испытаний Бриллюэновского рефлектометра // Фотон-экспресс. – 2005. – №5. – С. 36–37.
10. *Belal M., Newson T. P.* Experimental Examination of the Variation of the Spontaneous Brillouin Power and Frequency Coefficients Under the Combined Influence of Temperature and Strain // Journal of Lightwave Technology, 2012, vol. 30, no. 8, pp. 1250–1255.

*Статья поступила в редакцию 29.04. 2015;
переработанный вариант — 30.06. 2015*

Богачков Игорь Викторович

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

Горлов Николай Ильич

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

Experimental researches of temperature influence on Brillouin backscattering spectrum and optical fibers characteristics

I. V. Bogachkov, N. I. Gorlov

The results of experimental researches of the temperature influence on the strain characteristics (mechanical stresses) of optical fibers based on Brillouin backscattering spectrum analysis are provided in this paper.

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