

СОЗДАНИЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО ЧАСТОТНОГО СДВИГА И НАТЯЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН¹

© 2023 г. И. В. Богачков^{a,*}

^aОмский государственный технический университет
Россия, 644050, Омск, просп. Мира, 11

*e-mail: bogachkov@mail.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 06.03.2023 г.

Принята к публикации 16.04.2023 г.

Заблаговременное обнаружение потенциально ненадежных участков в оптических волокнах позволяет на ранней стадии выявить деградацию оптических волокон волоконно-оптических линий связи. Ранняя диагностика физического состояния оптических волокон, находящихся в проложенных оптических кабелях телекоммуникационных систем, является важной актуальной задачей. В работе представлены адаптивные алгоритмы, которые позволяют определять максимум спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (бриллюэновский сдвиг частоты), а затем и степень натяжения оптических волокон. Процесс определения бриллюэновского сдвига частоты, величины которого при длинах волн излучения лазеров, применяемых в телекоммуникационных системах, относятся к диапазону СВЧ, можно значительно ускорить, если реализовать адаптивные алгоритмы получения и обработки данных за счет специального выбора шага по частоте сканирования и времени накопления результатов измерений. Рассмотренные в этой работе адаптивные алгоритмы позволяют в бриллюэновских рефлектометрах ускорить процесс получения выходных результатов за счет игнорирования отсчетов, не оказывающих существенного влияния на итоговые характеристики. Построение примерных графиков распределения спектра и натяжения по длине световода дает возможность подготовленному пользователю бриллюэновского рефлектометра останавливать процесс анализа для внесения поправок в измерительный процесс (выбор диапазона сканирования по частоте, изменение шага сканирования по частоте, выбор точности представления выходных результатов, изменение пространственного разрешения и т. п.), что также ускоряет тестирование выбранного световода. Процесс измерений также можно ускорить с помощью адаптивного изменения количества усреднений. При наличии базы измеренных характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна оптических волокон различных типов и производителей скорость получения графиков натяжения также можно повысить. Поскольку ориентировочное значение бриллюэновского частотного сдвига вычисляется уже на начальных шагах процесса измерений, предварительные зависимости распределения натяжения по длине световода будут построены достаточно быстро.

DOI: 10.31857/S0032816223050051, EDN: ZIXUSD

1. ВВЕДЕНИЕ

Для многих предприятий, которые эксплуатируют волоконно-оптические линии связи, задачи ранней диагностики физического состояния оптических волокон (ОВ) и мониторинга телекоммуникационных систем связи являются актуальными [1, 2].

Раннее обнаружение и своевременная профилактика потенциально ненадежных секций в ОВ (участков с повышенными продольными растя-

жениями ОВ, секций с отклонениями температуры от средних значений, с изгибами ОВ и т. п.) являются актуальными задачами ранней диагностики физического состояния ОВ телекоммуникационных систем. Раннее выявление “проблемных” секций волоконно-оптических линий связи позволяет избежать постепенного разрушения ОВ, находящихся в проложенных оптических кабелях [2, 3].

Для выявления натяженных секций в ОВ используются бриллюэновские рефлектометры (BOTDR) или анализаторы (BOTDA) [2–7]. В BOTDR анализируются компоненты рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (МБ), которые содержатся в обратно отраженном сигнале [2–4].

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

После анализа графиков распределения спектра рассеяния МБ вдоль световода выявляется основной максимум спектра рассеяния МБ, после этого вычисляется бриллюэновский частотный сдвиг (f_B), а затем строится зависимость распределения продольного натяжения вдоль ОВ [1–3]. При типичных значениях длин волн лазерных источников, которые формируют тестирующий сигнал в телекоммуникационных системах, значения величин бриллюэновского частотного сдвига (9–13 ГГц), выделяемые для дальнейшего анализа, находятся в СВЧ-диапазоне.

При работе BOTDR подключается только к одному входу световода. Это при оценке натяжения ОВ является важным достоинством BOTDR (по сравнению, например, с BOTDA). Вычисления бриллюэновского частотного сдвига в световоде в известных BOTDR занимают много времени. Совершенствование алгоритмов для повышения скорости построения выходных характеристик (бриллюэновского частотного сдвига, натяжения ОВ) при малых погрешностях вычислений продолжается, в том числе с учетом особенностей рассеяния МБ в специализированных ОВ [4–7]. Поэтому проблема совершенствования алгоритмов обработки результатов измерений и функциональных схем BOTDR (приборов для заблаговременной диагностики состояния ОВ в проложенных кабелях телекоммуникационных систем) с целью сокращения времени получения выходных характеристик является актуальной.

2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для телекоммуникационных систем высокая точность определения степени натяжения ОВ не столь важна.

Для выявления потенциально ненадежных участков волоконно-оптических линий связи вполне достаточно обеспечить погрешность оценки продольного натяжения $\pm 0.05\%$. Гораздо важнее обеспечить высокую скорость получения картины распределения спектра рассеяния МБ в световоде и определения бриллюэновского частотного сдвига (а затем – степени натяжения ОВ).

Таким образом, задача исследования состоит в совершенствовании алгоритмов обработки результатов измерений BOTDR с целью максимально ускорить процесс определения бриллюэновского частотного сдвига и продольного натяжения.

3. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО ЧАСТОТНОГО СДВИГА В ПРИБОРАХ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАТЯЖЕНИЯ В ОВ

В BOTDR перед началом тестирования необходимо задать начальное ($F1$) и конечное ($F2$)

значения частот диапазона, в котором будет проводиться сканирование с заданным шагом сканирования (Δf), который в известных BOTDR может быть только равномерным, а также количество точек наблюдения и количество усреднений в процессе накопления результатов измерений.

Рассмотрим в качестве примера рефлектограмму BOTDR (пространственное распределение спектра рассеяния МБ вдоль световода, составленного из ОВ G.652 + ОВ G.654E; рекомендация МСЭ–Т G.654 – ОВ со смещенной длиной волны отсечки), которая представлена на рис. 1.

В правом нижнем углу рефлектограммы показан частотный профиль спектра рассеяния МБ и указано полученное значение величины максимума спектра рассеяния МБ – бриллюэновского частотного сдвига ($f_B = 11.022$ ГГц) в выбранном поперечном сечении световода (в данном примере для величины продольной координаты линии (z), равной 1519.28 м) [1–3]. При этом также отображаются ширина спектра рассеяния МБ (по уровню –3 дБ от значения максимума) (166.0 МГц) и уровень обратно отраженного сигнала (82.318 дБ).

В левом нижнем углу рефлектограммы приведены показатель преломления сердцевины ОВ ($n = 1.4681$), длительность зондирующего импульса – 10 нс, точность представления по продольной координате – 0.2 м (реальное пространственное разрешение составляет 1 м).

Диапазон сканирования по частоте начинается с 10.900 ГГц ($F1$) и заканчивается на 11.145 ГГц ($F2$), при этом шаг сканирования по частоте равен 5 МГц. Количество точек наблюдения составляет 50, а количество усреднений равно 2^{15} .

Как известно, профиль спектра рассеяния МБ в области максимума имеет параболическую форму [1–8]. Для построения параболы достаточно задать три точки.

В простейшем случае для вычисления максимума данной параболы, точки которой были получены в BOTDR в процессе измерений, определяется диапазон частот по уровню –3 дБ от значения в максимуме, а затем бриллюэновский частотный сдвиг вычисляется как среднее арифметическое для начальной и конечной частот этого диапазона [8].

Однако для точного определения бриллюэновского частотного сдвига следует выбирать не просто частоту принятого сигнала с максимальным уровнем, а в области “пика” необходимо построить параболу с помощью аппроксимации по соседним отсчетам в области максимума спектра рассеяния МБ, после этого максимум данной параболы и принимается за бриллюэновский частотный сдвиг (f_B) [8].

На рис. 2 для ОВ G.654E показан частотный профиль спектра рассеяния МБ с указанием ха-

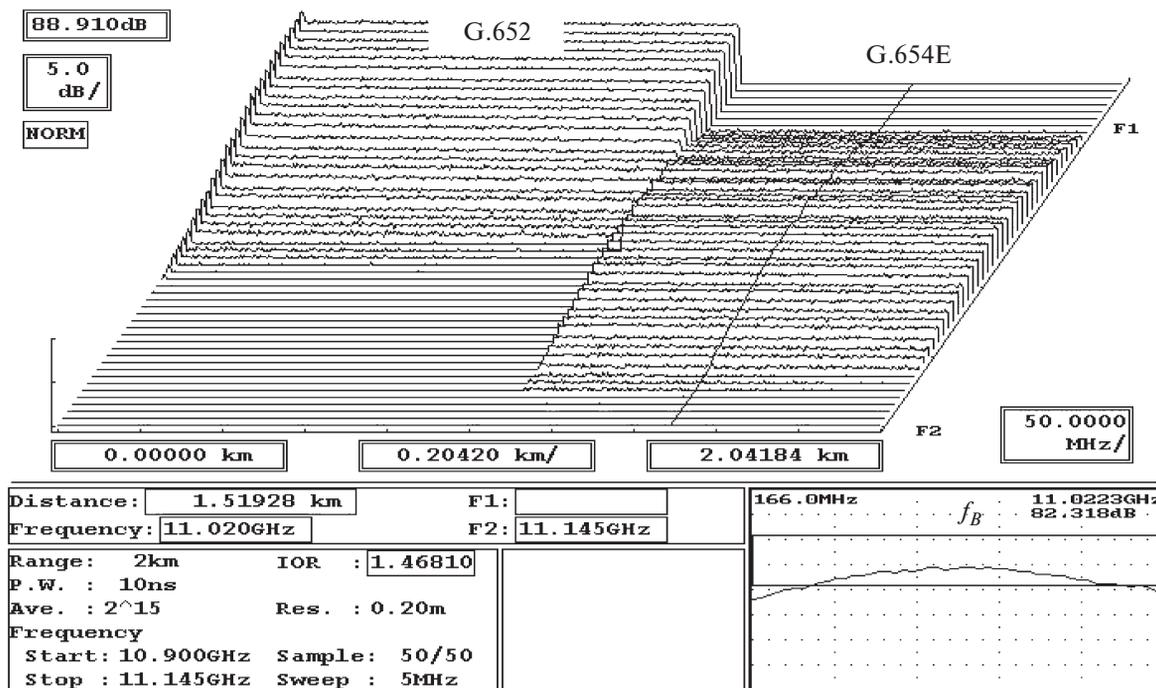


Рис. 1. Пространственное распределение спектра рассеяния МБ для световода, составленного из ОВ G.652 + ОВ–G.654E.

рактерных участков и положения бриллюэновского частотного сдвига (f_B).

Процесс определения спектра рассеяния МБ и бриллюэновского частотного сдвига при высокой разрешающей способности и большом количестве усреднений, как показали многочисленные тестирования световодов с BOTDR “Ando AQ 8603” [8] и “Viavi MTS-8000” [9], занимает достаточно много времени [3, 10–12].

Например, при пространственной точности представления рефлектограммы 0.1 м, количестве усреднений порядка 2^{18} и 50 выбранных точках наблюдения (как на графиках, показанных на рис. 1, 2) время определения итоговых характеристик будет занимать около одного часа. Понижая точность вычисления, уменьшая число усреднений и количество точек наблюдения, данное время удастся значительно сократить, но проблема повышения быстродействия BOTDR с сохранением достаточной точности остается нерешенной.

Ранее при многочисленных экспериментальных исследованиях уже были получены начальные значения уровня бриллюэновского частотного сдвига (f_{B0}) (для не растянутых продольно ОВ, находящихся при комнатной температуре) для многих разновидностей ОВ [1–3, 13–15].

Например, для одномодового ОВ “LEAF” фирмы “Corning” (рекомендация МСЭ–Т G.655 – ОВ с ненулевой смещенной дисперсией) величи-

на f_{B0} находится в области 10.66 ГГц, для ОВ G.654E – в области 11.02 ГГц, а для ОВ G.653 (рекомендация МСЭ–Т G.653 – ОВ со смещенной (нулевой) дисперсией) – в области 10.46 ГГц.

Таким образом, для определения частотного диапазона измерений обратно отраженного сигнала рассеяния МБ следует использовать значения f_{B0} из сформированной базы данных характеристик рассеяния МБ изученных разновидностей одномодовых ОВ [1, 2, 16–18].

3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БРИЛЛЮЭНОВСКОГО ЧАСТОТНОГО СДВИГА

Проанализируем пути совершенствования алгоритмов вычисления бриллюэновского частот-

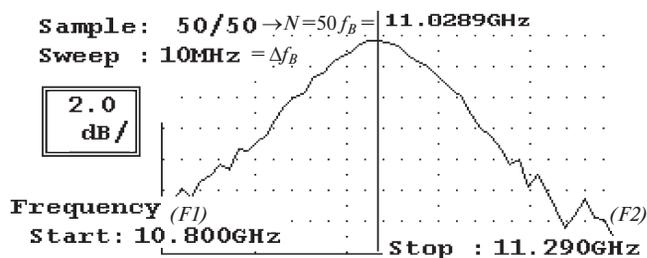


Рис. 2 Профиль ОВ G.654E.

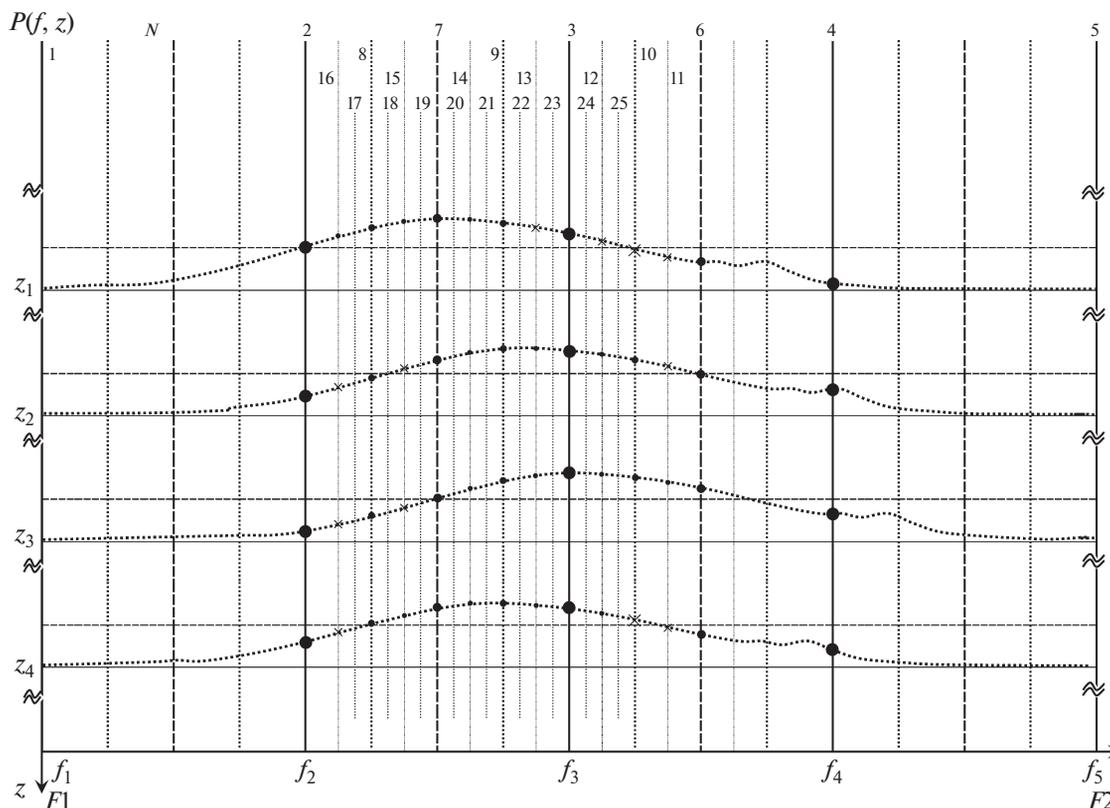


Рис. 3. Выбор отсчетов рефлектограмм BOTDR при адаптивном алгоритме.

ного сдвига в световодах на основе обработки данных, полученных с помощью BOTDR.

При адаптивном алгоритме обработки данных скорость процесса вычисления бриллюэновского частотного сдвига (выявления частоты основного максимума спектра рассеяния МБ) значительно повышается.

Пояснения к рассматриваемому алгоритму обработки данных в BOTDR представлены на рис. 3. Величины $z_1 > z_2 > z_3 > z_4 > \dots$ являются значениями продольных координат (z_i) в заданных соответствующих поперечных сечениях световода ($z = \text{const}$).

Как показывает анализ данных, приведенных на рис. 3, большинство отсчетов, взятых с шагом Δf по частоте в узловых точках графиков в определенном поперечном сечении световода (с продольной координатой z_i), практически не используется в процессе получения итогового результата (спектра рассеяния МБ и бриллюэновского частотного сдвига) [17, 18]. При этом N соответствует номеру текущего отсчета.

Совершенствование алгоритма определения бриллюэновского частотного сдвига заключается в следующем.

На первом этапе частотный диапазон измерений разделяется на четыре одинаковые части с

шагом сканирования Δf_1 . При этом кроме значений в начале ($F1$) и конце ($F2$) частотного диапазона сканирования определяются еще три отсчета, отстоящие друг от друга на величину шага Δf_1 :

$$\begin{aligned} \Delta f_1 &= (F2 - F1)/4, & f_1 &= F1, & f_2 &= f_1 + \Delta f_1, \\ f_3 &= f_1 + 2\Delta f_1, & f_4 &= f_1 + 3\Delta f_1, & f_5 &= F2. \end{aligned} \quad (1)$$

Например, для графика, представленного на рис. 2, $f_1 = 10.8$ ГГц, $f_5 = 11.3$ ГГц. При начальном шаге сканирования по частоте $\Delta f_1 = 125$ МГц имеем $f_2 = 10.925$ ГГц, $f_3 = 11.05$ ГГц, $f_4 = 11.175$ ГГц.

В каждом поперечном сечении (при заданных диапазоне и шаге сканирования по продольной координате z_i) измеряется мощность обратно отраженного сигнала $P(f, z)$ и из всех текущих отсчетов (1–5) выбирается отчет с максимальным значением [17, 18].

На следующем этапе шаг сканирования по частоте уменьшается в два раза: $\Delta f_2 = \Delta f_1/2$, но при этом следующие построения графиков по частотам обратно отраженного сигнала будут проводиться только для отсчетов с уровнями сигналов, имеющих интенсивность, которая составляет не ниже 5 дБ от максимального уровня (“пика”) для каждого сечения по продольной координате z_i (отсчеты 6–7 на рис. 3).

Значения отсчетов $P(f, z)$ в области максимума необходимы для дальнейшего анализа (вычисления бриллюэновского частотного сдвига), а отсчеты с уровнями интенсивности ниже 5 дБ относительно максимального уровня в дальнейшей обработке не учитываются.

Отсчеты, полезные для дальнейших вычислений, на графиках спектра рассеяния МБ на рис. 3 представлены “точками”, а отсчеты, не представляющие интереса для определения бриллюэновского частотного сдвига, — “крестиками”. Для отсчетов (6, 7), полученных на втором этапе, также определяется мощность обратно отраженного сигнала $P(f, z)$, а новое значение максимума теперь выбирается по всем значениям отсчетов текущего шага (1–7), полученным для текущего значения продольной координаты z_i .

На третьем шаге и далее данный процесс циклически повторяется в области текущего положения максимума с уменьшенным в два раза шагом: $\Delta f_i = \Delta f_{i-1}/2$, пока не будет достигнуто значение минимально допустимого шага, заданного перед стартом процесса обработки. Далее значение бриллюэновского частотного сдвига заново уточняется, как уже было описано выше.

Отсчеты 8–10 на рис. 3 соответствуют третьему этапу процесса. Отсчеты 11–16 получены на четвертом шаге, а отсчеты 17–25 анализируются на пятом этапе [10–12].

Если для разных значений продольной координаты z_i положения максимумов оказываются в разных областях области сканирования (например, на рис. 3 значения отсчетов в сечениях z_1 ($N = 7$) и z_3 ($N = 3$)), а это может быть вызвано как различными механическими или температурными воздействиями на ОВ, так и разными типами ОВ в составе ВОЛС, то в каждом сечении z_i для дальнейших вычислений выбираются отсчеты только с уровнями сигнала не ниже 5 дБ от значения максимума (на рис. 3 представлены “точками”), а остальные отсчеты (с меньшим уровнем сигнала), показанные на рис. 3 “крестиками”, в дальнейшем анализе не используются.

Таким образом, при данном адаптивном алгоритме за счет игнорирования отсчетов, не оказывающих влияния на итоговый результат, можно значительно ускорить процесс вычисления бриллюэновского частотного сдвига.

Например, для этапа вычислительного процесса, представленного на рис. 3 (после получения 25-го отсчета), выигрыш составляет более 5 раз (по сравнению с равномерным шагом сканирования по частоте, равным шагу на данном этапе). На следующем шаге процесса данный выигрыш уже составит более 10 раз.

Данная оценка является приближенной. Дополнительно выигрыш в скорости аналогичным

образом увеличивается при адаптивном изменении количества усреднений. Однако, если положение максимума для различных продольных координат окажется в разных начальных секторах частотного диапазона сканирования (например, на рис. 3 это наблюдается при z_1 ($N = 7$) и z_3 ($N = 3$)), то это будет снижать выигрыш в скорости вычислений.

Если на некотором шаге процесса “пик” спектра рассеяния МБ для определенной продольной координаты обнаружен (а значит найдено предварительное значение бриллюэновского частотного сдвига), то параллельно процессу уточнения бриллюэновского частотного сдвига можно запустить процесс построения графика распределения натяжения вдоль световода. На дальнейших этапах процесса этот график будет уточняться [10–12].

Предварительные зависимости распределения натяжения вдоль световода дают возможность подготовленному пользователю бриллюэновского рефлектометра останавливать процесс анализа для внесения поправок в измерительный процесс (изменение диапазона сканирования по частоте, коррекция шага сканирования по частоте, выбор точности представления выходных результатов, изменение пространственного разрешения и т. п.), что также ускоряет тестирование выбранного световода [10].

Следует отметить, что при наличии в составе световода ОВ, имеющих несколько достаточно заметных побочных “пиков” спектра рассеяния МБ, что наблюдается особенно у ОВ G.653 и в меньшей степени у ОВ G.655, для описанного выше алгоритма возможны случаи, когда побочный “пик” может быть принят за главный максимум, так как основной “пик” оказался вне узлов начальной сетки разбиения. Если известно (или предполагается), что в волоконно-оптических линиях связи используются ОВ подобных типов, то рекомендуется сделать более мелким начальный шаг разбиения по частоте.

Для ускорения процесса вычисления бриллюэновского частотного сдвига также можно реализовать адаптивное изменение количества усреднений на каждом шаге сканирования по частоте. Например, на первом этапе (отсчеты 1–5) берется относительно небольшое количество усреднений (например, $2^{10} - 2^{11}$), на следующих этапах величина усреднений увеличивается (например, $2^{12} - 2^{13}$ для отсчетов 6–10), и только на последних шагах (в области предполагаемого максимума спектра рассеяния МБ) число усреднений становится максимальным при заданных условиях (например, $2^{17} - 2^{18}$ для отсчетов 17–25) [11]. В данном случае вместо полного игнорирования потенциально мало полезных отсчетов можно выполнять

измерения и в них, но с существенно меньшим количеством усреднений.

При достаточной мощности сигнала для ускорения процесса вычислений в BOTDR можно в приемном тракте сформировать несколько каналов для параллельной обработки данных, и в этом случае на каждом шаге вычислений в частотную характеристику рассеяния МБ будут добавляться сразу несколько результатов.

В качестве следующего этапа по совершенствованию алгоритмов выявления потенциально ненадежных секций ОВ можно выделить выявление факторов, вызвавших изменение бриллюэновского частотного сдвига, с дальнейшей возможной коррекцией влияния температурных воздействий на графики продольных натяжений ОВ [17, 18].

5. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в этой работе адаптивные алгоритмы более чем на порядок сокращают время определения итоговых характеристик в BOTDR (пространственного распределения спектра рассеяния МБ вдоль световода, бриллюэновского частотного сдвига и степени продольного натяжения ОВ) за счет исключения малозначимых отсчетов из вычислительного процесса.

Частотный диапазон сканирования для построения спектра рассеяния МБ при использовании базы измеренных характеристик рассеяния МБ ОВ различных видов и производителей можно определить достаточно быстро и эффективно.

Поскольку ориентировочное значение максимума спектра рассеяния МБ (и бриллюэновского частотного сдвига) выявляется на начальных этапах процесса обработки, предварительные графики распределения продольного натяжения в ОВ можно получить достаточно быстро.

Повышение скорости измерений в выбранном конкретном ОВ позволит сделать более эффективной работу BOTDR в составе комплексной системы мониторинга физического состояния ОВ волоконно-оптических линий связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bogachkov I.V.* // J. Phys. 2018. V. 1015. P. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/2/022004>
2. *Bogachkov I.V., Gorlov N.I.* // J. Phys. 2022. V. 2182. P. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2182/1/012089>
3. *Bogachkov I.V.* // T-comm. 2019. V. 13. № 1. P. 60.
4. *Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Belokrylov M.E.* // Instrum. Exp. Tech. 2022. V. 65. P. 687. <https://doi.org/10.1134/S0020441222050268>
5. *Nordin N.D., Abdullah F., Zan M.S.D., Bakar A.A., Krivosheev A.I., Barkov F.L., Konstantinov Y.A.* // Sensors. 2022. V. 22. P. 1. <https://doi.org/10.3390/s22072677>
6. *Barkov F.L., Konstantinov Y.A., Krivosheev A.I.* // Fibers. 2020. V. 8 № 9. P. 1. <https://doi.org/10.3390/FIB8090060>
7. *Krivosheev A.I., Konstantinov Y.A., Barkov F.L., Pervadchuk V.P.* // Instrum. Exp. Tech., 2021. V. 64. P. 715. <https://doi.org/10.1134/S0020441221050067>
8. AQ 8603. Optical fiber strain analyzer. Instruction manual AS-62577. Japan. Ando Electric Co Ltd. 2001. P. 190.
9. Viavi MTS/T-BERD 8000. DTSS. Viavi Solutions. 2018. P. 94.
10. *Богачков И.В.* // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 4. С. 178. <https://doi.org/10.25206/2310-9793-7-4-178-184>
11. *Bogachkov I.V.* // T-comm, 2019. V. 13. № 7. P. 60. <https://doi.org/10.24411/2072-8735-2018-10292>
12. *Bogachkov I.V.* // J. Phys. 2020. V. 1441. P. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1441/1/012039>
13. *Ruffin A.B., Li M.-J., Chen X., Kobayakov A., Annunziata F.* // Opt. Lett. 2005. V. 30. P. 3123.
14. *Gorlov N.I., Bogachkov I.V.* An Analysis of the Influence of the Physical Layers Structure of Optical Fibers on the Mandelstam – Brillouin Scattering Characteristics // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO–2020). Proceedings. Kaliningrad. 2020. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166063>
15. *Koyamada Y., Sato S., Nakamura S., Sotobayashi H., Chujo W.* // Lightwave Technol. 2004. V. 22. P. 631.
16. *Sikali Mamdem Y., Pheron X., Taillade F.* Two-dimensional FEM Analysis of Brillouin gain spectra in acoustic guiding and antiguiding single mode optical fibers // COMSOL Conference. Proceedings. Paris. 2010.
17. *Bogachkov I.V.* // T-comm, 2020. V. 14. № 8. P. 47. <https://doi.org/10.36724/2072-8735-2020-14-8-47-52>
18. *Bogachkov I.V., Gorlov N.I.* The Basics of Automated Processing of Optical Fiber Reflectograms for Evaluating Characteristics of the Mandelstam – Brillouin Backscatter // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO–2020). Proceedings. Kaliningrad. 2020. <https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166114>