# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЙ для распределенного исследования бриллюэновского сдвига в РМ-волокнах в условиях производства

Ю.Константинов, к.т.н., заведующий лабораторией фотоники Пермского ФИЦ Уральского отделения РАН, А.Кривошеев, м.н.с. Пермского ФИЦ УРО РАН, аспирант ПНИПУ / antokri@yandex.ru, Ф.Барков, к.ф.-м.н., с.н.с. Пермского ФИЦ УРО РАН

УДК 53.082, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.106.6.54.59

Представлена структура автоматизированной системы измерений, позволяющая комбинировать различные подходы к детектированию сдвига спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна. Применение разработанной системы позволило повысить точность определения параметров специальных волоконных световодов на величину порядка 10% на действующем промышленном производстве. Как составная и важнейшая часть системы, представлена программная реализация модели, учитывающая возможность распространения излучения по двум поляризационным осям анизотропных оптических волокон (РМ-волокон), что позволяет оценить ошибку определения сдвига вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в РМ-волокнах.

#### Введение и постановка задачи

Различные типы волоконно-оптических датчиков сегодня широко применяются в науке и промышленности [1-10]. В том числе хорошо известны датчики на основе спонтанного и вынужденного рассеяния Бриллюэна. В некоторых случаях используют более сложные с технологической точки зрения анизотропные датчики, в основе которых лежит использование анизотропных оптических волокон, сохраняющих состояние поляризации вводимого излучения.

Данный факт накладывает более строгие требования к качеству сенсора на всех стадиях производства. В связи с этим встает вопрос разработки автоматизированной системы измерений (АСИ) параметров анизотропных ОВ, которая позволит повысить качество создаваемых световодов в условиях производства, а также откроет новые возможности для проведения лабораторных исследований. Важной задачей является получение точной информации о положении истинного максимума спектра вынужденного рассеяния Мандельштама - Бриллюэна (ВРМБ) [11]. Возможные источники шумов в Brillouin Gain Spectrum (BCS) включают: двойное рэлеевское рассеяние (по факту представляющее собой многолучевую помеху, преобразующую фазовый шум сигнала в шум интенсивности), а также и помехи, вызванные взаимодействием сигналов зондирования и накачки [12], шумы оцифровки [13], шумы оптоэлектронных элементов установки [14, 15]. Широкий спектр методов детектирования максимума BCS (в т.ч. аппроксимация лоренцевой функцией – Lorentzian Curve Fitting, LCF) представлен в работах [16-20].

Начать описание АСИ целесообразно с модели, которая определяет "движение" измеряемого образца по метрологическому циклу промышленной лаборатории.

### 1. Моделирование ошибки экстракции BFS

Физическая природа ВРМБ прекрасно описана в [21]. Оптическая мощность в каждой точке световода и на каждой частоте будет определяться как [14]:

$$G(\mathbf{v}, z) = \frac{g_{\rm B}(\mathbf{v})}{A_{\rm ao}^{(j)}} P_{\rm p} e^{(-\alpha_{\rm P} z)} \Delta z, \qquad (1)$$

где ∆z – длина взаимодействия волн накачки и зондирования, на которой g<sub>B</sub>(v) полагается неизменной (g(v) – это сумма всех спектров усиления продольных акустических мод),

А<sup>(j)</sup> – акустооптическая эффективная площадь j-го порядка.

С учетом шумовой компоненты  $\sigma_{\Sigma}$  выражение для отношения сигнал-шум (SNR) можно записать следующим образом:

$$\sigma_{\Sigma} = (B\sigma^2 + 2qI_{\Gamma}B + 2F_Nq(\Gamma - 1)I_{\Gamma}B)^{1/2}, \qquad (2)$$

$$SNR(v,z) = \frac{G(v,z)I_{\Gamma}}{(B\sigma^{2} + 2qI_{\Gamma}B + 2F_{N}q(\Gamma-1)I_{\Gamma}B)^{0.5}},$$
 (3)

где В – полоса пропускания детектора, σ<sup>2</sup> – спектральная плотность мощности,

 $I_{\Gamma}$  – постоянная компонента фототока,  $F_{\rm N}$  – вклад шума оптического усилителя (EDFA),

Γ – коэффициент усиления EDFA,
 q – электрический заряд.

Далее рассчитывается ошибка детектирования в координате z волокна:

$$\in(z) = \frac{1}{\mathrm{SNR}(z)} \sqrt{\frac{(3s\Delta v_{\mathrm{ac}})}{16\sqrt{2}(1-\eta)^{3/2}}},$$
 (4)

где s – шаг сканирования лазера по частоте, η – доля спектральной области пика, берущаяся в обработку при расчете бриллюэновского сдвига частоты (BFS или v<sub>B</sub>).

Комбинируя выражения (3) и (4), получим:

$$\epsilon(z) = \frac{1}{G_{v_{B}}(z)I_{\Gamma}} \sqrt{\frac{3\delta \Delta v_{ac} (B\sigma^{2} + 2qI_{\Gamma}B + 2F_{N}q(\Gamma-1)I_{\Gamma}B)}{16\sqrt{2}(1-\eta)^{3/2}}}$$
(5)

На рис.1 показан результат определения ошибки детектирования частотного сдвига ВРМБ в каждой точке волокна. На нем они сравнены с аналогичными данными, но полученными с учетом ошибки определения SNR по дискретно заданному спектру.



**Рис.1.** Ошибка детектирования BFS по длине световода (моделирование). Красной линией показан результат с учетом ошибки определения SNR по дискретно заданному спектру

Эти данные совпадают с результатами, полученными в [14]. В случае моделирования ошибки детектирования BFS в анизотропных волокнах целесообразно произвести вычисление по формулам (3)–(5) для обеих осей световода отдельно как для двух раздельных оптических волокон [22], [23], [24]. Полученные для разных волокон значения SNR(z) позволили заключить, что вариация SNR в спектрах должна осуществляться в пределах от 2 до 27 дБ. Следовательно, при получении BGS следует опираться на эти значения. Разница ошибок детектирования (с учетом ошибки определения SNR по дискретно заданному спектру (∈) и без нее (ε)) рассчитывается следующим образом:

 $D(z, n, N) = \epsilon(z, n, N) - \epsilon(z, n, N)$  (6)

D(n, N) = Max(D(z, n, N)), (7)

где n – количество точек в спектре, N – количество усреднений.

При этом, как показывает поверхность, представленная на рис.2, эти девиации (D) тем больше, чем меньше сделано усреднений, и чем ниже разрешение спектра, как и положено паразитной флуктуации. Максимальное значение этой флуктуации D(z), полученное в выражении (7), достаточно невысокое (ниже 60 кГц) и используется для корректировки настроечных коэффициентов в модели.

## 2. Структура АСИ бриллюэновского сдвига

Для уменьшения временных затрат во время производства предлагается использовать автоматизированную систему измерений, представленную на рис.3.

Оптическое волокно сразу после процедуры вытяжки из заготовки проходит паспортизацию оптических и геометрических параметров, измеренных на его торцах, среди которых профиль показателя преломления для двух поляризационных осей. На основе этих данных программное обеспечение имитирует обратное ВРМБ в волокне такого типа, генерируя набор спектров ВРМБ для каждой точки световода (для каждой поляризационной моды) и рассчитывает по этим спектрам отношение сигнал-шум



**Рис.2.** Разница точностей детектирования частотного сдвига ВРМБ по данным моделирования и дискретно заданным спектрам

измерения и синхронизация



**Рис.3.** Упрощенная концепция АСИ пространственного распределения бриллюэновского сдвига частоты в волоконном световоде

и прогнозируемую ошибку регистрации пика ВРМБ.

На современном компьютере это происходит менее чем за 1 с, причем еще до поступления измеряемого волокна в исследовательскую лабораторию. Если при заданном количестве усреднений и точек в спектре обеспечивается необходимое время измерения и допустимая (в том числе, и для будущего раздельного измерения температур и деформаций) погрешность, исследователь может подключить волокно к бриллюэновскому анализатору и получить фактические спектры данного волокна в каждой точке. Далее, по ним точно так же рассчитывается отношение сигнал-шум и прогнозируемая ошибка.

Если обнаруживается некоторая значительная невязка (0,5 МГц и более) между этими данными, полученными моделированием и в эксперименте, в корректирующие коэффициенты модели вносятся изменения. Исходя из полученных SNR выбирается метод вычисления частоты бриллюэновского пика.

Поскольку оптимальные для каждого метода диапазоны SNR покрывают не всю шкалу возможных отношений сигнал-шум, при невозможности точного выбора лучшего алгоритма рассматриваемая система прибегает к нейросетевому алгоритму [25].

#### Обсуждение результатов и выводы

Представлена программная реализация модели, учитывающая возможность распространения излучения по двум поляризационным осям оптического волокна, она позволяет оценить ошибку определения сдвига ВРМБ в ОВ "Панда". Модель учитывает инструментальные погрешности используемых на производственных предприятиях рефлектометров. Функционал модели используется в автоматизированной системе измерений параметров специальных волоконных световодов.

Спроектирована структура автоматизированной системы измерений, позволяющая комбинировать различные подходы к детектированию сдвига спектра ВРМБ. Применение разработанной системы позволило повысить точность определения параметров специальных волоконных световодов на действующем производстве на величину порядка 10%.

Работы выполнены в рамках Государственного задания № АААА-А19-119042590085-2.

## <u>ЛИТЕРАТУРА</u>

- Chao C., Liang W., Liang T. Design and Testing of a 2D Optical Fiber Sensor for Building Tilt Monitoring Based on Fiber Bragg Gratings // Applied System Innovation. 2018. Vol. 1. No. 1 [Электронный ресурс]. URL: https:// doi.org/10.3390/asi1010002 (дата обращения: 12.07.2022).
- Sharma V.B., Singh K., Gupta R., Joshi A., Dubey R., Gupta V., Bharadwaj S., Zafar M.I., Bajpai S., Khan M.A., Srivastava A., Pathak D., Biswas S. Review of Structural Health Monitoring Techniques in Pipeline and Wind Turbine Industries // Applied System Innovation. 2021. Vol. 4. No. 3 [Электронный ресурс]. URL: https://doi.org/10.3390/asi4030059 (дата обращения: 12.07.2022).
- Bado M.F., Casas J.R. A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring // Sensors. 2021. Vol. 21. No. 5 [Электронный ресурс]. URL: https://doi.org/10.3390/s21051818 (дата обращения: 12.07.2022).
- Matveenko V., Serovaev G., Kosheleva N., Gusev G. On application of distributed FOS embedded into material for themechanical state monitoring of civil structures // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 33. PP. 925-932.
- 5. Ponomarev R., Konstantinov Y., Belokrylov M., Lobach I., Shevtsov D. Reflectometry Study of the Pyroelectric Effect on Proton-Exchange Channel Waveguides in Lithium Niobate // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 21 [Электронный ресурс]. URL: https://doi. org/10.3390/app 11219853 (дата обращения: 12.07.2022).
- 6. Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A.,

**Lobach I.A.** Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective // Sensors. 2022. Vol. 22. No. 3.

- Bao X., Ravet F., Zou L. Distributed Brillouin sensor based on Brillouin scattering for structural health monitoring // Proceedings of the 2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference. 2006.
- Rao Y., Wang Z., Wu H., Ran Z., Han B. Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ-OTDR) // Photonic Sensors. 2021. Vol. 11. PP. 1–30.
- Yan Y., Zheng H., Zhao Z., Guo C., Wu X., Hu J., Lau A.P., Lu C. Distributed Optical Fiber Sensing Assisted by Optical Communication Techniques // Journal of Lightwave Technology. 2021. Vol. 39. PP. 3654–3670.
- Yuksel K., Wuilpart M., Moeyaert V., Megret P. Optical frequency domain reflectometry: A review // 2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks. 2009. PP. 1–5.
- 11. Nordin N.D., Zan M.S.D., Abdullah F. Comparative Analysis on the Deployment of Machine Learning Algorithms in the Distributed Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) Fiber Sensor // Photonics. 2020. Vol. 7. No. 4 [Электронный ресурс]. URL: https://doi. org/10.3390/photonics7040079 (дата обращения: 12.07.2022).
- 12. Urricelqui J., Soto M.A., Thévenaz L. Sources of noise in Brillouin optical time-domain analyzers // Proc. SPIE 9634, 24th International Conference on Optical Fibre Sensors. 2015.
- 13. Krivosheev A.I., Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Pervadchuk V.P. Comparative Analysis of the Brillouin Frequency Shift Determining Accuracy in Extremely Noised Spectra by Various Correlation Methods // Instruments and Experimental Techniques. 2021. Vol. 64. No. 5. PP. 715-719.
- Soto M.A., Thévenaz L. Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors // Opt. Express. 2013. Vol. 21. No. 25. PP. 31347-31366.
- 15. Wang S., Yang Z., Soto M.A., Thévenaz L. Study on the signal-to-noise ratio of Brillouin optical-time domain analyzers // Opt. Express. 2020. Vol. 28. No. 14. PP. 19864–19876.
- Wu H., Wang L., Zhao Z., Guo N., Shu C., Lu C. Brillouin optical time domain analyzer sensors assisted by advanced image denoising

techniques // Optics express. 2018. Vol. 26. No. 5. PP. 5126-5139.

- 17. Li C., Li Y. Fitting of Brillouin Spectrum Based on LabVIEW // 2009 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2009. PP. 1-4.
- Lourakis M.I., Argyros A.A. Is Levenberg-Marquardt the most efficient optimization algorithm for implementing bundle adjustment? // Tenth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'05). 2005. Vol. 2. PP. 1526–1531.
- Farahani M.A., Castillo-Guerra E., Colpitts B.G. Accurate estimation of Brillouin frequency shift in Brillouin optical time domain analysis sensors using cross correlation // Optics Letters. 2011. Vol, 36. PP. 4275-4277.
- Azad A.K., Wang L., Guo N., Lu C., Tam H.Y. Temperature profile extraction using artificial neural network in BOTDA sensor system // 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). 2015. PP. 1–3.
- 21. Zou W., Long X., Chen J. Brillouin Scattering in Optical Fibers and Its Application to Distributed Sensors // Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications. 2015.

- 22. Burdin V.V., Konstantinov Yu.A., Pervadchuk V.P., Smirnov A.S. A technique for detecting and locating polarisation non-uniformities in an anisotropic optical fibre // Quantum Electronics. 2013. Vol. 43. No. 6. PP. 531–534.
- Smirnov A.S., Burdin V.V., Konstantinov Yu.A., Petukhov A.S., Drozdov I.R., Kuz'minykh Y.S., Besprozvannykh V.G. Birefringence in anisotropic optical fibres studied by polarised light Brillouin reflectometry // Quantum Electronics. 2015. Vol. 45. No. 1. PP. 66–68.
- 24. Barkov F.L., Konstantinov Yu.A., Burdin V.V., Krivosheev A.I. Theoretical and Experimental Estimation of the Accuracy in Simultaneous Distributed Measurements of Temperatures and Strains in Anisotropic Optical Fibers Using Polarization-Brillouin Reflectometry // Instruments and Experimental Techniques. 2020. Vol. 63. PP. 487-493.
- 25. Krivosheev A.I., Konstantinov Yu.A., Pervadchuk V.P., Barkov F.L. Combined neural network method for determining the Brillouin spectrum maximum in distributed fiber-optic sensors // Applied Mathematics and Control Sciences. 2021. No. 3. PP. 95-106.

