

УДК 681.7.068: 666.223.9: 621.372.8.082.5

**И.В. Богачков**

Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ХАРАКТЕРИСТИК НАТЯЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН,  
КЛАССИФИКАЦИИ ИХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ И ВЫЯВЛЕНИЯ  
ФАКТОРА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПО БРИЛЛЮЭНОВСКИМ  
РЕФЛЕКТОГРАММАМ**

Представлены результаты исследований возможностей автоматизации обработки данных измерений, полученных от бриллюэновского оптического рефлектометра, световодов, содержащих различные виды одномодовых оптических волокон. Анализируя параметры рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, полученных из данных бриллюэновских рефлектограмм, возможно осуществлять классификацию оптических волокон в исследуемых оптических кабелях телекоммуникационных систем, а также оценивать изменение бриллюэновского частотного сдвига и определять степень продольного натяжения оптических волокон. Начальные значения бриллюэновского частотного сдвига и спектр рассеяния Мандельштама–Бриллюэна для каждой разновидности оптических волокон отличаются. Представлены разработанные программы для автоматизированной обработки бриллюэновских рефлектограмм. С помощью анализа уровня обратно отражённого сигнала можно выделить фактор, оказавший преимущественное влияние на параметры сигнала рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в исследуемых участках оптических волокон, и компенсировать влияние температурных изменений в графиках распределения продольного натяжения. Это позволяет построить график распределения продольного натяжения вдоль световода, вызванного именно механическими воздействиями на оптические волокна. Сделаны выводы о точности оценок, полученных по различным алгоритмам, на основании накопленного опыта по работе с представленными программами.

**Ключевые слова:** оптическое волокно, натяжение волокон, бриллюэновская рефлектометрия, рефлектограмма, спектр рассеяния Мандельштама–Бриллюэна, бриллюэновский частотный сдвиг, профиль спектра, алгоритм оценки подобию.

**I.V. Bogachkov**

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**AN AUTOMATION OF THE DETECTION PROCESSES  
OF THE STRAIN CHARACTERISTICS OF OPTICAL FIBERS,  
CLASSIFICATION OF THEIR VARIETIES AND IDENTIFICATION  
THE INFLUENCE FACTOR ACCORDING TO BRILLOUIN  
REFLECTOGRAMS**

Research results into the automating the processing of measurement data obtained from the Brillouin optical reflectometer, light guides containing various types of optical fibers are presented in this paper. By analyzing the parameters of the Mandelstam–Brillouin scatter obtained from Brillouin reflectograms, we can classify optical fibers in the studied telecommunication optical cables. This makes it possible to evaluate the change of the Brillouin frequency shift and determine the longitudinal fiber tension. The initial values of the Brillouin frequency shift and the profile of the Mandelstam–Brillouin scatter spectrum are different for each fiber type. The programs for automated processing of Brillouin reflectogram data are discussed. Estimation of the level of the back-reflected signal allows you to identify the factor, that had a predominant effect on the parameters of the Mandelstam–Brillouin scatter signal in the studied sections of optical fibers, and to compensate for the influence of temperature changes in the longitudinal strain distribution graphs. After that, we can plot a graph of the distribution of longitudinal strain along the fiber, caused precisely by mechanical influences on optical fibers. Conclusions about the accuracy of the estimates obtained by various algorithms, based on the accumulated experience in working with the presented programs are drawn.

**Keywords:** optical fiber, fiber strain, Brillouin reflectometry, reflectogram, Mandelstam–Brillouin scattering spectrum, Brillouin frequency shift, spectrum profile, similarity estimation algorithm.

Для выявления участков оптических волокон (ОВ) с изменённым натяжением и температурой в оптических кабелях (ОК) применяются бриллюэновские рефлектометры (БОИР – бриллюэновский оптический импульсный рефлектометр), метод бриллюэновской рефлектометрии [1–3]. В основу работы БОИР положен анализ характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ). В настоящее время для различных назначений разработано множество разновидностей ОВ [1, 5–7].

За последние годы изменился состав поставщиков материалов, применяемых для производства ОВ и изготовления ОК на территории России. Оценка оптических характеристик ОВ в проложенных ОК, а также классификация разновидностей ОВ в ОК (в том числе ОВ, схожих по свойствам и назначению, но разных производителей) являются актуальными задачами [4–6]. Для их решения целесообразно получить и проанализировать бриллюэновские рефлектограммы. С по-

мощью графиков, полученных с использованием БОИР, можно классифицировать тип ОВ в проложенном ОК, поскольку даже волокна одной разновидности, но разных производителей имеют заметные различия в частотных характеристиках РМБ [4–7].

В структуре современных ОВ может существовать несколько слоёв, оптические и акустические свойства которых различны, что оказывает влияние на формирование спектра РМБ (СРМБ) [6–9]. Для изучения параметров РМБ (СРМБ и вычисления частоты главного максимума СРМБ – бриллюэновского сдвига частоты – БЧС) для всех тестируемых разновидностей ОВ требуются данные из рефлектограмм БОИР [6, 10–12]. Имея набор параметров РМБ (профилей СРМБ) различных видов ОВ, можно классифицировать ОВ в ОК, а также ускорить выявление потенциально ненадёжных участков ОВ ВОЛС за счёт автоматизирования процесса [10–13].

На рис. 1 показана рефлектограмма БОИР (распределение СРМБ по длине световода по данным от БОИР “Ando AQ 8603”) для ОВ “Fujikura” разновидности G.654 (рекомендация МСЭ–Т G.654 – ОВ со смещенной длиной волны отсечки, равной 1530 нм) [1, 5]. В правом нижнем углу показан профиль СРМБ в выбранном поперечном сечении световода (на расстоянии 1103,72 м). Там же указаны БЧС ( $f_B = 11,0032$  ГГц), ширина полосы СРМБ ( $f_w = 179,5$  МГц) и уровень обратно отражённого сигнала в максимуме ( $A_m = A(f_B) = 82,380$  дБ).

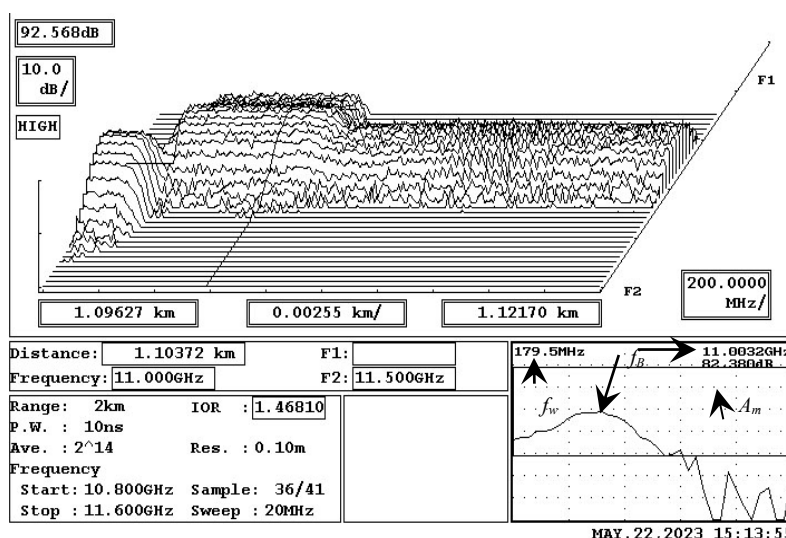


Рис. 1. Пример исходной бриллюэновской рефлектограммы световода

В левом нижнем углу приведены данные о предельной дистанции измерений (2 км), показателе преломления (1,46810), длительности зондирующего импульса (10 нс), о количестве усреднений ( $2^{14}$ ), о представляемом после обработки результатов разрешении по длине световода (0,1 м), а также данные частотных характеристик сканирования, которые отдельно рассмотрены на рис. 2 (указаны данные, которые требуются для получения значений в точках сетки по оси частот) [10–13].

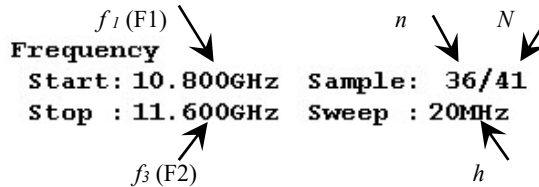


Рис. 2. Определение частотных характеристик сканирования

Для формирования рефлектограммы БОИР проводится частотное сканирование, которое в данном примере стартует с частоты  $f_1$  ( $f_1 = 10,8$  ГГц = F1) с шагом  $h$  ( $h = 20$  МГц). Конечная частота  $f_3$  ( $f_3 = 11,6$  ГГц = F2) достигается только при прохождении процесса сканирования по всем точкам сетки частот ( $n = N = 41$ ),

$$f_3 = f_1 + hN. \quad (1)$$

Поскольку процесс сканирования при работе БОИР можно останавливать на любом шаге  $n$  (для примера на рис. 2  $n = 36$ ), то частота завершения сканирования в этом случае определяется как

$$f_2 = f_1 + h(n - 1). \quad (2)$$

Для примера на рис. 2  $f_2 = 11,5$  ГГц. Наибольшее значение уровня обратно отражённого сигнала ( $A_m$ ) будет наблюдаться на частоте, равной БЧС ( $f_B$ ).

На рис. 3 приведён пример профиля СРМБ, взятый при том же измерении на другом участке того же световода. Но на этом участке использовано ОВ другого производителя (“Corning”), хотя и той же разновидности (ОВ–G.654).

При этом БЧС ( $f_B$ ) равен 11,0513 ГГц. Сравнивая профили СРМБ, представленные на рис. 1 и 3, можно заметить их отличия, которые можно использовать для классификации разновидностей ОВ.

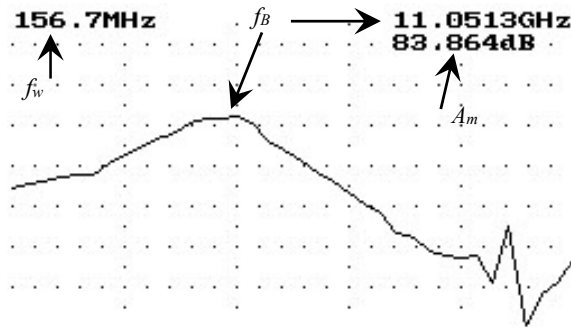


Рис. 3. СРМБ ОБ

Проанализируем алгоритмы, используемые для определения типа ОБ при наличии образцов бриллюэновских рефлектограмм (шаблонов) ранее изученных ОБ. Ранее в работах [6, 10–13] уже были рассмотрены некоторые алгоритмы, которые на основе корреляционной оценки совпадения загруженного изображения СРМБ с шаблонами из базы рефлектограмм, в том числе по критерию  $r$ -Пирсона. Анализ показал, что с учётом специфики процесса обработки данных результатов измерений в БОИР (бриллюэновских рефлектограмм) корреляционную оценку ( $K_r$ ) по критерию  $r$ -Пирсона удобно переписать в следующей форме:

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - A_A)(A_i^1 - A_A^1)}{\sum_{i=1}^N \sqrt{(A_i - A_A)^2} \sum_{i=1}^N \sqrt{(A_i^1 - A_A^1)^2}}, \quad (3)$$

где  $A_i$  – значение ординат в  $i$ -м узле сетки частот (абсцисс) загруженного массива,  $A_A$  – среднее арифметическое значение ординат загруженного массива,  $A_i^1$  – значение ординат в  $i$ -м узле сетки частот оцениваемого шаблона,  $A_A^1$  – среднее арифметическое значение ординат оцениваемого шаблона,  $N$  – количество координат диапазона частот для анализа [13–15].

Процесс вычисления  $K_r$  проводится для всех образцов из базы рефлектограмм ОБ, и в результате выбирается «образец» с максимальным значением  $K_r$ . При совпадении частотных диапазонов (или после приведение в соответствие графиков по частоте) оценку совпадения рефлектограмм следует проводить по такой формуле:

$$K_r = \sum_{i=1}^N (A_i - A_i^1)^2 \cdot k_i(A_i) / N, \quad (4)$$

где  $k_i$  – коэффициент «важности»  $i$ -го отсчёта. В простейших случаях  $k_i$  можно принять равными «единице».

«Образец» с минимальным значением  $K_r$  по формуле (4) будет считаться как шаблон, имеющий наилучшее совпадение [12].

Если данные по оси ординат ( $i$ -е значение в массиве частот –  $f_i$ ) отличаются от сетки ординат шаблона, то необходимо сделать интерполяцию по соседним значениям. Так как профиль СРМБ в области максимума имеет параболическую форму, то удобно применить интерполяцию второго порядка. Для сокращения вычислений при обработке массивов следующих шаблонов следует сохранять результаты дополнительных вычислений для исследуемого массива. (Это позволит избежать повторных вычислений, а также сделать возможные последующие интерполяции более точными).

Поскольку значимость отсчётов (значений ординат) при удалении от максимального значения уменьшается, можно повысить эффективность оценок, выбрав значение  $k$  адаптивным (зависящим от величины уменьшения уровня по отношению к значению в максимуме). Например, принять в (4)  $k = 0,95$  для значений  $A_i$ , отличающихся от максимального на  $-3... -5$  дБ, а для значений с уровнем  $-5...-9$  дБ от уровня максимума –  $k = 0,9$  – и т. п.

На рис. 4 приведён пример возможного «центрирования» сравниваемых профилей СРМБ и определения общего диапазона частот из бриллюэновских рефлектограмм для двух ОВ-G.652 разных производителей при нормальных условиях:

$$f_1 = 10,5 \text{ ГГц}, f_2 = 11,0 \text{ ГГц}, f_{11} = 10,6 \text{ ГГц}, f_{21} = 11,1 \text{ ГГц}.$$

По осям абсцисс отложены номера отсчётов.

Для более точной классификации типа ОВ алгоритм оценки подобия следует усовершенствовать. При оценке степени совпадения рефлектограмм необходимо сделать единым масштаб графиков по осям абсцисс и ординат.

Перед сравнением исследуемых графиков СРМБ следует выделять совпадающую часть частотного диапазона (в примере, представленном на рис. 4, для анализа выделена полоса частот от 10.6 ГГц до 11.0 ГГц).

Поскольку натяжение и температура исследуемого ОВ могут отличаться от аналогичных характеристик «образцового» ОВ, то в этом

случае возможна ошибочная классификация (будет выбран неправильный шаблон). В этом случае будет целесообразно перед сравнением массивов данных выровнять положение основных максимумов и привести оси в единый масштаб.

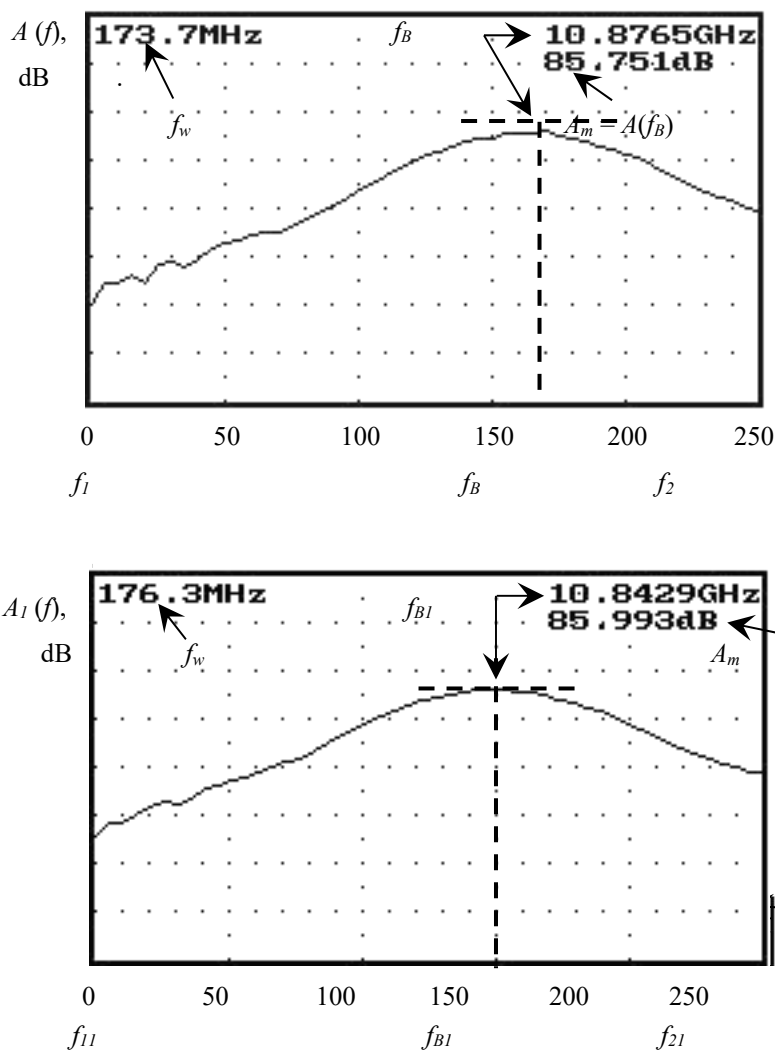


Рис. 4. Масштабирование профилей СРМБ исследуемого ОВ и шаблона

Для этого потребуется пересчитать для шаблона масштаб и координаты по оси абсцисс. Также можно сдвинуть все точки по оси ординат на величину разности значений в максимумах, что приведёт к их одинаковым значениям.

Профиль СРМБ первого ОВ-G.652, рассмотренного выше, но нагретого до температуры +60 °С, представлен на рис. 5. В этом случае  $f_1 = 10,5$  ГГц,  $f_2 = 11,1$  ГГц,  $f_B = 10,9$  ГГц.

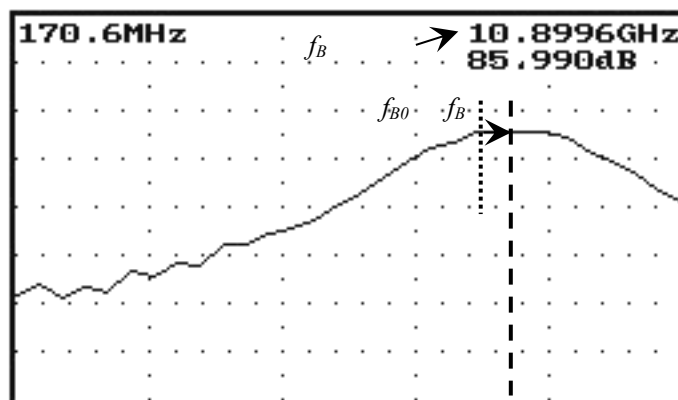


Рис. 5. Оценка изменения БЧС для нагретого ОВ-G.652

После анализа данных загруженного массива можно определить величину смещения БЧС (отличие  $f_B$  от  $f_{B0}$ ) и изменение уровня сигнала обратного отражения в области максимума СРМБ. Это позволяет определить изменения натяжения ОВ при воздействии различных внешних факторов [16, 17].

Для обработки данных рефлектограмм БОИР, автоматизации вычислений и классификации факторов, вызвавших изменения БЧС и продольного натяжения, в Омском государственном техническом университете (ОмГТУ) были созданы программы [14, 15], работа которых кратко описана ниже. Пример экрана программы, используемой для классификации разновидности ОВ (ОВ-G.655 – NZDSF), представлен на рис. 6.

После запуска программы необходимо загрузить файл выходной рефлектограммы БОИР. На рис. 6 в левом верхнем углу показана загруженная мультирефлектограмма с указанием характерных участков и БЧС. В ней приведены зависимости натяжения, ширины СРМБ, уровня сигнала и профиль СРМБ. (Может использоваться любая другая разновидность рефлектограмм БОИР, которая содержит характеристики СРМБ.) После этого запускается процесс выделения данных, соответствующих графику СРМБ. Этот график СРМБ выводится справа от изображения мультирефлектограммы (см. рис. 6), а после него следует график нормированного массива, который будет сравниваться с базой шаблонов.



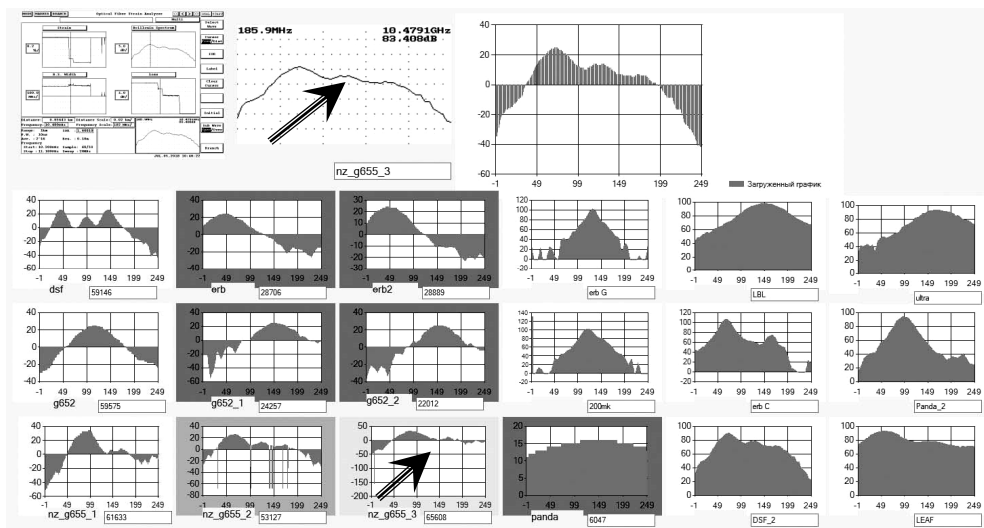


Рис. 6. Скриншот экрана программы при классификации типа ОБ

После проведённого анализа (в данном примере – на основе формулы (3)) «образец» (шаблон), который по итоговым оценкам получил наилучшую оценку совпадения с анализируемым изображением (максимальное значение оценки по формуле (3)), подсвечивается программой зелёным цветом (на рис. 6 отмечен стрелкой, как и исходный график СРМБ). «Образцы» с меньшей (но близкой) степенью подобия подсвечиваются жёлтым цветом (приведены на рис. 6 ниже рассмотренных выше изображений).

В последующих версиях программы были добавлены функции определения натяжения ОБ и дополнительные корректирующие действия. Пример экрана программы после завершения процесса выделения профиля СРМБ из файла рефлектограммы, классификации типа (в этом примере – ОБ “LEAF”, нагретое до +90 °С) и вычисления значений изменения БЧС (в МГц) и продольного натяжения (в %) показаны на рис. 7.

На первом этапе программа автоматически определяет данные о частотном диапазоне, максимальной амплитуде и т.п. Пользователь может получить доступ к графическим изображениям всех «образцов» из базы рефлектограмм. В усовершенствованной версии программы [15] после определения СРМБ определяются также параметры РМБ и оценивается величина продольного натяжения вдоль ОБ.

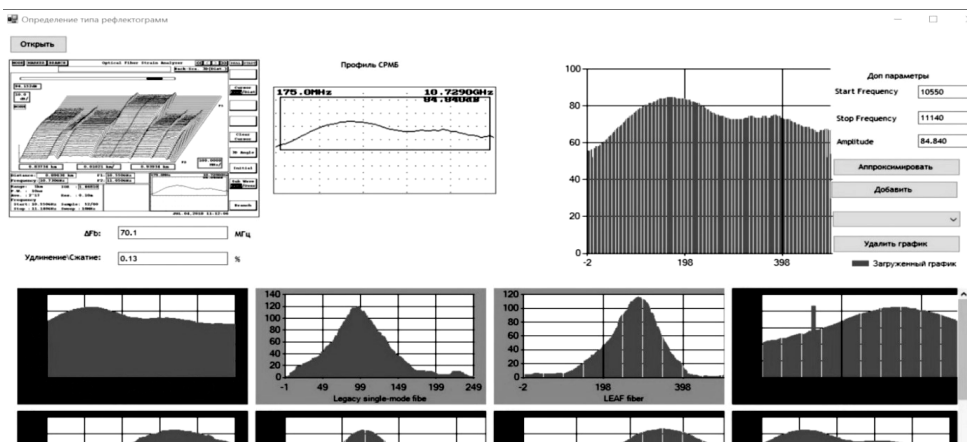


Рис. 7. Выявление разновидности ОВ, БЧС и уровня натяжения

При анализе мультирефлектограмм БОИР можно выявлять участки с изменённой температурой и проводить коррекцию значений БЧС и продольного натяжения на основе выделения и компенсации изменений, которые были обусловлены только температурными воздействиями. В результате вычисляется величина продольного натяжения ОВ, которое было вызвано продольными силовыми нагрузками. Пример работы программы в таком режиме («Мульти») представлен на рис. 8.

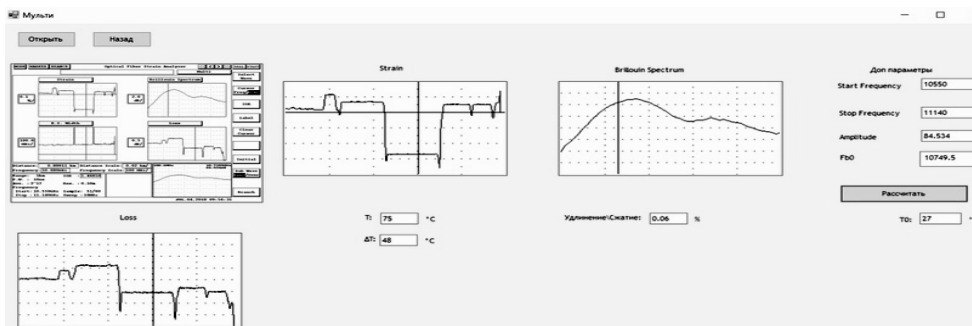


Рис. 8. Пример вычисления параметров ОВ

Кроме определения БЧС (и его возможного изменения относительно начального значения) рассчитывается величина натяжения ОВ, а также находится температура анализируемого ОВ и её изменения («ΔТ») относительно начальной («Т0»). По рефлектограмме уровня обратного сигнала («Loss») с помощью алгоритма, подробно описанного

в [16, 17], можно определить изменение БЧС, которое вызвано исключительно температурными воздействиями.

На рис. 9 приведена копия экрана при расчете БЧС, температуры и натяжения, на котором в правом нижнем углу отображается график изменений БЧС из-за температурных воздействий. После нажатия кнопки «Компенсировать» в правом нижнем углу экрана будет сделана соответствующая компенсация изменений степени продольного натяжения из-за изменений температуры [15].

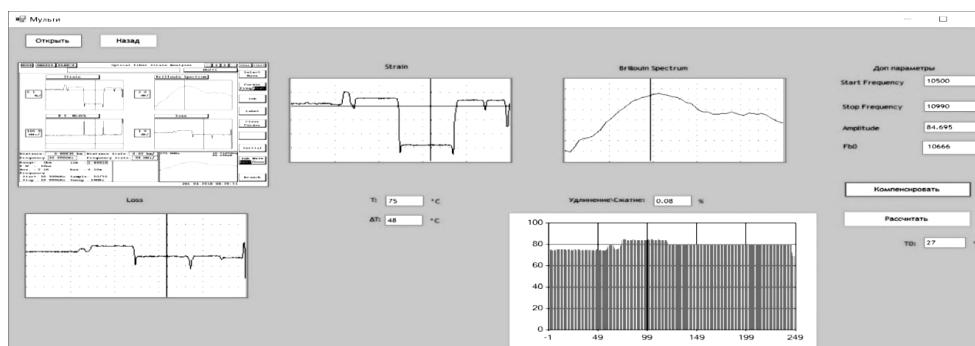


Рис. 9. Пример экрана работающей программы после компенсации изменений степени натяжения из-за повышения температуры

Для сравнения результатов оценок подобию, полученных различными способами, была разработана специальная разновидность представленных программ, в которой все полученные оценки были сведены вместе в единые таблицы. Анализ показал, что первый [6] и третий (4) из рассмотренных алгоритмов дают схожие оценки.

Одной из проблем, которая была выявлена в результате анализа большого количества экспериментальных рефлектограмм БОИР, является классификация ОВ для разновидностей с единственным «пиком», имеющих близкие значения БЧС. Так как сдвиги СРМБ могут быть вызваны механическими и температурными воздействиями, это может вызывать ошибки классификации в таких случаях. Для повышения точности оценок степени подобию графиков СРМБ следует перед вычислениями совместить эти графики в области максимумов. При оценке степени подобию графиков СРМБ ОВ с единственным «пиком», имеющих близкие значения БЧС, меньшее количество ошибок классификации обнаружилось при оценках по второму алгоритму (3). Коррекция коэффициентов важности в (4) позволяет улучшить точность третьего алгоритма.

Таким образом, представленные программы позволяют по рефлектограммам БОИР классифицировать ОВ, рассчитать характеристики БЧС и степени продольного натяжения, а также выявить фактор воздействия на ОВ и компенсировать влияние температурных воздействий. Различия в частотных зависимостях РМБ позволяют выявлять тип ОВ. Дальнейшее совершенствование программ автоматизированной обработки рефлектограмм БОИР связано с проведением дополнительных оценок, связанных с совмещением исследуемых графиков по положениям максимумов СРМБ.

### **Список литературы**

1. Bogachkov I.V., Gorlov N.I. Determination of the Mandelstam – Brillouin scatter frequency characteristic in optical fibers of various types // *Journal of Physics.* – 2022. – Vol. 2182, № 1. – P. 012089.
2. Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Krivosheev A.I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain reflectometry // *Fibers.* – 2020. – Vol. 8, № 9. – P. 60.
3. State-of-the-art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing / A.I. Krivosheev, F.L. Barkov, Y.A. Konstantinov [et al.] // *Instruments and Experimental Techniques.* – 2022. – Vol. 65, № 5. – P. 687–710.
4. Bogachkov I.V. Research of the features of Mandelstam – Brillouin backscattering in optical fibers of various types // *T-Comm.* – 2019. – Vol. 13, № 1. – P. 60–65.
5. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах различных видов // *Приборы и техника эксперимента.* – 2023. – № 5. – С. 70–77.
6. A classification of optical fibers types on the spectrum profile of the Mandelstam – Brillouin backscattering / I.V. Bogachkov, A.I. Trukhina, D.P. Inivatov, A.P. Kireev, N.I. Gorlov // *Journal of Physics.* – 2019. – Vol. 1210, № 1. – P. 012023.
7. Bogachkov I.V., Trukhina A.I. Researches of initial value of the Brillouin frequency shift in optical fibers of different types // *Proceedings of Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications.* – 2018. – P. 1–4.

8. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices / A.B. Ruffin, M.-J. Li, X. Chen, A. Kobayakov, F. Annunziata // *Opt. Lett.* – 2005. – Vol. 30, № 23. – P. 3123–3125.

9. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers / Y. Koyamada, S. Sato, S. Nakamura, H. Sotobayashi, W. Chujo // *Journal of Lightwave Technology.* – 2004. – Vol. 22, № 2. – P. 631–639.

10. Bogachkov I.V. Automatized determination of types and characteristics of the optical fibers state located in the laid cables // *Journal of Physics.* – 2020. – Vol. 1546, № 1. – P. 012044.

11. Богачков И.В., Горлов Н.И. Основы автоматизированной обработки рефлектограмм оптических волокон для оценки характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна // *Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов.* – 2020. – Т. 11, № 2. – С. 18–24.

12. Bogachkov I.V., Gorlov N.I. The basics of automated processing of optical fiber reflectograms for evaluating characteristics of the Mandelstam – Brillouin backscatter // *Proceedings of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO).* – 2020. – P. 1–6.

13. Bogachkov I.V. Principles of automated data processing of Mandelstam – Brillouin backscatter characteristics for evaluating the state of optical fibers // *T-Comm.* – 2020. – Vol. 14, № 8. – P. 47–52.

14. Св-во о гос. регистр. програм. для ЭВМ № 2019610752. Программа для классификации разновидностей оптических волокон по бриллюэновским рефлектограммам / И.В. Богачков; заявит. ОмГТУ; – заявл. 07.11.2018. – № 2018662391; опубли. 18.01.2019.

15. Св-во о гос. регистр. програм. для ЭВМ № 2019667360. Программа для выявления типа воздействия на оптические волокна и определения их натяжения / И. В. Богачков; заявит. ОмГТУ; заявл. 13.12.2019. – № 2019666447/69; опубли. 23.12.2019.

16. Богачков И.В. Классификация факторов, вызывающих изменение натяжения оптических волокон, на основании бриллюэновских рефлектограмм // *Динамика систем, механизмов и машин.* – 2019. – Т. 7, № 4. – С. 184–191.

17. Bogachkov I.V. Classification of the factors causing the change of the optical fiber strain on the basis of Brillouin reflectograms // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2020. – Vol. 1441, № 1.

## References

1. Bogachkov I.V., Gorlov N.I. Determination of the Mandelstam - Brillouin scatter frequency characteristic in optical fibers of various types. *Journal of Physics Conference Series*, 2022, vol. 2182, no. 1, p. 012089.
2. Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Krivosheev A.I. A novel method of spectra processing for Brillouin optical time domain reflectometry. *Fibers*, 2020. vol. 8, no. 9, p. 60.
3. Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Y.A. et al. State-of-the-art methods for determining the frequency shift of Brillouin scattering in fiber-optic metrology and sensing. *Instruments and Experimental Techniques*, 2022, vol. 65, no. 5, pp. 687-710.
4. Bogachkov I.V. Research of the features of Mandelstam - Brillouin backscattering in optical fibers of various types. *T-Comm*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 60–65.
5. Bogachkov I.V., Gorlov N.I. Jeksperimental'nye issledovanija harakteristik rassejanija Mandel'shtama - Brilljujena v odnomodovyh opticheskikh voloknah razlichnyh vidov [Experimental studies of the characteristics of Mandelstam - Brillouin scattering in single-mode optical fibers of various types]. *Pribory i tehnika jeksperimenta*, 2023, no. 5, pp. 70-77.
6. Bogachkov I.V., Trukhina A.I., Inivatov D.P., Kireev A.P., Gorlov N.I. A classification of optical fibers types on the spectrum profile of the Mandelstam - Brillouin backscattering. *Journal of Physics*, 2019, vol. 1210 no. 1, p. 012023.
7. Bogachkov I.V., Trukhina A.I. Researches of initial value of the Brillouin frequency shift in optical fibers of different types. *Proceedings of Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, 2018, pp. 1-4.
8. Ruffin A.B., Li M.-J., Chen X., Kobayakov A., Annunziata F. Brillouin gain analysis for fibers with different refractive indices. *Opt. Lett.*, 2005, vol. 30, no. 23, pp. 3123-3125.
9. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S., Sotobayashi H., Chujo W. Simulating and designing Brillouin gain spectrum in single-mode fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, vol. 22, no. 2, pp. 631-639.
10. Bogachkov I.V. Automated determination of types and characteristics of the optical fibers state located in the laid cables. *Journal of Physics*, 2020, vol. 1546, no. 1, p. 012044.

11. Bogachkov I.V., Gorlov N.I. Osnovy avtomatizirovannoj obrabotki reflektogramm opticheskikh volokon dlja ocenki harakteristik ras-sejanija Mandel'shtama – Brilljujena [Fundamentals of automated processing of reflectograms of optical fibers for assessing the characteristics of Mandelstam - Brillouin scattering]. *Sistemy sinhronizacii, formirovanija i obrabotki signalov*, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 18-24.

12. Bogachkov I.V., Gorlov N.I. The basics of automated processing of optical fiber reflectograms for evaluating characteristics of the Mandelstam - Brillouin backscatter. *Proceedings of Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 2020, pp. 1-6.

13. Bogachkov I.V. Principles of automated data processing of Mandelstam - Brillouin backscatter characteristics for evaluating the state of optical fibers. *T-Comm*, 2020, vol. 14, no. 8, pp. 47-52.

14. Bogachkov I.V. Programma dlja klassifikacii raznovidnostej opticheskikh volokon po brilljujenovskim reflektogrammam [A program for classifying types of optical fibers using Brillouin reflectograms]. Certificate of state registration of a computer program Rossiiskaia Federatsiia no. 2019610752 (2019).

15. Bogachkov I.V. Programma dlja vyjavlenija tipa vozdeystvija na opticheskie volokna i opredelenija ih natjazhenija [A program for identifying the type of impact on optical fibers and determining their tension]. Certificate of state registration of a computer program Rossiiskaia Federatsiia no. 2019667360 (2019).

16. Bogachkov I.V. Klassifikacija faktorov, vyzyvajushhikh izmenenie natjazhenija opticheskikh volokon, na osnovanii brilljujenovskih reflektogramm [Classification of the factors causing the change of the optical fiber strain on the basis of Brillouin reflectograms]. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 184-191.

17. Bogachkov I.V. Classification of the factors causing the change of the optical fiber strain on the basis of Brillouin reflectograms. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1441, no. 1.

**Сведения об авторе**

**БОГАЧКОВ И.В.**

e-mail: *bogachkov@mail.ru*

Омский государственный технический университет (ОмГТУ). Профессор кафедры «Средства связи и информационная безопасность», доктор технических наук, доцент, Senior member IEEE. Кафедра «Средства связи и информационная безопасность».

**About the author**

**BOGACHKOV I.V.**

e-mail: *bogachkov@mail.ru*

Adv. Dr., Docent, Professor of the Department “Communications and Information Security”, Omsk State Technical University, Omsk, Russia, Senior Member IEEE

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад автора** 100 %.

**Получена:** 26.09.2023

**Одобрена:** 30.09.2023

**Принята к публикации:** 01.10.2023

**Financing.** The work had no sponsorship.

**Conflict of Interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Author’s Contribution** is 100 %.

**Received:** 26/09/2023

**Approved:** 30/09/2023

**Accepted for publication:** 01/10/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Богачков, И.В. Автоматизация процессов определения характеристик натяжения оптических волокон, классификации их разновидностей и выявления фактора воздействия по бриллюэновским рефлектограммам / И.В. Богачков // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 6. – С. 92–107.

Please cite this article in English as: Bogachkov I.V. An automation of the detection processes of the strain characteristics of optical fibers, classification of their varieties and identification the influence factor according to Brillouin reflectograms // Applied photonics, 2023, no. 6, pp. 92-107.