

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БРИЛЛЮЭНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ для контроля физического уровня пассивных оптических сетей

Н.И.Горлов, д.т.н., проф. Сибирского государственного университета телекоммуникаций
и информатики / gorlovnik@yandex.ru,

А.Б.Семенов, д.т.н., проф. НИУ МГСУ / andre52.55@mail.ru

УДК 654.022, DOI: 10.22184/2070-8963.2023.111.3.40.44

Рассмотрены физические основы методов измерения деформации оптического волокна на основе анализа во временной области рассеяния Манделъштама – Бриллюэна. Показана возможность проведения полноценного бриллюэновского мониторинга волокон, подключенных к отводам сплиттера пассивной оптической сети при условии применения метода концевых отражений. Даны оценки разрешающей способности рефлектометров данной разновидности.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее быстро развивающихся направлений волоконно-оптической связи являются сети доступа, для реализации которых широко применяются технологии группы xPON (от англ. Passive Optical Network). Кроме того, аналогичные им технологические решения начинают активно использоваться для построения внутриобъектовых систем, где они известны под наименованием, в частности, PoLAN [1].

Одним из немногих недостатков пассивных оптических сетей является сложность организации

эффективного резервирования, что определяется применением древовидной топологии [2]. В таких условиях для достижения необходимого для нормальной эксплуатации коэффициента готовности сети необходимо наращивать надежность физического уровня.

Соответственно, прямым следствием имеющегося положения дел становится резкое усиление практической востребованности технических средств объективного контроля состояния отдельных оптических волокон (ОВ). Применение подобной техники открывает перспективы достоверного

прогнозирования нормальной работоспособности как системы в целом, так и отдельных ее частей по меньшей мере в ближайшей и среднесрочной перспективах.

Традиционная оптическая рефлектометрия во временной области, реализуемая OTDR-рефлектометрами, обеспечивает надлежащий уровень контроля только на магистральном участке: от терминала OLT до первого сплиттера. Мониторинг волокон, подключенных к отводам сплиттера, существенно затруднен по двум основным причинам:

- большие потери, вносимые сплиттерами в цепь передачи сигналов и объективно требующие применения OTDR с высоким динамическим диапазоном, что пропорционально ухудшает пространственную разрешающую способность;
- наложение в магистральном ОВ сигналов обратного рассеяния волокон отдельных отводов друг на друга.

Немаловажное значение для построения системы мониторинга приобретает тот факт, что в большинстве сетей PON сплиттер вынесен в линейную часть системы, что требует выезда в место его установки и затрудняет проведение полевого тестирования.

Все эти факторы обуславливают острую необходимость разработки технологии удаленного тестирования волокон физического уровня пассивной сети за пределами сплиттера.

Необходимость оценки механических напряжений волокон и методы их оценки

Реальное волокно в большей или меньшей степени находится в механически напряженном состоянии. Например, оно появляется уже в процессе его вытягивания из заготовки за счет различия тепловых свойств сердцевинки и оболочки и оказывает значимое влияние на длину волны отсечки. Механические напряжения появляются также в процессе изготовления кабеля из-за технологических дефектов, при прокладке и монтаже, под воздействием температурных колебаний и иных факторов. Точная количественная оценка деформаций необходима для прогнозирования ожидаемой наработки на отказ линейной части сетей PON.

Механические напряжения волокон могут быть определены в количественной форме различными способами.

Известен классический метод определения средней деформации по всей длине волокна через измерение его удлинения с использованием фазовой

задержки оптического импульса [3]. Однако интегральный характер метода не позволяет точно оценить точечные очаги деформации, которые имеют определяющее значение для развития механических разрушений.

Задача контроля локальных напряжений в длинных оптических кабелях вполне может быть решена тензометрическими методами. Однако установка большого количества тензодатчиков для их реализации неприемлема из-за высокой стоимости такой системы контроля.

С учетом этих особенностей наиболее подходящими следует считать технологии, основанные на принципах фиксации рассеяния Мандельштама – Бриллюэна. В качестве их дополнительного преимущества можно указать на достаточно широкую область применения: как в процессе производства оптических кабелей, так и для выполнения полевых измерений.

Схема классического бриллюэновского оптического анализа во временной области (BOTDA)

Бриллюэновская оптическая рефлектометрия представляет собой метод оценки напряжений волокна за счет измерения бриллюэновского сдвига ν_B частоты (BFS), которая линейно меняется от изменения температуры или деформации. Сдвиг частоты Бриллюэна появляется в результате неупругого рассеяния фотонов акустическими волнами и составляет

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda_u}, \quad (1)$$

где n – показатель преломления материала сердцевинки;

V_A – скорость акустической волны;

λ_u – длина волны света накачки.

Для кварцевого оптического волокна с показателем преломления $n = 1,45$ при скорости звука $V_A = 5,96$ км/с величина бриллюэновского сдвига ν_B частоты в полосе длин волн 1,55 мкм составляет приблизительно 11,1 ГГц [4], что позволяет уверенно регистрировать ее современной электроникой.

Функции численной меры BFS берет на себя пиковая частота спектра бриллюэновского коэффициента рассеяния (BGS), определяемая с привлечением функции подгонки. Последняя представляет собой один из вариантов аппроксимации реальной частотной характеристики, а обращение к ней позволяет эффективно сгладить характерные для этой характеристики осцилляции большой амплитуды.

Методы измерения по Бриллюэну отслеживают линейное увеличение BFS, которое происходит при повышении температуры [5] или при механическом растяжении волокна [6]. Эта зависимость обусловлена значимым влиянием этих факторов на скорость движения акустической волны вдоль волокна.

Зависимость BFS от температуры и деформации при растяжении, соответственно, по крайней мере в первом приближении линейна и находится как:

$$v_B(t) = v_B(t)[1 + C_t(t - t_T)], \quad (2)$$

$$v_B(\epsilon) = v_B(0)[1 + C_s\epsilon], \quad (3)$$

где t – температура,

t_T – исходная температура,

ϵ – деформация при растяжении.

Масштабные коэффициенты C_t и C_s , задающие влияние изменений температуры и деформации на BFS, составляют 1,10 МГц/°С и 0,0483 МГц/мкε, соответственно, при длине волны 1553,8 нм. Через мкε обозначено относительное удлинение волокна.

Изменения, вызываемые температурой и деформацией, сложно измерить независимо друг от друга. Поэтому вместо пары условий (2) и (3) чаще используется их линейная комбинация вида:

$$\delta v_B(t, \epsilon) = C_t \delta t + C_s \delta \epsilon. \quad (4)$$

В (4) через δt и $\delta \epsilon$ обозначены влияния изменения температуры и деформации, соответственно.

На практике для компенсации изменений температуры или деформации, применяется предварительная калибровка системы на эталонном оптическом волокне или по эталонным данным.

Точность бриллюэновского анализа

Процесс определения бриллюэновского сдвига частоты BFS основан на подгонке к полученным BGS. Форма характеристики BGS хорошо описывается функцией Лоренца с центральной частотой ν_B и шириной спектра на уровне 0,5 относительно максимума $\Delta \nu_B$. В случае обращения к квадратурной схеме построения функции подгонки погрешность измерения BFS может быть определена как [7]:

$$\sigma_{\nu_B}(z) = \frac{1}{\text{SNR}(z)} \sqrt{\frac{3}{4} \delta \cdot \nu_B}, \quad (5)$$

где $\text{SNR}(z)$ – отношение сигнал/шум (SNR) пика BGS в координате z ,

δ – шаг выборки частоты ($\delta \ll \Delta \nu_B$).

Бриллюэновский оптический анализ во временной области (BOTDA) основан на измерении

интенсивности бриллюэновского рассеяния как функции времени. С учетом этой особенности при высоком быстродействии фотоприемника пространственное разрешение соответствует ширине импульса света накачки.

Пространственное разрешение δz находится как [7]:

$$\delta z = \frac{\nu W_u}{2}, \quad (6)$$

где ν – групповая скорость света в оптическом волокне,

W_u – ширина импульса света накачки.

Пространственное разрешение стандартного BOTDA ограничено 1 м. Это связано с тем, что время жизни фонона составляет около 10 нс, в результате чего трудно реализовать ширину импульса накачки менее 1 м.

Для измерения изменения BFS вдоль волокна необходимо получить распределение BGS в виде частотной зависимости коэффициента бриллюэновского рассеяния.

Типовая структурная схема бриллюэновского рефлектометра BOTDA показана на рис.1, взятом из [8].

Выходное излучение лазера разделяется сплиттером для формирования импульсов накачки и зондирующего излучения. Обычно используют импульсную накачку, а непрерывный зондирующий свет запускается с противоположной стороны. Взаимодействие Бриллюэна происходит во время столкновения этих составляющих излучения в тестируемом волокне.

Частота зондирующего света понижается с помощью оптического преобразователя частоты BFS (приблизительно 11 ГГц при длине волны 1,55 мкм). Свет накачки генерируется формирователем импульсов. Его функции может выполнять электрооптический или акустооптический модулятор, а также полупроводниковый оптический усилитель.

Устранения поляризационной зависимости коэффициента рассеяния Бриллюэна достигается включением в оптический тракт передачи накачки или зондирующего света поляризационного скремблера или переключателя поляризации. Рэлеевское рассеяние излучения накачки, которое является ненужным компонентом сигнала, устраняют узкополосным оптическим фильтром. Чаще всего его функции возлагаются на волоконную решетку Брэгга (FBG). Распределение спектра бриллюэновского рассеяния может быть получено с помощью вышеупомянутой измерительной системы.

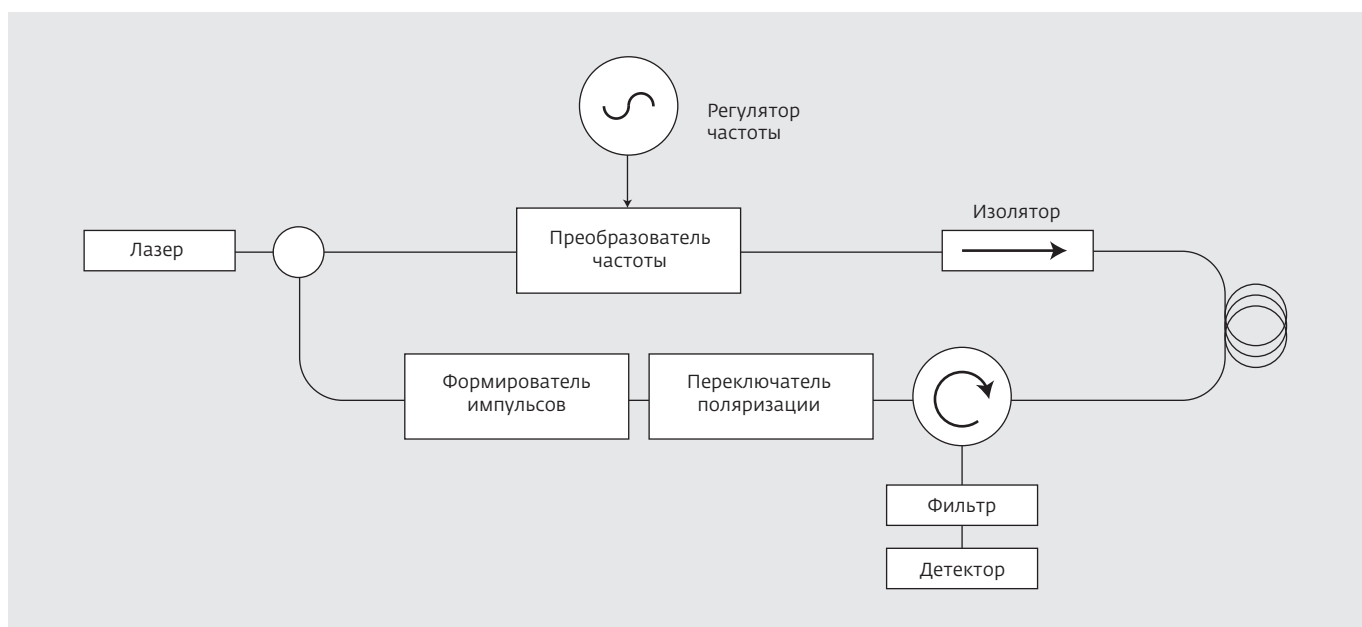


Рис.1. Структурная схема бриллюэновского рефлектометра BOTDA

ПРЕИМУЩЕСТВА БРИЛЛЮЭНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ НА КОНЦЕВЫХ ОТРАЖЕНИЯХ (ERA-BA)

Сильная сторона бриллюэновского анализа на концевых отражениях (ERA-BA) – возможность измерения индивидуальных характеристик отдельных волокон, подключенных к выходам сплиттера без непосредственного подключения к ним рефлектометра [9]. ERA-BA измеряет характеристики таких ОВ за счет столкновения импульсов накачки с зондирующими импульсами, отраженными от дальнего конца волокна.

Данный метод весьма перспективен для реализации систем дистанционного контроля оптических сетей доступа за счет значительного сокращения количества циклов выполнения полевых работ. Данное преимущество достигается за счет возможности измерения непосредственно из точки размещения OLT без необходимости подключения рефлектометра к отводам сплиттера.

Структурная схема рефлектометра ERA-BA представлена на рис.2 [10].

Для обеспечения столкновения тестовых импульсов в волокнах, подключаемых к отводам сплиттера, необходим оптический режекторный фильтр, который:

- включается на выходе волокна отвода в точке подключения ONU/ONT;
- настроен на длину волны тестового сигнала;

- отражает пробный импульс обратно в контролируемое волокно.

Импульс накачки подается в магистральное ОВ с временной задержкой Δt относительно зондирующего импульса. Значение задержки подбирается таким образом, чтобы обеспечить столкновения сигналов на расстоянии $v\Delta t/2$ от дальнего конца.

Исследование волокна отвода на всем его протяжении достигается последовательным изменением Δt .

Селекция отдельных волокон, подключаемых к выходам сплиттера, обеспечивается фильтром FBC или фильтром полного отражения. Последний целенаправленно рассчитан на конкретно взятую длину волны зондирующего сигнала.

Дополнительно для решения задачи селекции может привлекаться тот факт, что разница во времени обратного хода зондирующих импульсов, отраженных от дальнего конца ОВ отвода и определяемая их различной длиной, используется для определения сигналов от разветвленного волокна. Чтобы идентифицировать разветвленные волокна, потребуется, по крайней мере, разница в длине разветвления δL , выраженная как:

$$\delta L = \frac{vW_r}{2}, \quad (7)$$

где W_r – длительность зондирующего импульса.

Обычно δL называют разрешением идентификации ветви.

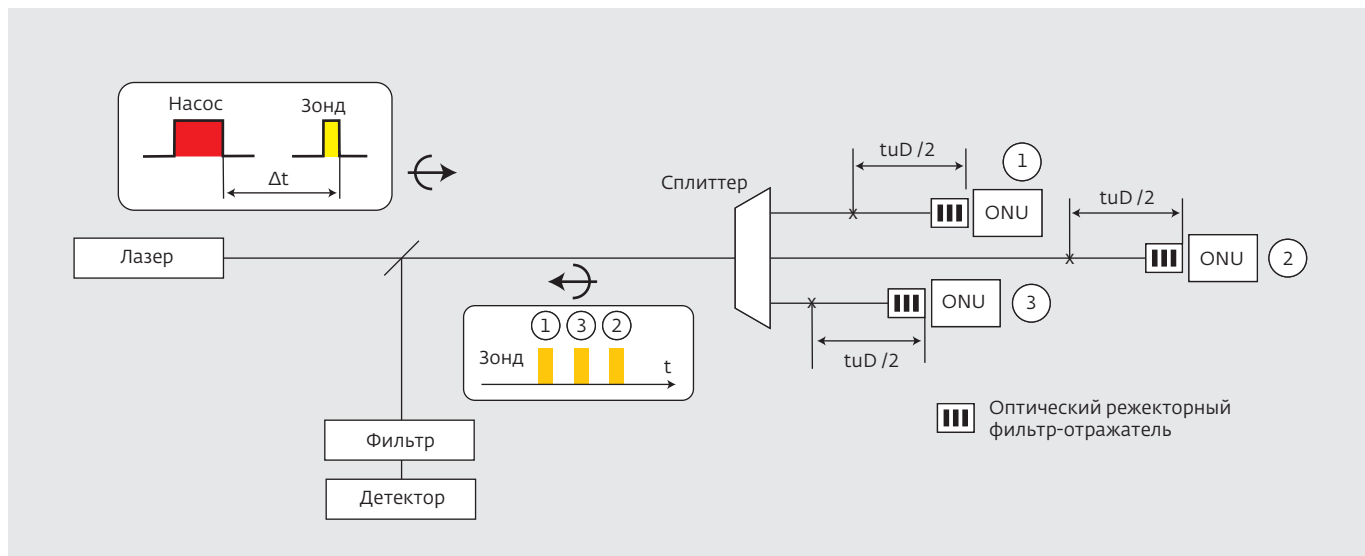


Рис.2. Структурная схема ERA-BA

Для телекоммуникационных сетей, длины некоторых волокон отводов которых близки друг к другу, значение параметра разрешения должно быть по меньшей мере не ниже указанного значения.

Для надежной селекции ОВ отводов разность их длин может быть установлена на любое наперед заданное значение с помощью дополнительного волокна задержки. Пространственное разрешение задается уравнением (7) с использованием ширины импульса накачки, как в обычном BOTDA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение бриллюэновской рефлектометрии на концевых отражениях расширяет возможности дистанционного неразрушающего мониторинга физического уровня пассивных оптических сетей доступа. Наличие развитых механизмов селекции волокон отдельных отводов облегчает построение автоматизированных систем контроля, использующих рефлектометрию на концевых отражениях.

С учетом высокой стоимости тестирующего оборудования, определяемой малой величиной коэффициента бриллюэновского рассеяния, практическая реализация рефлектометрического метода на концевых отражениях целесообразна только в крупных сетях при условии работы рефлектометра в групповом режиме и его подключении к объекту тестирования через оптический коммутатор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевелев С., Семенов А. Технология PoLAN как новый формат нижнего уровня информацион-

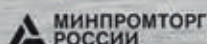
ных систем офисных зданий. ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2021. № 2 (94). С. 28–33.

2. Позяева З., Семенов А. Увеличение надежности систем оптической связи // Журнал сетевых решений LAN. 2011. № 12. С. 54–58.
3. Tateda M., Tanaka S., Sugawara Y. Thermal characteristics of phase shift in jacketed optical fibers // Applied Optics. 1980. Vol. 5. No. 19. PP. 770–773.
4. Агравал Г.П. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 323 с.
5. Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M. Thermal effects on Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers // Appl. Opt. 1990. Vol. 29. No. 15. PP. 2219–2222.
6. Horiguchi T., Kurashima T., Tateda M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers // IEEE Photon. Tech. Lett. 1989. Vol. 1. No. 5. PP. 107–108.
7. Soto M., Thévenaz L. Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors // Opt. Express. 2013. Vol. 21. No. 25. PP. 31347–31366.
8. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАР-АРТ, 2005. 208 с.
9. Ito F., Takahashi H., Toge K., Kito C. End reflection assisted Brillouin measurement for PON monitoring // OECC 2013. Paper MS2-1.
10. Takahashi H., Ito F., Kito C., Toge K. Individual loss distribution measurement in 32-branched PON using pulsed pump-probe Brillouin analysis // Opt. Express. 2013. Vol.21. No. 6. PP. 6739–6748.



МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВОЕННО-МОРСКОЙ САЛОН-2023

Организатор



Выставочный
оператор



МКВ

При поддержке



21–25 июня

Кронштадт
Конгрессно-выставочный центр
Музея военно-морской славы

FLEET-EXPO.RU