

## Исследование характеристик вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах

В.А. Бурдин, К.А. Волков, М.В. Дашков

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики  
443010, Российская Федерация, г. Самара  
ул. Л. Толстого, 23

В работе предложена схема системы опроса волоконно-оптического датчика, основанного на явлении рассеяния Мандельштама – Бриллюэна. В качестве источника опорного излучения предлагается использовать сигнал вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна, формируемый в эталонном оптическом волокне. В работе представлены результаты анализа характеристик вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в зависимости от мощности накачки и параметров оптического волокна.

*Ключевые слова:* оптическое волокно, рассеяние Мандельштама – Бриллюэна, частотный сдвиг, поляризация, сигнал накачки, спектр.

### Введение

В настоящее время распределенные волоконно-оптические датчики, основанные на явлениях рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ), получили применение для контроля механических напряжений и температуры.

Явление РМБ в оптических волокнах (ОВ) заключается в рассеянии оптического излучения на периодических модуляциях показателя преломления, вызванных акустической волной в результате электрострикции (акустических фононах). При этом частота излучения обратного рассеяния снижается на величину, определяемую выражением  $\nu_B = 2n\nu_a / \lambda_p$ , где  $\nu_a$  – скорость распространения акустической волны;  $n$  – показатель преломления ОВ;  $\lambda_p$  – длина волны накачки [1]. Величина частотного сдвига зависит от температуры и механических напряжений в ОВ. Таким образом, измерение величины частотного сдвига позволяет определить параметры внешних воздействий.

Для кварцевых ОВ величина частотного сдвига при длине волны накачки 1550 нм ( $f = 193.5$  ТГц) составляет порядка 10–11 ГГц. При этом ширина спектра РМБ составляет порядка 20–30 МГц [1]. Данная особенность явления вызывает сложности при фильтрации сигнала РМБ на фоне рэлеевского рассеяния и определении величины частотного сдвига.

Известно несколько методик анализа параметров РМБ и реализации систем опроса: использующие когерентный прием оптического и/или электрического сигнала [2]; основанные на применении перестраиваемых по частоте источников накачки [3]; основанные на полигармоническом зондировании контура усиления РМБ [4] и др. Однако на данный момент высокая стоимость подобных систем ограничивает их массовое применение.

Таким образом, актуальной задачей является разработка эффективного и доступного способа для контроля параметров рассеяния Мандельштама – Бриллюэна.

### 1. Метод анализа параметров рассеяния Мандельштама – Бриллюэна на основе квази-гомодинного приема

В данной работе предлагается метод анализа параметров сигнала РМБ на основе квази-гомодинного приема. Суть метода заключается в том, что излучение одного источника служит для зондирования сенсорного ОВ и формирования в эталонном ОВ сигнала вынужденного РМБ, используемого далее в качестве опорного. При этом частоты излучения РМБ, поступающего с сенсорного волокна, и сформированного опорного излучения имеют близкие значения.

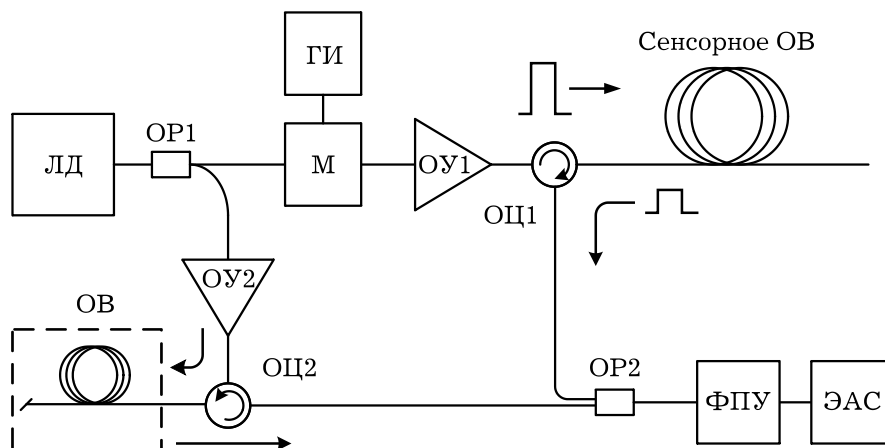


Рис. 1. Структурная схема системы опроса

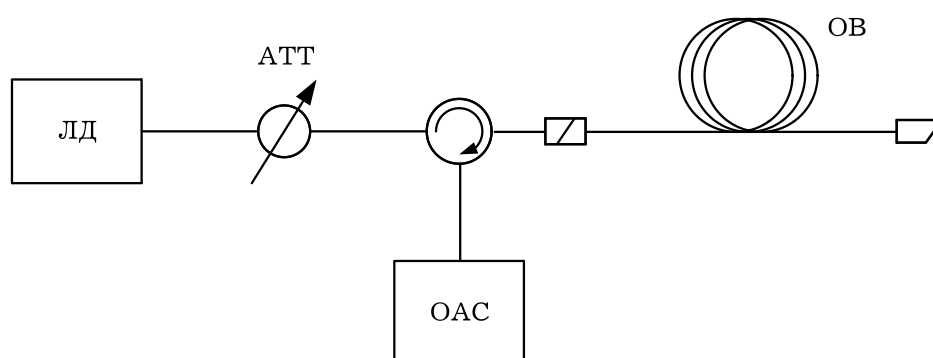


Рис. 2. Схема измерения порогового уровня вынужденного РМБ

Структурная схема представлена на рис. 1. В качестве источника излучения используется узкополосный лазерный диод (ЛД), излучение которого служит для зондирования сенсорного ОВ и формирования опорного сигнала. С выхода оптического разветвителя (ОР1) часть излучения поступает на оптический модулятор (М), управляемый генератором импульсов (ГИ). Далее импульсный сигнал усиливается в ОУ1 и через оптический циркулятор (ОЦ1) поступает в сенсорное ОВ. Излучение со второго выхода ОР2 усиливается в оптическом усилителе (ОУ2) и через циркулятор ОЦ2 поступает в эталонное ОВ, где формируется излучение вынужденного РМБ.

Излучение спонтанного РМБ с сенсорного ОВ и опорное излучение вынужденного РМБ объединяются в оптическом разветвителе ОР2 и поступают на вход фотоприемного устройства (ФПУ). Следует отметить, что ФПУ может быть реализован по схеме балансного приема. В результате на выходе ФПУ будет сформирован сигнал на разностной частоте, который поступает на электрический анализатор спектра (ЭАС), где производится его анализ.

За счет применения одного типа ОВ в качестве сенсорного и эталонного разностная частота в

основном будет определяться величиной изменения частотного сдвига, вызванного внешними воздействиями. Принимая во внимание особенности коэффициентов зависимости частотного сдвига РМБ ( $C_T = 1.26$  МГц/°С и  $C_\varepsilon = 0.056$  МГц/με), для регистрации типовых воздействий требования к ЭАС упрощаются.

Для апробации предложенной схемы требуется проведение теоретических и экспериментальных исследований, связанных с вопросами формирования сигнала вынужденного РМБ и анализа его характеристик.

## 2. Экспериментальное исследование порогового уровня вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна

Для экспериментального исследования порогового уровня накачки для формирования сигнала вынужденного РМБ была реализована схема, представленная на рис. 2. В схеме используется лазерный диод (ЛД) с распределенной обратной связью с центральной длиной волны 1553.2 нм и шириной спектра менее 1 МГц, работающий в режиме непрерывного излучения с выходной мощностью 15 дБм. Для стабилизации параметров сигнала использовался драйвер,

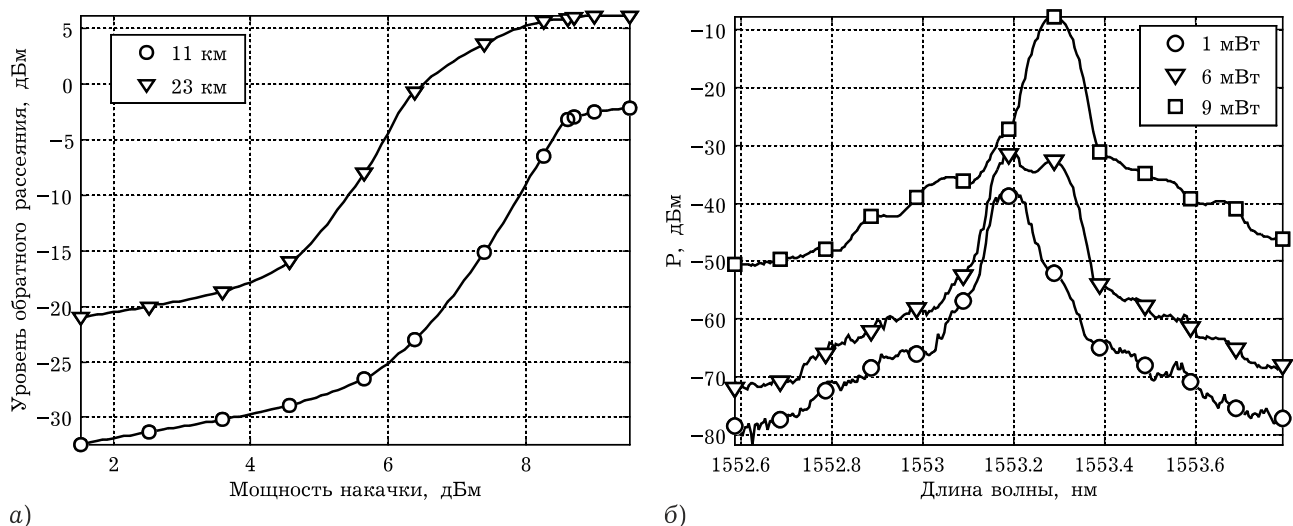


Рис. 3. Результаты для ОВ Corning® SMF-28: а) зависимость уровня обратного рассеяния от мощности накачки; б) зависимость спектральных характеристик сигнала обратного рассеяния от мощности накачки

управляющий ток накачки и встроенным термоэлектрическим холодильником ЛД. Перестраиваемый оптический аттенуатор (АТТ) служит для контроля оптической мощности, вводимой в тестируемое ОВ. С учетом собственного затухания аттенуатора и циркулятора уровень мощности варьировался от 0 до 12 дБм. Поток обратного рассеяния через циркулятор поступает на оптический анализатор спектра (ОАС).

Измерения производились для одномодовых ОВ Corning® SMF-28 (рек. МСЭ-Т G.652. А) и Corning® SMF-28e+ (рек. МСЭ-Т G.652.D). Для предотвращения френелевского отражения использовалось оконцевание разъемами с угловой полировкой.

Результаты, полученные для 11 км и 23 км ОВ марки Corning® SMF-28, представлены на рис. 3. Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что, начиная с уровня мощности 5 дБм, наблюдается резкий рост сигнала обратного рассеяния, что соответствует порогу вынужденного РМБ. Анализ спектральных зависимостей показал (рис. 3, б), что при уровнях мощности накачки ниже порогового в спектре преобладает компонента, соответствующая рэлеевскому рассеянию на длине волны накачки 1553.2 нм, при достижении порогового уровня в спектре появляется второй пик на длине волны 1553.29 нм, соответствующий компоненте вынужденного РМБ. При увеличении мощности накачки преобладает компонента вынужденного РМБ.

Измерения для ОВ марки Corning® SMF-28e+ имеют схожий характер, однако пороговый уровень увеличивается до 8.5–9 дБ при длине ис-

следуемого ОВ 26 км. Данная особенность объясняется применением конструкции ОВ, поддерживающей распространение двух акустических мод с различными характеристиками [5].

### 3. Экспериментальное исследование порогового уровня вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна

В результате исследований было отмечено, что при превышении порогового уровня накачки наблюдаются существенные вариации мощности потока обратного рассеяния во времени. При этом изменения уровня могут составлять до 10–12 дБ при интервале наблюдения в 5–10 с. Одной из возможных причин данного явления могут быть вариации состояния поляризации в оптическом волокне. Для оценки поляризационных характеристик сигнала РМБ была использована схема, представленная на рис. 4.

В данной схеме для разделения потоков рэлеевского рассеяния и рассеяния Мандельштама – Бриллюэна был использован термостабилизированный двухпроходной волоконно-оптический интерферометр Маха – Цандера со свободной областью спектра 0.187 нм [6]. Поляризационный анализатор (ПА) реализован на основе трехкаскадного контроллера поляризации, линейного поляризатора и фотоприемного устройства и позволяет определить параметры вектора Стокса, характеризующие состояние поляризации оптического излучения. Было определено, что спонтанное РМБ сильно деполаризовано (степень поляризации порядка 0.12), что объясняется случайными вариациями состояния

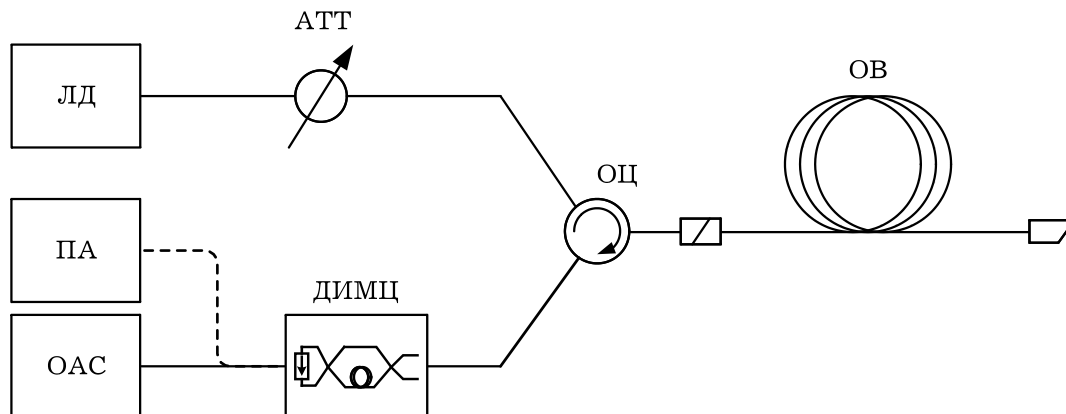


Рис. 4. Схема экспериментальной установки измерения характеристик РМБ

поляризации по длине ОБ, в то время как для вынужденного РМБ степень поляризации – более 0.83. Данные результаты хорошо согласуются с работой [7].

### Заключение

В результате исследований было определено, что в качестве эталонного ОБ для формирования опорного сигнала целесообразно использовать одномодовое ОБ стандартной конструкции. Пороговый уровень мощности должен быть не менее 5 дБм при длине ОБ порядка 10 км. Уменьшение длины эталонного ОБ возможно при увеличении мощности накачки. Сигнал вынужденного РМБ, в отличие от спонтанного, характеризуется высокой степенью поляризации, что должно быть учтено при реализации предлагаемой схемы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00677\18 мол\_а.

### Список литературы

1. Агравал Г.П. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
2. Coherent self-heterodyne detection of spontaneously Brillouin-scattered light waves in a single-mode fiber / K. Shimizu [et al.] // *Optical Letters*. 1993. Vol. 18. № 3. P. 185–187.
3. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering / T. Horiguchi [et al.] // *Journal of Lightwave Technology*. 1995. Vol. 13. № 7. P. 1296–1302. DOI: <https://doi.org/10.1109/50.400684>.
4. Определение характеристик спектра усиления Манделштама – Бриллюэна с помощью двухчастотного зондирующего излучения / О.Г. Морозов [и др.] // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2012. Т. 15. № 3. С. 95–100.
5. Shibata N., Okamoto K., Azuma Y. Longitudinal acoustic modes and Brillouin-gain spectra for GeO<sub>2</sub>-doped-core single-mode fibers. *J. of the Optical Society of America B*, 1989, vol. 6, no. 6, pp. 1167–1174. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.6.001167> [in English].

core single-mode fibers // *J. of the Optical Society of America B*. 1989. Vol. 6. № 6. P. 1167–1174.

6. Souza K.D. Double-pass configured fibre Mach – Zehnder interferometric optical filter for distributed fibre sensing // *Electronics Letters*. 1998. Vol. 33. № 25. P. 2148–2149. DOI: <https://doi.org/10.1049/el:19971181>.
7. Deventer O.M., Boot A.J. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 1994. Vol. 12. № 4. P. 585–590. DOI: <https://doi.org/10.1109/50.285349>.

### References

1. Agrawal G.P. *Nelineynaya volokonnaya optika* [Nonlinear fiber optics]. M.: Mir, 1996, 323 p. [in Russian].
2. Shimizu K. [et al.] Coherent self-heterodyne detection of spontaneously Brillouin-scattered light waves in a single-mode fiber. *Optical Letters*, 1993, vol. 18, no. 3, pp. 185–187 [in English].
3. Horiguchi T. [et al.] Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, vol. 13, no. 7, pp. 1296–1302. DOI: <https://doi.org/10.1109/50.400684> [in English].
4. Morozov O.G. [et al.] Opredeleniye characteristic spektra usileniya Mandelstam-Brillouin s pomoshuyu dvuhchastotnogo zondiruyushchego izlucheniya [Characterization of the Mandelstam-Brillouin amplification spectrum using dual-frequency probing radiation]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy* [Wave process physics and radio systems], 2012, no. 3, pp. 95–100 [in Russian].
5. Shibata N., Okamoto K., Azuma Y. Longitudinal acoustic modes and Brillouin-gain spectra for GeO<sub>2</sub>-doped-core single-mode fibers. *J. of the Optical Society of America B*, 1989, vol. 6, no. 6, pp. 1167–1174. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOSAB.6.001167> [in English].
6. Souza K.D. Double-pass configured fibre Mach – Zehnder interferometric optical filter for distributed fibre sensing. *Electronics Letters*, 1998, vol. 33, no. 25, pp. 2148–2149. DOI: <https://doi.org/10.1049/el%3A19971181> [in English].
7. Deventer O.M., Boot A.J. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, vol. 12, no. 4, pp. 585–590. DOI: <https://doi.org/10.1109/50.285349> [in English].

## Investigation of Brillouin scattering parameters in single mode optical fibers

V.A. Burdin, K.A. Volkov, M.V. Dashkov

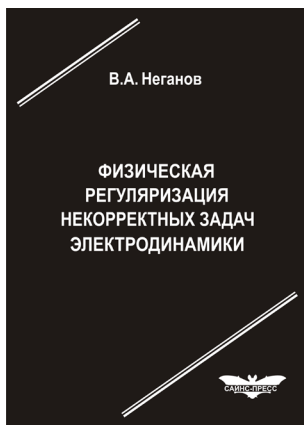
Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics  
23, L. Tolstoy Street  
Samara, 443010, Russian Federation

The interrogation scheme for fiber optic sensor based on Brillouin scattering is represented. The application of stimulated Brillouin scattering signal formed in etalon optical fiber as reference source realized is proposed. The results of experimental investigations of stimulated Brillouin scattering characteristics depends on pump power and optical fiber parameters are represented.

*Keywords:* optical fiber, Brillouin scattering, frequency shift, polarization, pump signal, spectrum.

**Неганов, В.А.**

**Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн / В.А. Неганов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 432 с., 122 ил.**



ISBN 978-5-88070-161-2

УДК 537.87  
ББК 32.84  
Н 41

Изложены основы физической регуляризации некорректных задач электродинамики, связанной с особенностями физических и математических моделей задач (физические допущения, некорректные математические выкладки, отсутствие предельного перехода). Подход, по мнению автора, обладает большими возможностями, чем метод регуляризации Тихонова А.Н. интегральных уравнений Фредгольма первого рода, названный в книге методом математической регуляризации. Метод физической регуляризации (МФР) применен к анализу волноведущих и излучающих структур, а также задачам дифракции электромагнитных волн на некоторых телах. МФР позволил впервые корректно осуществить анализ полей в ближних зонах некоторых антенн, устранить несамосогласованное приближение Кирхгофа в задачах дифракции, установить связь поверхностной плотности тока проводимости с напряженностями электрического и магнитного полей для диполя Герца и т. п.

*Для специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ, электромагнитной совместимости РТС, математической теории дифракции и математического моделирования электродинамических структур самого широкого назначения. Может быть полезна преподавателям вузов, докторантам, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.*