НЕКОТОРЫЕ АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ рефлектометрии при измерениях ОВ

А.Микилев, к.т.н., директор по маркетингу
российского филиала компании OFS

УДК 621.315.21, DOI: 10.22184/2070-8963.2017.69.8.36.41

Рассмотрены вопросы обеспечения точности и достоверности оценки затухания оптических волокон рефлектометрами, указаны типичные причины систематической и случайной погрешности при реальной практике измерений. Обозначены факторы и условия, при соблюдении которых среднеквадратичная ошибка измерений может быть в пределах $\pm 0,001$ дБ/км.

ВВЕДЕНИЕ

Оптические рефлектометры (OTDR – Optical Time Domain Reflectometer) – это приборы, наиболее часто используемые для контроля коэффициента затухания, а также "оптической длины" волокон (ОВ) в оптических кабелях (ОК), для идентификации различного рода "событий" и неоднородностей ВОЛС, сварных соединений ОВ и т.д. Хотя оптическая рефлектометрия насчитывает уже более 40 лет развития [1] и хорошо известна специалистам телекоммуникаций, при знакомстве с реальной практикой измерений обычно выявляется множество типичных (а иногда и нетипичных) "вопросов". Предварительно отметим, что их основной причиной является то, что оптическая рефлектометрия не является прямым измерением. Окончательный результат, получаемый с помощью "обычного" оптического рефлектометра (не говоря уже о более сложных и "интеллектуальных" – бриллиантовых, когерентных и прочих), выдается прибором в готовом виде после скрытых от пользователя преобразований и вычислений. При этом следует иметь в виду, что типичная мощность обрабатываемого

сигнала обратного рассеяния примерно в миллион раз меньше мощности исходного сигнала (зондирующего импульса, вводимого в ОВ).

ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В данной статье не будем останавливаться на подробностях работы и устройства OTDR. Они описаны в многочисленных источниках, например, в [2]. Однако все же выделим основные исходные положения:

- оптический рефлектометр – это измерительный прибор, принцип работы которого основан на послыке периодической последовательности оптических импульсов (обычно от полупроводникового лазера), приеме и анализе рассеянного "назад" оптического излучения (back scattering) [1] с той же стороны ОВ, откуда вводится зондирующий импульс;
- объект измерений – одномодовые и многомодовые волокна (G.652, G.655 и т.п.) в оптических кабелях (ОК) и проч.;
- оптическая длина волны обычно составляет 1550 нм и/или 1310 нм; также могут быть

номиналы 1625, 1650, 850 нм (последняя – для многомодовых ОВ) и др. В данной статье нас будет, в основном, интересовать диапазон длин волн около 1550 нм, в котором затухание ОВ близко к минимуму (минимальное значение обычно отмечается на длине около 1570 нм);

- длина измеряемого участка чаще всего находится в пределах 1–100 км, но могут быть задачи измерений длин ОВ/ОК короче 1 км или более 100 км;
- диапазон длительности зондирующего импульса обычно составляет 10–10 000 нс; для измерений, результаты которых описаны ниже, использовались длительности 100–200 нс.

АКТУАЛЬНЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ OTDR

В условиях типичного дефицита времени при современном производстве ОК, а также при массовом строительстве ВОЛС нередки ситуации, когда требование точности и достоверности измерений вступает в противоречие со сжатыми сроками сдачи продукции или объекта строительства. Однако, если с помощью оптического рефлектометра необходимо получить не качественный ("годен – не годен"), а количественный и при этом воспроизводимый результат измерений (например, коэффициент затухания с погрешностью на уровне $\pm 0,001$ дБ/км), то необходимо принять во внимание достаточно очевидный факт: погрешность измерений зависит как от характеристик прибора, так и свойств и состояния объекта измерений (волокно, ОК, участок трассы и т.д.). Чрезмерная автоматизация и "навороченность" интерфейсов некоторых OTDR с их пресловутой "гибкостью" не помогают, а чаще всего мешают быстро решить конкретную задачу.

Одна из главных задач здесь видится в том, чтобы приблизиться к упомянутой точности измерения рефлектометром – $\pm 0,001$ дБ/км при длине ОВ около 4 км (о чем подробнее см. далее) и разумном времени усреднения (не более 10 с), необходимом для однократного измерения одного волокна. Конечно, с осознанием того, что для повышения точности в общем случае требуется увеличивать время измерений. Для практики сегодня наиболее интересен DWDM-интервал длин волн 1550 ± 50 нм, в котором стандартное телекоммуникационное ОВ из кварцевого стекла имеет наименьшее затухание. Как правило, это значение не превышает 0,195 дБ/км. Актуальность данной задачи повышается в связи с необходимостью более точно измерять коэффициент затухания

волокон последних разработок – с пониженным (LL, Low Loss) – до 0,18 дБ/км – и сверхнизким (ULL, Ultralow Loss) – 0,15–0,17 дБ/км – затуханием [5].

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКИМ РЕФЛЕКТОМЕТРОМ

Опыт работы с типовыми коммерческими ОВ/ОК (включая LL/ULL) и "обычными" рефлектометрами выявляет ряд параметров и факторов, влияющих на точность измерений коэффициента затухания. Среди них отметим следующие:

- тип и собственно характеристики исследуемого оптического волокна;
- факторы окружающей среды, потенциально влияющие на точность измерений (температура, возможные вибрации, механические воздействия на кабель (актуально для подвесных ОВ) и т.д.). Сюда же можно отнести процессы старения ОВ в процессе эксплуатации;
- длина кабеля, участка трассы и т.д.;
- спектрально-мощностные и прочие характеристики лазера рефлектометра;
- физические параметры фотоприемника, электронной схемы и т.д.;
- качество оптики, в частности, поляризационно-независимые свойства;
- алгоритмы и другие особенности вычислительно-преобразовательной части прибора;
- методические факторы и приемы (предустановленные параметры, дополнительные приспособления и проч.).

Анализируя приведенный перечень, несложно сделать заключение, что имея конкретное волокно (ОК и прочее) в качестве объекта измерений, с конкретным рефлектометром остается не так уж много возможностей что-то усовершенствовать в методике для получения большей точности, не увеличивая время измерений. Можно предположить, что при выборе рефлектометра с большим динамическим диапазоном, то есть, попросту говоря, с более мощным (и стабильным) лазером (что ведет к увеличению цены прибора) мы улучшим как минимум "дальность" и, возможно, уменьшим погрешность за счет лучшего соотношения сигнал/шум. Однако, при этом имеется еще одна, пока не исследованная (насколько известно автору) опасность столкнуться в самом начале исследуемого участка ОВ, помимо отражений от входного соединителя и известного влияния "мертвой зоны", с нелинейными эффектами и, как следствие, с дополнительной погрешностью по этой причине.

НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Опуская ряд методических подробностей и деталей, перейдем к анализу результатов ряда измерений, выполненных автором с помощью типовых промышленных оптических рефлектометров (использовались приборы Photon Kinetics, Anritsu и др.). В качестве объекта измерений привлекалось типовое одномодовое волокно G.652.D. Результаты показывают, что характерная погрешность измерений находилась в пределах, указанных в таблице.

Приведенный в таблице перечень причин погрешностей, скорее всего, неполон. Анализируя эти данные, отметим, по крайней мере, основные причины систематической погрешности – п.1 и 2 (возможно, 4), и случайные погрешности – п. 3. "Статус" остальных (п.5 и 6), пока неизвестен, но предположительно эти погрешности составляют не более 0,001 дБ/км при длинах измеряемого ОВ от 4 км. Для специалистов-практиков в связи с этим может быть интересно обратить внимание на следующее:

- производители оптических рефлектометров обычно не слишком озабочены задачей приближения длины волны конкретного прибора к номинальной длине волны данного диапазона (в первую очередь это критично для номинала 1550 нм) и позволяют себе достаточно широкие рамки спецификации – как пример, 1550 ± 25 нм. Кроме

того, используемые в рефлектометрах лазеры излучают не в узком спектре, а обычно в полосе шириной порядка 10 нм, причем с ненормированной и случайной формой спектра. Все это с учетом типичной спектральной зависимости затухания ОВ от длины волны приводит к систематической погрешности измерения затухания. На рис.1 показано, что отличие фактической длины волны от номинальной у разных рефлектометров дает ошибку до 0,002 дБ/км, а иногда и более;

- установлено [3], что при разной длительности зондирующего импульса показания рефлектометра (на одном и том же волокне), заметно подвержены еще одной систематической ошибке. Не вдаваясь в подробности, отметим, что физическая причина данного явления – зависимость длины волны излучения лазера от его рабочей температуры, зависящей, в свою очередь, от длительности устанавливаемого импульса. В остальном же "математика" этой погрешности подобна представленной на графике рис.1 и приводит к систематической ошибке до 0,003–0,004 дБ/км для некоторых конкретных экземпляров рефлектометров;
- иногда существенным источником случайной погрешности является зависимость показаний от поляризации выходного излучения лазера. Лазерное излучение в волокне всегда

Таблица. Типовые пределы погрешностей измерений затухания оптическим рефлектометром (длина волны 1550 нм, волокно G.652.D)

№ п.п.	Причина погрешности	Типичная погрешность (СКО), дБ/км, ±	Примечания
1	Неточность длины волны OTDR (напр., 1550 ± 25 нм, форма спектра лазера)	$\leq 0,03$	Систематическая ошибка. Измеряемая длина 1–100 км
2	Зависимость длины волны лазера от длительности импульса (обычно в пределах 10–10000 нс)	$\leq 0,004$	Систематическая ошибка. Измеряемая длина 1–100 км
3	Зависимость коэффициента деления направленного ответвителя OTDR от поляризации	$\leq 0,05$	Случайная ошибка. Зависит от длины измеряемого участка ОВ. Погрешность дана для длины 1 км
4	Неточность установки т.н. "показателя преломления", т.е. группового индекса (зависит от типа ОВ и изготовителя)	$\leq 0,001$	Для дальнейшего исследования
5	Влияние отражений и других "событий" трассы при рефлектометрии исследуемого волокна (кабеля)	Нет данных	Для дальнейшего исследования
6	Нелинейные эффекты, напр., повышенное рассеяние в начале участка ОВ при большой вводимой мощности	Нет данных	Для дальнейшего исследования

Рис.1. С учетом типичной зависимости затухания ОВ от длины волны систематическая ошибка рефлектометра может превышать 0,002 дБ/км вследствие отклонения фактической длины волны конкретного рефлектометра (здесь около 1570 нм) от номинала 1550 нм

поляризовано случайным образом, а один из ключевых элементов рефлектометра – направленный ответвитель, чаще всего имеет некоторую остаточную зависимость коэффициента передачи от поляризации. Это приводит к тому, что возвращаемый в фотоприемник прибора сигнал оказывается "немного амплитудно-модулированным" [2, 3]. Степень этой поляризационной зависимости, а, следовательно, и вклад в случайную погрешность зависит от "качества исполнения" рефлектометра, в смысле зависимости от поляризации. При прочих равных условиях этот вид погрешности возрастает с уменьшением длины исследуемого ОВ, и для конкретных экземпляров приборов может достигать даже 0,05 дБ/км при

длине волокна 1 км (что часто наблюдалось автором). Один из способов снижения данной погрешности – так называемое "поляризационное скремблирование" – принудительное случайное изменение поляризации сигнала во время измерений путем легкой деформации оператором соединительного кабеля на входе рефлектометра во время измерения [2]. А продвинутые и качественные рефлектометры, по-видимому, могут (должны) иметь уже встроенный "скремблер", значительно снижающий данную погрешность [3].

Что касается остальных пунктов (4–6), приведенных в таблице, то они требуют дальнейшего исследования. Их значимость и вклад в общую систематическую и/или случайную погрешность

Рис. 2. Зависимость СКО коэффициента затухания как функция длины ВО для разных рефлектометров. Длина волны – 1550 нм, длительность импульса – 100 нс, включен режим обработки LSA (МНК). Объект измерений – волокно AllWave One, номинальное затухание 0,18 дБ/км

пока что являются неизвестными величинами. По-видимому, эти величины на порядок меньше тех, что указаны в пп. 1–3 таблицы.

"Функция погрешности", зависящая от длины волокна

Исходя из математического определения коэффициента затухания волокна в дБ/км, а также из самых общих соображений, интуитивно понятно, что погрешность измерений будет очень велика как при малой (близкой к нулю), так и при слишком большой (теоретически близкой к бесконечности) длине измеряемого ВО. Практические рамки интересующих нас физических длин волокна обычно ограничиваются интервалом от 1 до 100 км (конечно, на необъятных просторах России могут встретиться и участки до 200 км, однако это уже несколько иная задача). В производстве ОК наиболее "популярной" является так называемая "строительная длина", то есть длина кабеля на барабане, близкая к 4 км (возможны и другие номиналы).

Предполагая, что систематические погрешности, перечисленные до этого, каким-то образом учтены и/или устранены, и, имея целью создать некоторую основу для дальнейшей стандартизации и унификации методик измерений затухания, представляется интересным исследовать зависимость случайной ошибки (для определенности:

среднеквадратичной ошибки – СКО) от физической длины исследуемого волокна. При этом логично было бы предположить, что существует некая оптимальная длина ВО, при которой СКО будет минимальной (при прочих одинаковых условиях).

Проведенные предварительные исследования [6] показывают, что это, похоже, действительно так. На рис. 2 представлена полученная автором зависимость СКО от длины волокна для трех различных рефлектометров. Объектом измерений было одномодовое волокно типа AllWave One (G.652.D / G.657.A1). Для волокон данного класса как раз достаточно критичным является правильная "квалификация" по затуханию, то есть отнесение его либо к классу LL с пониженным до 0,18 дБ/км затуханием, либо к "обычному" ВО [5]. В случае величины затухания 0,183 дБ/км ошибка измерений, заметно большая, чем $\pm 0,002$ дБ/км, была бы уже, очевидно, неприемлемой, так как с вероятностью 50% мы имеем при округлении до второго знака после запятой: $(0,183 + 0,002) \approx 0,18$, но $(0,183 + 0,003) \approx 0,19$.

Полученная "функция погрешности" для трех разных рефлектометров приведена на рис. 2. Систематические погрешности учтены до этого, на графиках представлена только СКО.

Анализируя графики рис. 2, можно сделать следующие выводы:

- существует некоторая оптимальная длина, близкая к 10 км, при которой СКО, а, следовательно, и общая погрешность измерений затухания ВО минимальна;
- при длинах менее 1 км СКО превышает 0,001 дБ/км, при длинах 100 м она становится порядка 0,01 дБ/км, что неприемлемо много для целого ряда задач;
- исследованные рефлектометры заметно различаются по своим возможностям, демонстрируя при одинаковых прочих условиях заметно разные СКО;
- по-видимому, в лабораторных условиях можно добиться величины СКО около 0,0001 дБ/км, а, следовательно, и надеяться на усовершенствование методик заводских и полевых измерений и характерной погрешности измерений порядка хотя бы 0,001 дБ/км при соблюдении определенного перечня условий (в данной статье для краткости изложения некоторые методические подробности опущены).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что в "классической" оптической рефлектометрии, при ее сегодняшней доступности и относительной простоте,

имеется еще достаточно много неисследованных моментов и "белых пятен", мало известных, во всяком случае, для специалистов-практиков. Практические же задачи повышения эффективности производства ОВ и кабелей, снижение сроков и уменьшение затрат на строительство ВОЛС связаны с необходимостью совершенствования методик измерений (в первую очередь рефлектометрических) и устранения разного рода неопределенностей и неоднозначностей.

В данной работе сделана попытка обратить внимание на "надежность" и достоверность измерения коэффициента затухания типовыми оптическими рефлектометрами и в будущем приблизиться к характерной погрешности (и общей точности с учетом систематических ошибок) порядка $\pm 0,001$ дБ/км для ОВ/ОК длинами около 4 км. В случае необходимости измерений с малой погрешностью затухания еще более коротких длин (менее 1 км) могут потребоваться дальнейшие исследования. При современном уровне методик и параметрах типовых приборов это (точность измерений $\pm 0,001$ дБ/км) пока что представляется трудно достижимой задачей – реальная точность измерения затухания "километровых" длин обычно порядка 0,01 дБ/км, а иногда и хуже.

Необходимо отметить, что здесь возникает также задача наличия, доступности и собственно

физических характеристик эталонов затухания ОВ. Но это уже другая, весьма обширная тема [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Barnoski M.K., Jensen S.M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics // Applied Optics. 1976. Vol. 15. P. 2112–2115.
2. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРТ, 2005.
3. Белянко Е.В., Бобров В.И., Гринштейн М.Л., Зюзин М.С. Повышение точности измерения коэффициента затухания ОВ оптическим рефлектометром // Фотон-экспресс. 2016. № 6. С. 26–27.
4. Иванов В.С., Кравцов В.Е., Крутиков В.Н., Тихомиров С.В. Метрология волоконно-оптических систем: особенности, история развития, современное состояние // Фотон-экспресс. 2015. № 5. С. 24.
5. Микилев А. Оптические волокна стандартной группы: эволюция и перспективы // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2015. № 6. С. 34–39.
6. Микилев А.И. Некоторые задачи классической ОТДР-рефлектометрии при измерении коэффициента затухания одномодовых ОВ/ОК // В кн.: Тезисы докладов Всероссийской конференции по волоконной оптике, г. Пермь, 3–6 октября 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"

Цена 1090 руб.

DWDM-СИСТЕМЫ

Третье издание

В.Н.Листвин, В.Н.Трещиков

Рассмотрены принципы построения волоконно-оптических сетей передачи данных. Наибольшее внимание уделено технологии мультиплексирования каналов по длинам волн (DWDM). Многие рассматриваемые в книге вопросы до сих пор освещались лишь в специальных журналах. Ясный и понятный язык, большое количество иллюстраций и численных примеров делают ее полезной не только для опытных специалистов, но и для студентов, начинающих знакомиться с этой технологией.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2017. – 352 с.,
ISBN 978-5-94836-488-9

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; ☎ +7 (495) 956-3346; knigi@technosphere.ru, sales@technosphere.ru