

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 681.586.586.5; 681.518.3

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА – БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ G.654 РАЗНЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ¹

© 2026 г. И. В. Богачков*

Омский государственный технический университет

Россия, 644050, Омск, просп. Мира, 11

** E-mail: bogachkov@mail.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 11.05.2026

Принята к публикации 18.06.2026

Представлены результаты исследования характеристик рассеяния Мандельштама – Бриллюэна для нескольких разновидностей одномодовых оптических волокон со смещенной длиной волны отсечки (рекомендация МСЭ–Т G.654) от разных производителей. Приведены рефлектограммы бриллюэновского рефлектометра, полученные при экспериментальных исследованиях. Приведены оценки бриллюэновского сдвига частоты для каждой исследованной разновидности оптических волокон. Приведены частотные зависимости параметров рассеяния Мандельштама – Бриллюэна новых разновидностей оптических волокон со смещенной длиной волны отсечки. Проведён сравнительный анализ их характеристик с характеристиками ранее исследованных одномодовых оптических волокон.

Ключевые слова: ~~Спектр рассеяния Мандельштама – Бриллюэна, бриллюэновская рефлектометрия, классификация волокон, одномодовое оптическое волокно, смещённая длина волны отсечки, бриллюэновский частотный сдвиг.~~

1. ВВЕДЕНИЕ

После введения санкций против Российской Федерации в нашей стране существенно изменился состав производителей оптических волокон (ОВ) и поставщиков оптических материалов, которые используются при производстве ОВ и оптических кабелей (ОК) [1–3].

Классификация конкретных разновидностей ОВ (схожих по назначению и свойствам, но различных изготовителей) в проложенных ОК, а также оценка их характеристик — это актуальные задачи [1–3].

Метод бриллюэновской рефлектометрии применяется для раннего обнаружения в волокнах ВОЛС участков с потенциально опасным натяжением [1, 4–8]. Этот метод базируется на исследовании в волокне параметров рассеяния Мандельштама – Бриллюэна

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

(РМБ) и определении бриллюэновского частотного сдвига (БЧС) [7–9]. Для этого следует использовать бриллюэновский рефлектометр (BOTDR).

В этой работе представлены результаты исследований характеристик РМБ с помощью BOTDR одномодовых ОВ-G.654 (рекомендация МСЭ–Т G.654 – ОВ со смещённой длиной волны отсечки, которая обычно составляет 1.53 мкм). ОВ-G.654 имеет низкие потери на макроизгибе, оно предназначено для высокоскоростных подводных и наземных оптических сетей большой протяженности, в том числе для тех, где применяются оптические усилители. В ОВ-G.654 (λ_{cut}) были получены достаточно хорошие характеристики хроматической дисперсии и значения диаметра модового поля в диапазоне длин волн (λ) 1.53 – 1.63 мкм [9–12]. В более поздних версиях ОВ-G.654 были получены меньшие значения удельного затухания (до 0.17 дБ/км на $\lambda = 1.55$ мкм).

Поскольку в ОВ-G.654 разных видов могут наблюдаться заметные изменения параметров рассеяния Мандельштама – Бриллюэна (РМБ) и их частотных спектров, необходимо получить BOTDR-рефлектограммы при разных уровнях сигнала на входе световода, при различных температурных и механических воздействиях на ОВ-G.654 и т. п.

Результаты проведённых автором более ранних исследований ОВ-G.654 и других одномодовых ОВ представлены в работах [8–12].

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для всех тестируемых типов волокон G.654 для исследования параметров РМБ (измерения частотных характеристик РМБ, вычисления значений БЧС и т. п.) необходимо снять BOTDR-рефлектограммы.

При содействии ЗАО «Москабель–Фуджикура» с помощью BOTDR “Ando AQ 8603” было проведено тестирование ОВ-G.654 различных типов и изготовителей, которые были предоставлены сотрудниками ЗАО «Москабель–Фуджикура» и АО «Оптиковолокonné Системы» (г. Саранск).

В каждом эксперименте первым (в качестве нормализующей катушки, длина – более 1 км) подключается ОВ-G.652 (обычное одномодовое ОВ, рекомендация G.652), а далее – световод, составленный из тестируемых разновидностей волокон.

Под «нормальными условиями» понимается отсутствие механических воздействий на тестируемое ОВ, которое имеет комнатную температуру.

BOTDR “Ando AQ 8603” работает на длине волны 1.55 мкм, имеет диапазон сканирования по частоте от 9.5 ГГц до 11.5 ГГц (для определения спектра РМБ) с минимальным шагом по частоте 1 МГц. БЧС в этом BOTDR определяется как частота максимума параболы, построенной с использованием интерполяции по трем отчетам полученного при из-

мерении спектра РМБ: максимальному по уровню и двум соседним. BOTDR “Ando AQ 8603” имеет высокую точность измерения продольного механического натяжения ($\pm 0.004\%$).

При экспериментальных исследованиях минимальная длительность зондирующего импульса составляла 10 нс, что соответствует реальной разрешающей способности по расстоянию в 1 м. Длина составленного из различных волокон световода составляла менее 2 км.

Пример BOTDR-рефлектограммы, полученной автором, приведён на рис. 1. На рис. 1 представлена 3D-BOTDR-рефлектограмма распределения спектра РМБ вдоль световода. В начале световода используется нормализующая катушка из обычного ОВ-G.652 длиной примерно 1 км. На следующих участках световода соединены вместе такие разновидности волокон G.654: волокно “Fujikura nature” (сокращённое обозначение – “FujN”), волокно фирмы “Corning” (G.654 Corning ULL – сокращённое обозначение – “Cor”) и волокно “Fujikura guide TM” (сокращённое обозначение – “FujTM”).

Рис. 1. 3D-BOTDR-рефлектограмма спектра РМБ для световода с участками G.654 различных типов

Диапазон сканирования по частоте составил от 10.82 ГГц до 11.35 ГГц с шагом по частоте 10 МГц (указано в левом нижнем углу рефлектограммы). В правом нижнем углу рефлектограммы показан спектр РМБ в выбранном сечении (на дистанции 1077.18 м, участок с ОВ “Cor”), а также указаны частота максимума (БЧС) – 11.0246 ГГц, его уровень – 87.042 дБ и ширина БЧС – 175.0 МГц.

На рис. 2 представлена соответствующая мультирефлектограмма с указанием характерных участков.

Рис. 2. Бриллюэновская мультирефлектограмма для световода с участками G.654 разных типов

Мультирефлектограмма содержит 4 графика: относительное натяжение вдоль световода (“Strain”, за начальный уровень принимается БЧС обычного волокна G.652), ширина спектра РМБ вдоль световода (“B. S. Width”), спектр РМБ (“Brillouin Spectrum”) на выбранном участке световода (расстояние 1076.46 м, участок с ОВ “FujN”) и уровень обратно отраженного сигнала вдоль световода (“Loss”). Спектр РМБ во всем диапазоне сканирования (указан в левом нижнем углу рефлектограммы: от 10.90 ГГц до 11.29 ГГц с шагом по частоте 20 МГц) на том же расстоянии (участок с ОВ “FujN”) представлен в правом нижнем углу рефлектограммы (частота максимума (БЧС) – 11.1639 ГГц, его уровень – 85.665 дБ, ширина БЧС – 174.8 МГц).

Величина БЧС при нормальных условиях для “FujN” составила в среднем 11.17

ГГц, для “Cor” – 11.04 ГГц, а для ОВ “FujTM” – 11.15 ГГц. Различия характеристик спектра РМБ и БЧС хорошо заметны.

Также были получены спектры РМБ ОВ-G.654C “Fujikura Pure Advance 80” (сокращённое обозначение – “FujPA80”) и ОВ-G.654E “Fujikura Pure Advance 110” (сокращённое обозначение – “FujPA110”). Величина БЧС для волокна “FujPA80” составила в среднем 11.02 ГГц, а для волокна “FujPA110” – 11.03 ГГц. Различия характеристик спектра РМБ и БЧС позволят различать участки с различными типами ОВ.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Значения «пиков» спектра РМБ для всех протестированных оптических волокон типа G.654 разных изготовителей, а также некоторых других оптических волокон G.654, исследованных ранее, [1, 10–12] приведены в табл. 1. Оптическое волокно типа G.654E производства АО «Оптиковолокonné Системы» (г. Саранск) в табл. 1 обозначено сокращением «Sar».

По полученным BOTDR-рефлектограммам можно снять частотные характеристики РМБ различных типов эрбиевых ОВ, а затем установить для каждой разновидности начальное значение (при нормальных условиях) БЧС (f_{B0}).

Таблица 1. Значения «пиков» спектра РМБ для всех протестированных оптических волокон типа G.654

Тип ОВ-G.654	Интервал значений БЧС, ГГц	Средние величины f_{B0} , ГГц
FujH	11.15 ... 11.17	11.16
FujN	11.16 ... 11.18	11.17
FujTM	11.14 ... 11.16	11.15
Cor	11.02 ... 11.05	11.04
FujPA80	11.01 ... 11.03	11.02
FujPA110	11.03 ... 11.05	11.03
Sar	11.02 ... 11.03	11.02

Например, при нормальных условиях значение БЧС для обычного волокна G.652 (длина волны отсечки обычно равна 1260 нм) составляет приблизительно 10.83...10.85 ГГц, для волокна G.652 с длиной волны отсечки 1350 нм – 10.78 ГГц, а для G.652 с длиной волны отсечки 1235 нм – 10.81 ГГц.

Отметим, что спектры РМБ различных типов ОВ существенно различаются [3–10]. Например, спектр РМБ ОВ G.653 (ОВ со смещенной дисперсией) имеет 3 примерно одинаковых по уровню резонансных «горба» [1–4], а у ОВ G.655 (ОВ с ненулевой смещенной

дисперсией) эти резонансные «горбы» (обычно также 3 ярко выраженные, но встречались также варианты с двумя и четырьмя заметными «пиками») имеют существенный спад уровня относительно главного (первого) максимума [3–8].

Встречались также случаи, когда в спектре РМБ второй максимум существенно преобладал над первым. Это наблюдалось только у эрбиевых ОВ [1, 10] и ОВ с высоким содержанием фтора [4–7].

4. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объединение тестируемых секций различных типов одномодовых ОВ в общий световод существенно сокращает время снятия частотных и других характеристик РМБ. BOTDR-рефлектограммы для всего световода определяются одновременно, а затем проводится анализ параметров РМБ (в том числе профилей спектра РМБ) для каждой секции. Различия графиков спектра РМБ ОВ разных типов хорошо заметны.

На основе экспериментальных исследований с помощью BOTDR-рефлектограмм были вычислены величины БЧС при нормальных условиях для всех протестированных типов волокон типа G.654E, а также определены их параметры РМБ.

Введение в состав световодов участков, которые содержат ОВ разных видов, и использование их как «маркеров» позволяют на основе анализа спектральных характеристик РМБ выделить сигналы от различных оптических каналов волоконно-оптических систем связи.

Для автоматизации обработки BOTDR-рефлектограмм и классификации разновидностей ОВ можно использовать различия в частотных характеристиках РМБ и значениях БЧС.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность сотрудникам ЗАО «Москабель–Фуджикура», АО «Оптиковолокonné Системы» (г. Саранск) и Пермского федерального исследовательского центра за помощь в проведении экспериментальных исследований и предоставленные образцы оптических волокон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Приборы и техника эксперимента. 2023. № 5. С. 70. <https://doi.org/10.31857/S0032816223050063>.
2. Богачков И.В., Майстренко В.А., Горлов Н.И. Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9. № 3. С. 86. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-9-3-86-94>.

3. Богачков И.В., Горлов Н.И. Динамика систем, механизмов и машин, 2020. Т. 8. № 4. С. 98. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-8-4-98-105>.
4. . Ruffin A. B, Li M.J., Chen X., Kobyakov A., Annunziata F. Opt. Lett. 2005. V. 30. P. 3123. <https://doi.org/10.1364/OL.30.003123>.
5. Koyamada Y., Sato S., Nakamura S., Sotobayashi H., Chujo W. Lightwave Technol. 2004. V. 22. P. 631. <https://doi.org/10.1109/JLT.2003.822007>.
6. Dragic P.D. J. Opt. Soc. Am. B. 2009. V. 26. P. 1614. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.26.001614>.
7. Tartara L., Codemard C., Maran J., Cherif R., Zghal M. Optics Com. 2009. V. 282. №12. P. 2431. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.03.012>.
8. Богачков И.В. Вестник СибГУТИ, 2021. Вып. 2. С. 88. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2021-15-2-88-99>
9. Bogachkov I.V. T-comm. 2019. V. 13. № 1. P. 60. <https://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10216>.
10. Bogachkov I.V. T-comm. 2025. V. 19. № 12. P. 51. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2025-19-12-51-58>
11. Богачков И. В. Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. № 11. С. 40.
12. Богачков И.В., Горлов Н.И. Телекоммуникации. 2019. № 5. С. 21.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. 3D-BOTDR-рефлектограмма спектра РМБ для световода с участками G.654 различных типов

Рис. 2. Бриллюэновская мультирефлектограмма для световода с участками G.654 разных типов

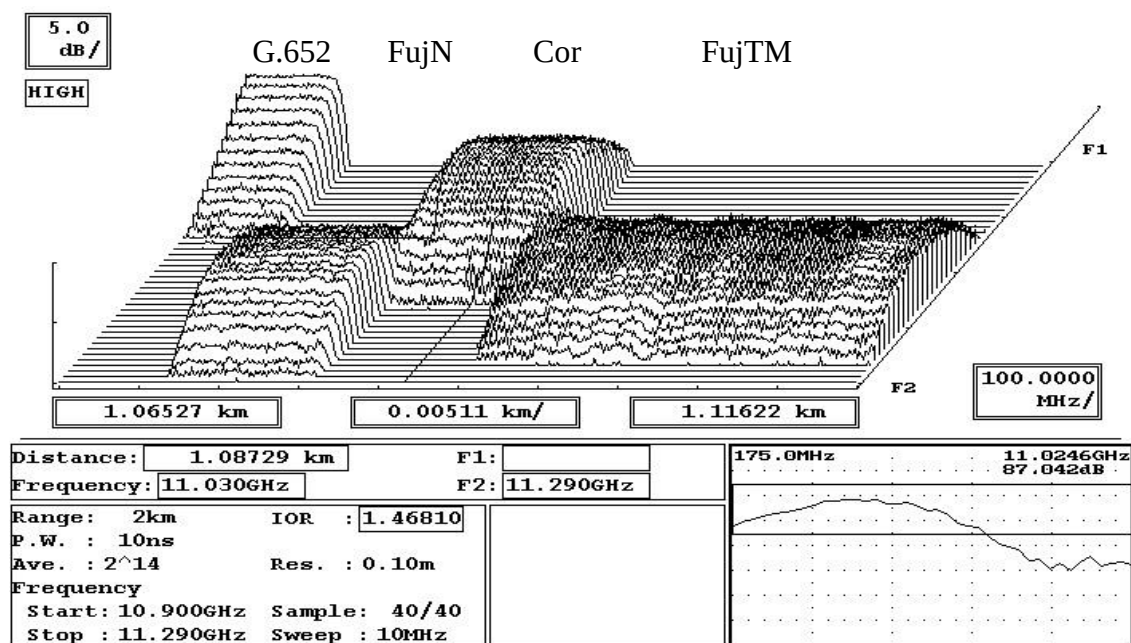


Рис. 1.

f_B

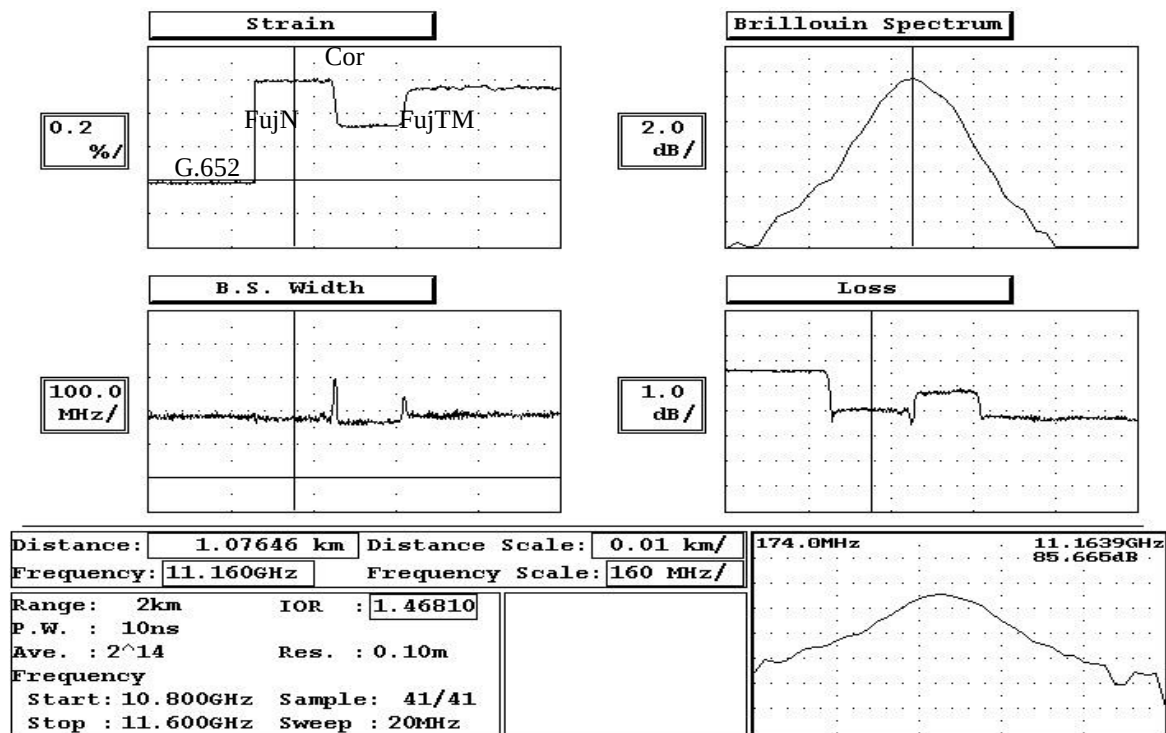


Рис. 2.