



ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ КАК ОБЕСПЕЧИТЬ ВЫСОКУЮ СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ?

П. Швигер

Трафик Интернета быстро растет. При протяженности канала связи более 100 м практически единственная среда для поддержания скорости передачи, равной многим гигабитам в секунду, — оптическое волокно. Но уже при скорости свыше 2,5 Гбит/с необходимо проводить комплексные измерения параметров волокна. Каковы же новые методы измерения, требуемые для определения характеристик волокна, используемого в линиях высокоскоростной передачи?

ЗАЧЕМ ИЗМЕРЯТЬ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА?

Методы измерения характеристик волокна, разумеется, известны, но с увеличением скорости передачи требуются дополнительные методы. С повышением скорости возрастают важность и критичность получаемых результатов измерений характеристик волокна. В сущности, с увеличением скорости передачи проблемы растут экспоненциально.

Казалось бы, скорость всемирной сети росла синхронно с ценой на нефть. Возникшая потребность в передаче видеосигналов потребовала существенного увеличения пропускной способности сети. Так, объем видеотрафика сайта Youtube.com в 2007 году превысил объем всего трафика Интернета в 2001-м. Чтобы поддержать приемлемое качество разнообразных услуг, которые сегодня Сеть предоставляет пользователям, — от интернет-покупки до интернет-телевидения — скорость передачи данных должна составлять много мегабит (а не килобит) в секунду. Скорость передачи данных на терминалах Сети — а это жилые дома и офисы — требует дальнейшего увеличения пропускной способности каналов до нескольких десятков гигабит в секунду. Но что происходит при переходе от 2,5 Гбит/с к 10 Гбит/с?

Во-первых, ширина бита (время, соответствующее установлению логического нуля или единицы) уменьшается в четыре раза. Посмотрим на единицу измерения. Сейчас битовая ширина измеряется в пикосекундах, или 10^{-12} секунд, и в результате впервые на частоту появления ошибочных битов или на потерю видеокadra оказывают влияние физические эффекты длительностью в десятки пикосекунд.

Во-вторых, такой ранее несущественный для передачи данных физический эффект, как дисперсия, вдруг стал важ-

ным фактором, влияющим на качество передачи. Хроматическая дисперсия (ХД), или зависимость скорости распространения сигнала в волокне от длины волны, приобрела большое значение, и с ней необходимо считаться. Из-за формы сердцевинки волокна путь, по которому распространяются составляющие оптического сигнала, вызывает групповую задержку сигнала, что также ограничивает скорость передачи.

Поэтому при оценке возможности увеличения скорости передачи волокна в первую очередь необходимо измерять его хроматическую дисперсию. При модуляции излучения лазера результирующий сигнал содержит составляющие с различными длинами волн, которые распространяются в волокне с различной скоростью. Различие в скоростях невелико, но при переходе к временным значениям, измеряемым в пикосекундах, и при скорости передачи 10 Гбит/с и выше это различие становится значимым. И чем больше протяженность волокна, тем серьезнее эта проблема. Происходит уширение импульсов, и отношение сигнал-шум ухудшается (рис.1). В результате, если не увеличивать мощность передаваемого сигнала, отличать логическую единицу от нуля и наоборот становится все труднее. Однако мощность передаваемого сигнала ограничена, да и ее увеличение обходится дорого.

Правда, хроматическая дисперсия стабильна и не изменяется со временем. Дисперсию можно компенсировать с помощью пассивного оптического прибора или отрезка волокна с отрицательной дисперсией. Чтобы справиться с дисперсией, ее не надо сводить к нулю, поскольку при этом возникнут

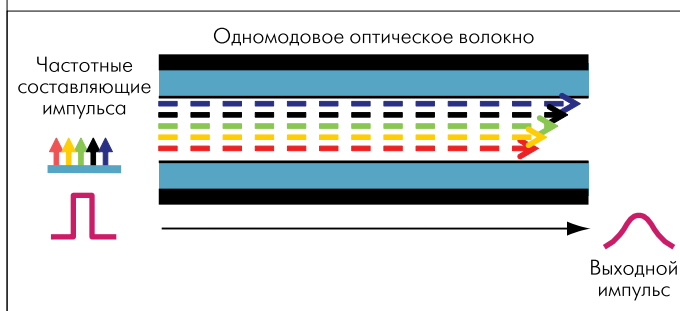


Рис. 1. Уширение импульса при распространении светового сигнала в оптическом волокне



другие проблемы. Достаточно уменьшить ее до уровня ниже максимально допустимой дисперсии. Максимальный предел ХД используемых терминалов задается изготовителем сетевого оборудования, и они находят новые способы повышения допустимого максимального предела ХД, что позволяет увеличивать протяженность линий передачи при меньшей компенсации ХД или даже ее отсутствии.

Коэффициент качества волокна – это значение хроматической дисперсии воображаемого сигнала с полосой частот 1 нм при распространении по линии протяженностью 1 км. Полоса частот большинства сигналов меньше, но именно поэтому такое простое соотношение удобно для расчета коэффициента качества. Хроматическая дисперсия оптического волокна – устойчивый параметр, и для различных волокон можно определить зависимость ХД от расстояния.

Хроматическая дисперсия приводит к тому, что импульс "распространяется" в соседние битовые интервалы (интервалы прохождения бита). При скоростях передачи 10 Гбит/с и выше это становится серьезной проблемой, и тому есть две причины. Во-первых, чем больше глубина модуляции, тем шире спектр или больше длительность импульса сигнала в данной области длин волн. В результате тем больше ХД и уширение импульса. И, во-вторых, чем меньше битовый интервал, тем более восприимчив импульс к уширению соседних импульсов. Вот почему приемлемый уровень хроматической дисперсии обратно пропорционален квадрату скорости передачи битов, т. е. увеличение скорости передачи линии связи в четыре раза приведет к уменьшению предельно допустимой хроматической дисперсии в 16 раз (рис.2). Приведенные в табл.1 данные могут служить эмпирическим правилом определения ограниченный волоконно-оптических линий передач по ХД.

ЗАЧЕМ ИЗМЕРЯТЬ ХРОМАТИЧЕСКУЮ ДИСПЕРСИЮ?

Если хроматическая дисперсия предсказуема, зачем ее измерять? Но существует правило: семь раз отмерь, один раз отрежь. И если линия со скоростью передачи 10 Гбит/с может обслужить 129 024 телефонных переговоров, необходимо быть совершенно уверенным в том, что расчеты ХД точны. Конечно, зная тип волокна и протяженность линии связи, ХД можно рассчитать с помощью калькулятора. Но большинство инженеров хотят быть стопроцентно уверен-

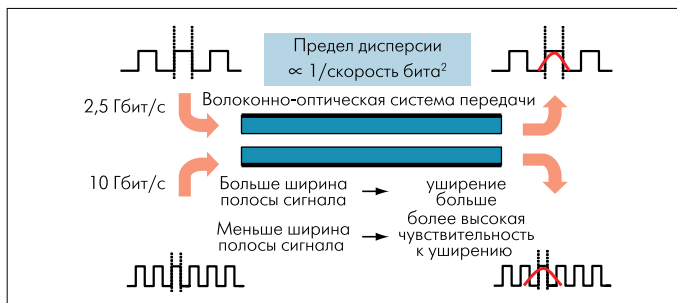


Рис.2. Зависимость пределов дисперсии от скорости передачи

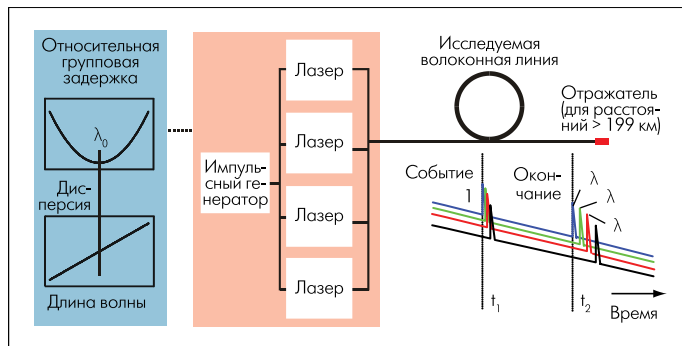


Рис.3. Метод измерения времени пролета для определения хроматической дисперсии

Таблица 1. Зависимость хроматической дисперсии и протяженности линии связи от скорости передачи

Скорость передачи, Гбит/с	Максимальная ХД, пс/нм	Максимальная протяженность линии передачи, км
2,5	16000	940
10	000	60
40	63	4

ными в полученных цифрах. Этот параметр важен, и разработчики не хотят сюрпризов.

Еще 20 лет назад компании могли контролировать и регистрировать все характеристики волоконно-оптических линий связи. Сегодня в результате слияния компаний и ухода специалистов, строивших и знавших сеть, тип используемых волокон и построение линий передач часто меняются. В результате тип волокна, как правило, неизвестен. Измерения позволяют избежать риска, а некоторые методы измерения ХД – определить и тип волокна.

Цель измерений – получить достаточно точные данные, которые позволят установить необходимость применения модуля компенсации дисперсии (МКД) и его параметры. Еще раз подчеркнем, что устранять хроматическую дисперсию не нужно, необходимо лишь гарантировать ее компенсацию до уровня, ниже предельно допустимого.

До установки МКД в линию передачи следует с помощью измерительного оборудования проверить степень компенсации, которую он обеспечивает. Правда, как правило, получаемые результаты не очень точны, но высокая точность и не нужна.

Существуют различные методы определения хроматической дисперсии. Наиболее распространенный предусматривает применение оптического рефлектометра временной области (Optical Time-Domain Reflectometer OTDR), работающего на четырех длинах волн. Измеритель генерирует импульсы сигналов различных длин волн, которые вводятся в оптическое волокно, и измеряет время, затрачиваемое на достижение конечного терминала и возврата к исходному. Сравнивая разницу во времени для сигналов четырех (или более) длин волн, можно определить групповую задержку (рис.3) и затем рассчитать значение дисперсии в зависимости от длины волны.

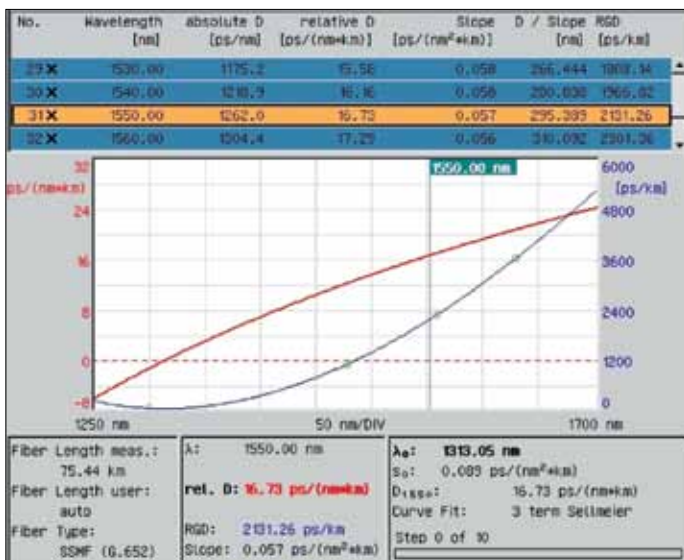


Рис.4. Воспроизведение результатов измерения хроматической дисперсии

Достоинство этого метода – точность, достаточная для гарантии работы линии связи после проверки. Это самый недорогой метод измерения ХД с использованием хорошо известного специалистам упомянутого рефлектометра. И что еще важнее, метод прост. Для проведения измерений нужно просто подсоединить один конец волоконной линии к портативному тестеру и начать измерения. И примерно через 50 с измерительная установка воспроизведет значение хроматической дисперсии. А поскольку не требуется предварительной настройки рефлектометра и измерения проводятся только с одного конца линии передачи, затраты снижаются.

Недостатки метода – невозможность проводить измерения в присутствии оптического усилителя, который блокирует отраженный сигнал рефлектометра. Поэтому в этом случае измерения нельзя проводить при расстоянии более 120 км. Однако поскольку большинство заказчиков предпочитают измерять характеристики каждого пролета линии передачи, этот метод популярен до сих пор.

На рис.4 приведены результаты измерения ХД. Следует отметить, что длина волоконной линии измеряется автоматически, а благодаря достаточно большой разнице в длинах волн (1310, 1480, 1550 и 1625 нм) в ходе измерений определяется и тип волокна. Числа, приведенные в столбце "абсолютные значения дисперсии" (Absolute D) в зависимости от длины волн, дают необходимое значение ХД, которое ниже предельного значения (1100 пс при скорости передачи 10 Гбит/с), а цифры в столбце "приведенные значения дисперсии" (Relative D) – значения дисперсии в пересчете на 1 км. Для определения МКД следует воспользоваться данными, приведенными в столбце Slope (градиент).

Таким образом, ХД легко измерить, и результаты измерений можно использовать для определения характеристик компенсационных модулей. Некоторые методы к тому же позволяют определять тип волокна.

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МОДОВАЯ ДИСПЕРСИЯ (ПМД)

Рассмотрим теперь поляризационную модовую дисперсию (ПМД), причина возникновения которой – также свойства волокна. Существует миф, что соединители или сращиваемые волокна могут вызвать значительное увеличение ПМД. Но это не так. Дело в том, что при некоторых методах измерения и используемом тестовом оборудовании соединители плохого качества или области сращивания волокон с высоким коэффициентом отражения могут влиять на измерения ПМД, и получаемые результаты будут недостоверны. Но существует и непосредственный метод измерения, который позволяет избежать этих проблем. Это анализ на основе матриц Джонса (Jones Matrix Eigenanalysis, JME).

При вводе света в оптическое волокно его энергия может быть представлена как энергия излучений на двух длинах волн (излучения с различной поляризацией), отличающихся путями и скоростями распространения. Как и хроматическая дисперсия, это приводит к уширению импульсов, но, в отличие от ХД, этот эффект вызывает и искажение сигнала. Вследствие искажения поляризационную модовую дисперсию практически невозможно компенсировать, и для некоторых типов волокон трудно добиться скорости распространения сигнала, равной 10 Гбит/с. Задержка распространения в

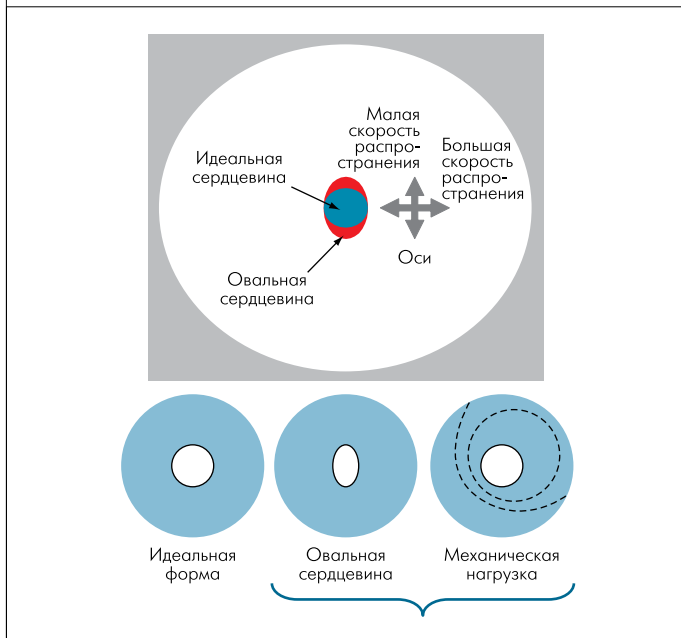


Рис.5. Причины возникновения поляризационной модовой дисперсии

Таблица 2. Максимально допустимая дисперсия при штрафе по мощности 1 дБ

Скорость передачи, Гбит/с	Максимальное значение ПМД, пс	Максимально допустимая протяженность линии связи, км (в зависимости от коэффициента качества)		
		008 пс/км²	02 пс/км²	1 пс/км²
2,5	40	2500000	40000	1600
10	10	15000	2500	100
40	2,5	100	160	6

значительной степени зависит от длины волны и в меньшей степени – от температуры и времени.

Поскольку ПМД нельзя компенсировать, при слишком большом ее значении для выбранного волокна следует использовать другое волокно. Это серьезное и дорогостоящее решение, поэтому желательно измерять ПМД более точно, чем ХД.

Идеальное волокно имеет круглую сердцевину, но форма сердцевинки старых волокон или волокон, на которые действует механическая нагрузка, уже не идеальная, и у них значения ПМД могут быть высокими. Оптический сигнал распространяется в волокне по двум направлениям с так называемыми быстрой и медленной (более длинный путь) осями, т. е. возникает эффект двойного лучепреломления (два пути распространения) (рис.5). Различие в значениях времени распространения двух составляющих сигнала определяет дифференциальную групповую задержку (ДГЗ), которая в сильной степени зависит от длины волны. Поэтому при определении коэффициента качества волокна берется среднее значение дифференциальной групповой задержки для данной длины волны, которое и принимается за значение ПМД. И действительно, некоторые поставщики сетевого оборудования задают максимально допустимое значение ДГЗ, тогда как другие в спецификациях приводят максимальное значение ПМД.

Для большинства систем существуют предельно допустимые значения ПМД. Время задержки большинства волокон составляет 2–20 пс, и для каждого волокна заданного качества рекомендуется максимальная протяженность (табл.2). ПМД новых волокон ниже и, следовательно, протяженность линий связи на их основе больше.

Для измерения ПМД существуют три метода. Согласно одному из них, к любому концу волокна присоединяется перестраиваемый лазер с быстро изменяемой длиной волны излучения. К другому концу волоконной линии присоединяется приемник, который измеряет общую мощность и одновременно – мощ-

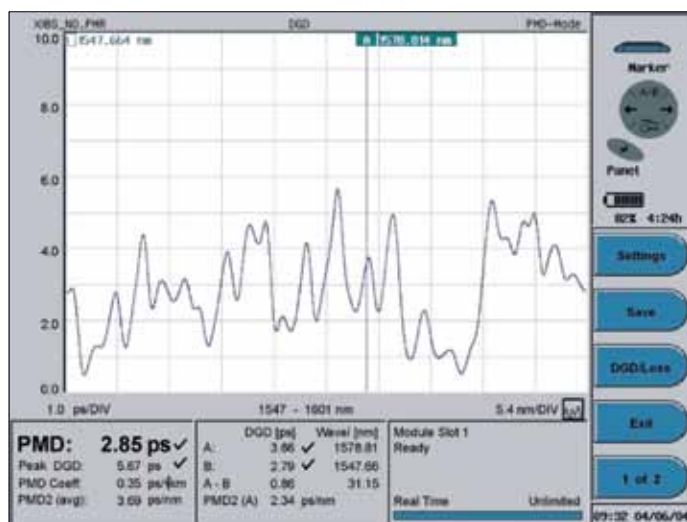


Рис.7. Пример измерения реального значения ПМД. Кривая показывает зависимость задержки от длины волны или ДГЗ. Среднее значение, приведенное в нижнем левом углу, выделено полужирным шрифтом

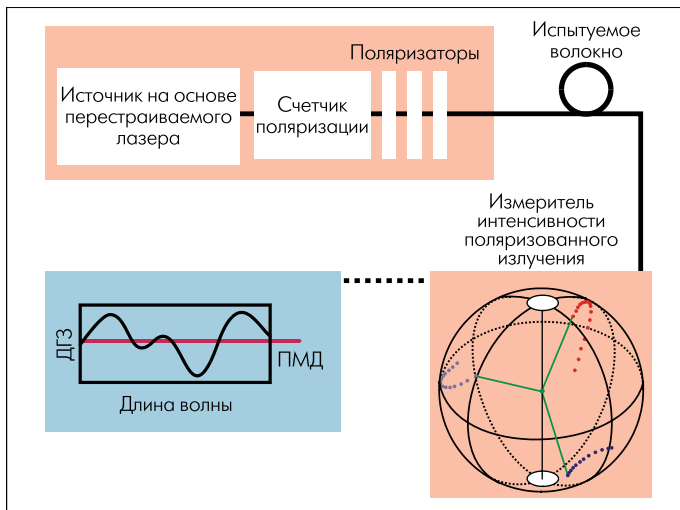


Рис.6. Анализ на основе матриц Джонса (FOTP 122). Одновременное измерение общей мощности и мощности трех сигналов с различной поляризацией

ность трех различно поляризованных излучений (рис.6). При этом скорость замера сопоставима со скоростью перестройки лазера. Полученные данные и сложные математические расчеты позволяют определить поляризационные характеристики волокна. Основные данные – дифференциальная групповая задержка для данной длины волны. А поскольку ПМД равна среднему значению ДГЗ, получают и ее точное значение.

Это единственный метод измерения, позволяющий отображать изменение ДГЗ излучения данной длины волны (рис.7). Поскольку с помощью этого метода можно определить реальную задержку определенного канала на конкретной длине волны, он полезен при реализации системы спектрального уплотнения (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) или для установления ПМД существующей DWDM-сети.

Этот принцип измерения получил название метода анализа на основе матриц Джонса и представляет собой стандартный метод калибровки и проверки результатов измерения ПМД другими средствами. Поскольку метод позволяет непосредственно измерять ДГЗ, он невосприимчив к явлениям отражения или неконтролируемым действиям, например попаданию отрезка кабеля в соединитель аппаратуры.

При оценке возможности применения волокна для передачи сигнала со скоростью выше 10 Гбит/с измерение ХД может помочь в определении необходимости ее компенсации, а также типа используемого волокна. Точные измерения ХД особенно необходимы, если волокно выпущено до 1994 года, если его тип и год производства неизвестны или если протяженность линии связи должна быть большой. Рекомендуется измерять ПМД всех волокон и использовать волокно, поддерживающее требуемую скорость передачи, но с наихудшими значениями ПМД, поскольку в результате появляется возможность позже применять лучшие волокна, обеспечивающие более высокую скорость передачи, которая, несомненно, потребуется в будущем.