

Мониторинг и методы ранней диагностики повреждений оптических волокон

Н. И. Горлов

В статье анализируются задачи мониторинга разветвлённых волоконно-оптических сетей, принципы технической реализации систем контроля оптических волокон, алгоритмы обработки импульсно-рефлектометрической информации, а также рассматриваются методы ранней диагностики повреждений оптических волокон, основанные на использовании эффектов бриллюэновского рассеяния, и принципы технической реализации анализаторов натяжения/потери.

1. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), высокая конкуренция операторов связи и высокая стоимость передаваемых по линиям связи информационных ресурсов выдвигают на ведущие позиции задачу централизованного контроля состояния разветвлённых волоконно-оптических сетей с целью её документирования, своевременного обнаружения и скорейшего устранения повреждений, возникающих в ВОЛП.

Независимо от метода контроля оптических волокон системы мониторинга должны обеспечивать:

- дистанционный контроль пассивных и активных волокон оптических кабелей;
- точное и своевременное документирование и составление отчётности;
- автоматическое обнаружение неисправностей с указанием их точного местоположения;
- контроль и управление процессом оповещения о повреждении оптических кабелей;
- проведение измерений параметров оптических волокон в ручном режиме;
- прогнозирование изменений параметров оптических кабелей;
- возможность расширения функциональности системы при внедрении новых технологий передачи на сети связи.

Наиболее эффективно перечисленные задачи могут быть решены с помощью систем автоматического мониторинга ВОЛП, включающих систему удалённого контроля оптических волокон, программу привязки топологии сети к электронной географической карте местности, а также базы данных оптических компонентов, критериев и результатов контроля. Дистанционный контроль оптических волокон выполняется оптическим импульсным рефлектомет-

ром, диагностирующим состояние волокна по обратному рассеянию световой волны при введении в волокно зондирующих импульсов. При этом системы должны позволять проводить мониторинг как свободных, так и занятых волокон. В первом случае выполняется мониторинг свободных резервных оптических волокон, по состоянию которых судят об исправности всего волоконно-оптического кабеля. Во втором случае проводится мониторинг оптических волокон, по которым передаётся трафик систем передачи. Для реализации данного метода тестирования используется рабочая длина волны рефлектометра, отличная от рабочей длины волны систем передачи, а в схему сети мониторинга вводится ряд пассивных оптических компонентов для мультиплексирования и разделения информационных сигналов и сигналов рефлектометра.

Для обеспечения долговечной работы необходимы соответствующие условия и главное из них – отсутствие механических напряжений в волокне. Повышенное натяжение волокна в кабеле вызывает деградацию его прочностных характеристик, что в конце концов приводит к разрыву волокна. Даже незначительное натяжение волокна может привести к многократному уменьшению его срока службы. Поэтому надёжность волоконно-оптических линий связи невозможно оценить, не имея достоверной информации о натяжении волокна в кабеле.

Обычные оптические рефлектометры не в состоянии определить натяжение волокна, поскольку величина оптических потерь при возникновении напряжений в волокне, как правило, остаётся в пределах нормы вплоть до момента наступления необратимых изменений в волокне. Для решения этой задачи были разработаны бриллюэновские рефлектометры (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer), которые не только измеряют оптические свойства, но и на их основе позволяют прогнозировать обрыв волокна.

2. Принципы построения систем мониторинга

Автоматизированные системы мониторинга, как правило, состоят из [1]:

- системы удалённого контроля оптических волокон (Remote Fiber Test System – RFTS);

- программы привязки топологии сети к географической карте местности;
- базы данных оптических компонентов, критериев и результатов контроля.

Ядром всей системы является RFTS, в ней сосредоточены аппаратные средства. Остальные составные компоненты системы – это программные средства ввода, хранения, обработки и отображения полученных данных.

Дистанционный контроль оптических волокон выполняется оптическим импульсным рефлектометром, диагностирующим состояние волокна по обратному рассеянию световой волны при введении в волокно зондирующих импульсов. При этом система позволяет производить мониторинг как свободных, так и занятых волокон.

Основу архитектуры системы RFTS в общем случае составляют следующие функциональные элементы:

- удалённый модуль тестирования оптических волокон (Remote Test Unit – RTU);
- модуль доступа для тестирования оптических волокон (Optical Test Access Unit – OTAU) или оптический коммутатор;
- устройство управления системой мониторинга ВОК (Test System Control – TSC) на базе персонального компьютера, соответствующего программного обеспечения, а также оборудования, обеспечивающего связь между компонентами системы.

К дополнительным элементам системы можно отнести пассивные оптические компоненты (оптические мультиплексоры WDM, оптические фильтры), вводимые в сеть мониторинга при активном тестировании, а также средства документирования (принтер), отображения и передачи приёма аварийных сообщений (колонки для ЗВУКОВОЙ сигнализации, факс, пейджер).

Удалённый модуль тестирования RTU представляет собой корзину, монтируемую в стойку 19" и или 2,3" (в зависимости от производителя), в состав которой входят:

- один или два оптических модуля рефлектометра;
- набор интерфейсных плат для обеспечения связи между компонентами системы;
- плата компьютера для хранения и обработки данных в процессе мониторинга и другие функциональные компоненты;
- устройство управления системой мониторинга ВОК (Test System Control – TSC) на базе персонального компьютера, соответствующего программного обеспечения, а также оборудования, обеспечивающего связь между компонентами системы.

Все системы RFTS, как правило, строятся по одной и той же схеме. При этом выделяют следующие функциональные элементы и устройства [2]:

- аппаратную часть;
 - систему управления;
 - а также интегрированные элементы:
 - геоинформационную систему (ГИС) привязки топологии сети к карте местности;
 - базы данных ОК, оборудования сети, критериев и результатов тестирования ОК ВОЛП и сети в целом, и другие внешние базы данных.
- Аппаратная часть включает:
- блоки дистанционного тестирования волокон RTU (Remote Test Unit), в которые могут устанавливаться

модули оптических рефлектометров OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), модули доступа для тестирования волокон OTAU (Optical Test Access Unit) – оптические коммутаторы и другие модули;

- центральный блок управления TSC (Test System Control) системой RFTS – центральный сервер;
- станции контроля сети ONT (Optical Network Terminal).

Автоматизированные системы непрерывного мониторинга ОК сетей связи выпускаются рядом зарубежных компаний. В настоящее время на российском рынке представлены четыре системы RFTS, выпускаемые ведущими мировыми производителями подобного оборудования:

- AccessFiber (компания Agilent Technologies, бывшая Hewlett-Packard, HP);
- Atlas (компания Wavetek Wandel&Goltermann);
- FiberVisor (компания EXFO);
- Orion (компания GN Nettest).

Известны также системы RFTS SmartLGX (Lucent Technologies), OCN-MS (Nicotra Sistemi) и некоторые другие, но они слабо представлены на отечественном рынке.

Окончательный выбор той или иной системы должен производиться с учётом стоимости конкретной системы мониторинга ОК для всей планируемой сети и с учётом её дальнейшего развития.

3. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА

Уравнение мощности световой волны на входе оптического рефлектометра имеет вид:

$$P(t) = 0.5P_0\Delta t S\alpha_d V_z \exp(-\alpha V_z t), \quad (1)$$

или, выразив через расстояние:

$$P(x) = 0.5P_0\Delta t S\alpha_d V_z \exp(-2\alpha x), \quad (2)$$

где: P_0 и Δt – соответственно, значение мощности и длительности импульса оптического излучения на входе волокна;

S – параметр рассеяния оптического волокна;

$\alpha = \alpha' + \alpha'' = \alpha_d$ – коэффициент, учитывающий затухание световой волны;

V_z – групповая скорость распространения излучения по оптическому волокну.

Из этих уравнений следует, что мощность обратно рассеянной световой волны прямо пропорциональна мощности на входе оптического волокна, длительности импульса оптического излучения и параметрам и оптического волокна, а также зависит от показательной функции, пропорциональной затуханию и групповой скорости.

Если коэффициент затухания и коэффициент обратно рассеяния остаются постоянными по всей длине световода, то кривая убывает от начала световода экспоненциально. Из-за скачка показателя преломления в начале и конце световода относительно большая часть световой мощности рассеивается обратно в этих местах, что обуславливает наличие пиков в начале и конце кривой. По разности времени Δt между этими двумя пиками, скорости света в вакууме c_0 и групповому показателю преломления

$n_g \approx 1,5$ в стекле сердцевины можно рассчитать расстояние до места повреждения волоконного световода:

$$L = \frac{\Delta t \cdot c_0}{2 \cdot n_g}, \quad (3)$$

где: L – длина волоконного световода, км;

Δt – разность времени между пиками начального и конечного импульсов, с;

n_g – действительный групповой показатель преломления стекла сердцевины;

c_0 – скорость света в вакууме 300 000 км/с.

Коэффициент затухания α для любого участка световода между точками L_1 и L_2 подсчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{5}{L_2 - L_1} \lg \frac{P(L_2)}{P(L_1)}, \text{ [дБ/км]}. \quad (4)$$

Вследствие того что свет проходит вперёд и назад, здесь используется коэффициент 5 вместо коэффициента 10, используемого в аналогичном уравнении для метода светопропускания. Эта формула справедлива для случая, когда мощности $P(L_1)$ и $P(L_2)$ выражены в абсолютных единицах, то есть в мВт или мкВт.

Дальнейшим усовершенствованием методики измерения является калибровка вертикальной шкалы непосредственно в единицах вносимых потерь. При этом затухание α для любого участка между точками L_1 и L_2 подсчитывается по формуле:

$$\alpha_{\text{общ}} = \alpha(L_2) - \alpha(L_1), \text{ [дБ]}. \quad (5)$$

В целях уменьшения влияния собственных шумов на погрешность измерения затухания в современных рефлектометрах эффективно используются алгоритмы аппроксимации фрагментов рефлектограммы линейной (регрессионной) зависимостью по методу наименьших квадратов:

$$Y = a + bx. \quad (6)$$

Параметры аппроксимации a и b чаще всего определяются методом наименьших квадратов (LSA), то есть с использованием математического аппарата регрессионного анализа. При этом:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \hat{Y}_i \sum_{i=1}^n (\hat{X}_i)^2 - \sum_{i=1}^n \hat{X}_i \sum_{i=1}^n \hat{X}_i \hat{Y}_i}{n \sum_{i=1}^n (\hat{X}_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \hat{X}_i)^2}, \quad (7)$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n \hat{X}_i \hat{Y}_i - \sum_{i=1}^n \hat{X}_i \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n \sum_{i=1}^n (\hat{X}_i)^2 - (\sum_{i=1}^n \hat{X}_i)^2}, \quad (8)$$

где: $\hat{X}_i$ – оценка математических ожиданий измеряемых координат L_i ;

$\hat{Y}_i$ – оценка математических ожиданий измеряемых значений потерь в координатах L_i ;

n – количество отсчётов на участке аппроксимации.

4. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ МЕТОДА РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ

Известно, что при распространении излучения вдоль оптического волокна оно рассеивается на оптических неоднородностях. Это рассеяние называется рэлеевским. На этом явлении основан принцип действия обычных рефлектометров, нашедших широкое применение.

Другой вид неоднородностей, имеющих в волокне, обусловлен тепловыми колебаниями атомов. Так, подобно инфракрасному тепловому электромагнитному излучению, в стекле всегда присутствуют гиперзвуковые волны. Рассеяние света на вызванных этими волнами подвижных неоднородностях показателя преломления и называется бриллюэновским рассеянием. Главным отличием бриллюэновского рассеяния от рэлеевского является то, что вызывающие его неоднородности движутся. В этом случае вследствие эффекта Доплера оптическая частота рассеянного сигнала будет отличаться от частоты лазера и, как следствие, от частоты рэлеевского рассеяния. Более того, бриллюэновский сдвиг частот пропорционален скорости звука и зависит от натяжения волокна, подобно тому, как натяжение струны меняет её тон.

Бриллюэновский рассеянный свет появляется в результате взаимодействия между высококогерентным падающим светом и звуковой волной, вызываемой падающим светом в оптоволокне. Частота рассеянного света сдвинута относительно частоты падающего света на величину, определяемую материалом.

Эта частота называется сдвигом бриллюэновской частоты и рассчитывается по следующему соотношению:

$$\nu_B = 2nV_A / \lambda, \quad (9)$$

где: ν_B – сдвиг бриллюэновской частоты;

n – коэффициент преломления;

V_A – скорость акустической волны;

λ – длина волны падающего света.

Обычно бриллюэновская частота сдвинута на ± 13 ГГц (1.3 мкм диапазон), ± 11 ГГц (1.55 мкм диапазон).

Пульсирующий свет подаётся через конец измеряемого оптоволокна, и отражённый свет (бриллюэновское и рэлеевское рассеяние) определяется с помощью схемы когерентного обнаружения. В рассеянии Бриллюэна частота сдвигается относительно входного импульса на величину сдвига бриллюэновской частоты ν_B . Связь между сдвигом бриллюэновской частоты ($\nu_B(\varepsilon)$) и деформацией растяжения в оптоволокне показана в нижеприведённой формуле:

$$\nu_B(\varepsilon) = \nu_B(0)(1 + C\varepsilon), \quad (10)$$

где: $\nu_B(\varepsilon)$ – сдвиг бриллюэновской частоты с натяжением;

$\nu_B(0)$ – сдвиг бриллюэновской частоты без натяжения;

C – коэффициент натяжения;

ε – натяжение.

Тем самым, становится возможным определять распределение натяжения по сдвигу бриллюэновской частоты ($\nu_B(\epsilon)$) в направлении оси оптоволокон.

Метод бриллюэновской рефлектометрии обладает двумя основными преимуществами. Во-первых, это практически единственный оптический метод, позволяющий измерить величину абсолютного натяжения волокна. Для этого достаточно измерить частоту максимального сигнала в спектре бриллюэновского рассеяния, и при этом нет необходимости подвергать волокно дополнительному растяжению. В других же известных оптических методах измеряется величина удлинения волокна, возникающего при создании в волокне дополнительного натяжения, что делает эти методы непригодными для определения натяжения волокна, уложенного в линию передачи.

Во-вторых, бриллюэновское рассеяние приводит к образованию обратной волны в волокне. Поэтому, зондируя волокно короткими импульсами и сканируя несущую частоту этих импульсов, можно найти распределение вдоль волокна спектра бриллюэновского рассеяния и, соответственно, частоты максимального сигнала в этом спектре.

5. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ БРИЛЛЮЭНОВСКИХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ

Для измерения распределения натяжения вдоль волокна необходимы приборы, выполняющие одновременно функции оптического импульсного рефлектометра и оптического анализатора спектра. Схема построения такого прибора представлена ниже [3].

Как показано на рисунке, с одной стороны в волокно вводится излучение лазера накачки с частотой f_H , а с другой стороны – излучение зондирующего лазера с частотой f_c . После прохождения через акустооптический модулятор (АОМ) частота излучения накачки становится равной $f_H + \Delta f$, где Δf – смещение частоты, создаваемое акустооптическим модулятором. Далее излучение накачки модулируется по амплитуде с помощью электроабсорбционного модулятора (ЕОМ), усиливается с помощью оптического усилителя мощности (EDFA) и вводится в тестируемое волокно.

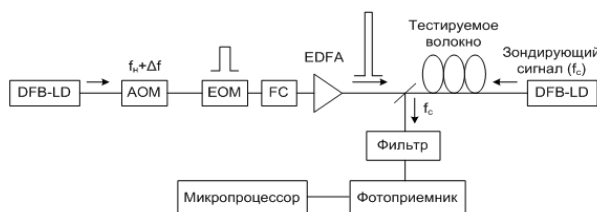


Рис. 1. Оптическая схема бриллюэновского анализатора

Коэффициент бриллюэновского усиления зависит от состояния поляризации излучения накачки и сигнала. Максимальное усиление достигается, когда эти состояния одинаковы в месте взаимодействия этих волн (на ширине импульса накачки). Из-за двулучепреломления волокна эти состояния поляризации изменяются вдоль волокна, вообще говоря, случайным образом и их вариации приводят к замираниям отклика фотоприёмника. Для того чтобы устранить эти замирания, перед оптическим усилителем устанавливается фарадеевский вращатель (FC), периодически

изменяющий состояние поляризации проходящего через него излучения.

Во встречном направлении в волокно вводится излучение от зондирующего лазера с частотой f_c . Это излучение усиливается при взаимодействии с импульсной накачкой за счёт эффекта SBS, проходит через волокно и направляется с помощью оптического ответвителя на вход фотоприёмника. Узкополосный оптический фильтр, установленный перед фотоприёмником, не пропускает на фотоприёмник сигнал релеевского рассеяния (на частоте $f_H + \Delta f$).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение данных систем мониторинга позволяет по новому подойти к вопросу тестирования оптических кабелей и обслуживанию оптических сетей, обеспечивая:

- среднее время локализации и идентификации неисправности ВОЛП, не превышающее 10 минут, в то время как при традиционном способе оно измеряется часами;
- отображение обнаруженной неисправности на географической карте, что благодаря базе данных топологии оптической сети упрощает обслуживание последней;
- прогноз возможных неисправностей сети, так как осуществляется систематическое накопление результатов измерений оптических элементов, анализ которых способствует предупреждению ошибок;
- возможность сравнения базы данных результатов измерений с результатами текущих измерений, что гарантирует подлинность накопленных данных;
- значительное сокращение парка оборудования, необходимого для обслуживания участков сети, что устраняет проблемы, свойственные использованию этого оборудования.

Системы мониторинга и ранней диагностики повреждений оптических кабелей связи позволяют обслуживающему персоналу в реальном масштабе времени (практически мгновенно) узнавать, где произошёл сбой и каков уровень потерь в волокне ОК ВОЛП. Это намного сокращает время поиска неисправностей и упрощает проведение профилактического обслуживания ВОЛП. Учитывая размеры современных цифровых волоконно-оптических сетей, важность и объёмы передаваемой по ним информации, экономическую эффективность применения системы мониторинга трудно переоценить.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радомиров Л. В., Скопин Ю. Г., Иванов А. Б. Методы и оборудование удалённого тестирования ВОЛС // Вестник связи. – 1998. – №5. – с. 64–72.
2. Некрасов С. Е. Системы дистанционного мониторинга оптических кабелей // Технологии и средства связи. – 2000. – №5. – С. 28–32.
3. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРПарт, 2005. – 208 с.

Горлов Николай Ильич

д.т.н., профессор, действительный член Метрологической академии, завкафедрой «Линии связи» СибГУТИ, тел. (383) 269-82-53