

# Анализ целостности сигнала при высокочастотной передаче данных

**В статье рассмотрены первые стандарты передачи данных на ультравысоких скоростях, которые скоро выйдут на рынок связи: 40- и 100-гигабитный Ethernet. Основное внимание уделено исключительно сложным проблемам разработки и отладки новых систем, характерным для всех протоколов на скоростях, превышающих 10 Гбит/с. Подробно рассмотрены проблемы, вызванные оптической фазовой модуляцией, перекосами пространства сигнала, перекрестными наводками, а также коэффициент битовых ошибок (Bit Error Rate), или параметр BER.**

Рэнсом У. СТЕФЕНС  
(Ransom W. STEPHENS)  
Перевод: Галит ГОРОДЕЦКАЯ

## Введение

Со времени последнего значительного скачка в скоростях передачи данных в коммуникационных сетях прошло десятилетие. В 2001 году был достигнут предел в 10 Гбит/с, и этот уровень в основном сохраняется и сейчас. Предполагается, что в следующем десятилетии XXI века скорость передачи данных достигнет 100 Гбит/с. Технологии последовательной передачи данных на ультравысоких скоростях тесно взаимодействуют с технологиями супервысокоскоростных оптоволоконных технологий. Это требует от разработчиков оптических средств связи понимания электроники, а от электронщиков — понимания оптики.

## Краткий обзор стандартов 40 GbE и 100 GbE

В новом стандарте 100 GbE скорость передачи данных в 100 Гбит/с достигается путем сочетания параллельного и последовательного способов передачи данных, где максимальная скорость передачи на одной несущей равна 25 Гбит/с. На рис. 1 показаны основные компоненты, используемые в стандарте 100 GbE; компоненты стандарта 40 GbE в основном те же. На рис. 1а изображен один оптический канал, по которому передаются четыре световых луча, каждый со своей длиной волны. Техника передачи сигнала на нескольких длинах волн по одному оптическому волокну называется технологией спектрального уплотнения (WDM). Как показано на рис. 1б, каждый световой луч передается независимо по своей оптической линии.

Возможны следующие варианты топологии сети:

- В стандарте 40 GbE — это четыре параллельных канала передачи данных на скорости 10 Гбит/с (4×10).

- В стандарте 100 GbE — это десять параллельных каналов передачи данных на скорости 10 Гбит/с (10×10) или четыре канала на скорости 25 Гбит/с (4×25).

На уровне оптической среды возможны следующие варианты:

- Многомодовое волокно для коротких расстояний: до 100 м для 4×10 = 40 GbE и 10×10 = 100 GbE.
- Одномодовое волокно для больших расстояний: до 10 км для 4×10 = 40 GbE и 4×25 = 100 GbE.
- Одномодовое волокно для очень больших расстояний: до 40 км для 4×25 = 100 GbE.

Основное отличие между одномодовым и многомодовым волокнами заключается в характеристиках их диэлектрических волноводов. В одномодовом волокне оптический сигнал распространяется только по одной базовой моде, тогда как многомодовое волок-

но позволяет передавать несколько разных мод, каждая из которых характеризуется различной групповой задержкой. Все задержки складываются в результирующую, например, модовую дисперсию, которая уменьшает полосу пропускания сигнала.

На физическом уровне электрические сигналы распространяются по десяти или по четырём каналам со скоростью 10 Гбит/с. В любом варианте целостность сигнала должна поддерживаться на всем протяжении 10 м медной линии кабеля и (в стандарте 40 GbE) через метровую длину печатного проводника кросс-платы.

С дальнейшим развитием технологии можно ожидать, что стандарт 100 GbE для коротких расстояний в сочетании с технологией WDM будет использоваться в сферах, связанных с обработкой данных. Использование стандарта 100 GbE для передачи на большие

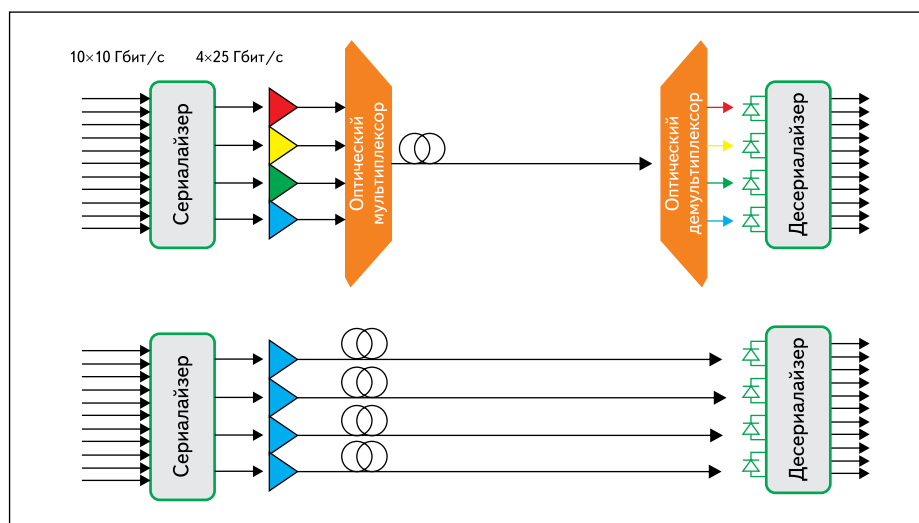


Рис. 1. Упрощенная диаграмма протокола 100 GbE:  
а) передача с использованием технологии WDM; б) передача по независимым оптическим линиям

расстояния потребует больше времени, так как в этом случае необходимы более сложные передатчики, модуляторы, приемники, устройства постобработки и схемы компенсации. Все типовые проблемы целостности сигнала при этом сохраняются, однако некоторые из них настолько усложняются по мере роста скорости передачи данных, что требуют принципиально новых решений.

На рис. 1 (слева направо) сигналы подаются на 4- или 10-портовый 10-Гбит/с дифференциально-последовательный преобразователь (сериалайзер), где они преобразуются в последовательную форму и декодируются в схеме 64 b/66 b. Оптические передатчики содержат лазеры, мощность излучения которых модулируется внешним модулятором, управляемым информационным сигналом. Затем оптические сигналы или мультиплексируются волновым мультиплексором AWG (arrayed waveguide grating) для передачи в протоколе WDM по одному оптическому волокну (рис. 1а), или пересылаются индивидуально по нескольким параллельным волокнам (рис. 1б).

В приемнике оптические сигналы обрабатываются, при необходимости, компенсаторами хроматической дисперсии (CD) и поляризационно-модальной дисперсии (PMD). На рис. 1а WDM-сигналы демultipлексированы в четыре независимых оптических сигнала с промежуточной скоростью 25 Гбит/с, которые затем демодулируются и преобразовываются в десять электрических информационных сигналов со скоростью передачи данных 10 Гбит/с.

Протокол стандарта определяет как форму сигналов в приемнике и их разделение по каналам, так и то, в каком случае несколько сигналов пересылаются по одному оптическому волокну, каждый со своей длиной волны, или одна длина волны передается по множеству волокон с последующим декодированием в приемнике. Поскольку существует весьма жесткая зависимость процессов сериализации-десериализации от скоростей передачи данных, структура физического подуровня подключения к физической среде (Physical Media Attachment, PMA) является своеобразной «коробкой передач».

### Основное требование: коэффициент битовых ошибок $BER < 10^{-12}$

Основная заповедь 100-гигабитного протокола Ethernet такая же, как и всех предыдущих его поколений: система работоспособна, если коэффициент ошибок Bit Error Rate (BER) не превышает  $10^{-12}$ .

Если это требование соблюдается, то никакие другие аспекты целостности сигнала не являются релевантными. Поэтому следует подробнее рассмотреть, как измеряется параметр BER. На рис. 2 показан принцип работы BER-тестера, состоящего из трех основных

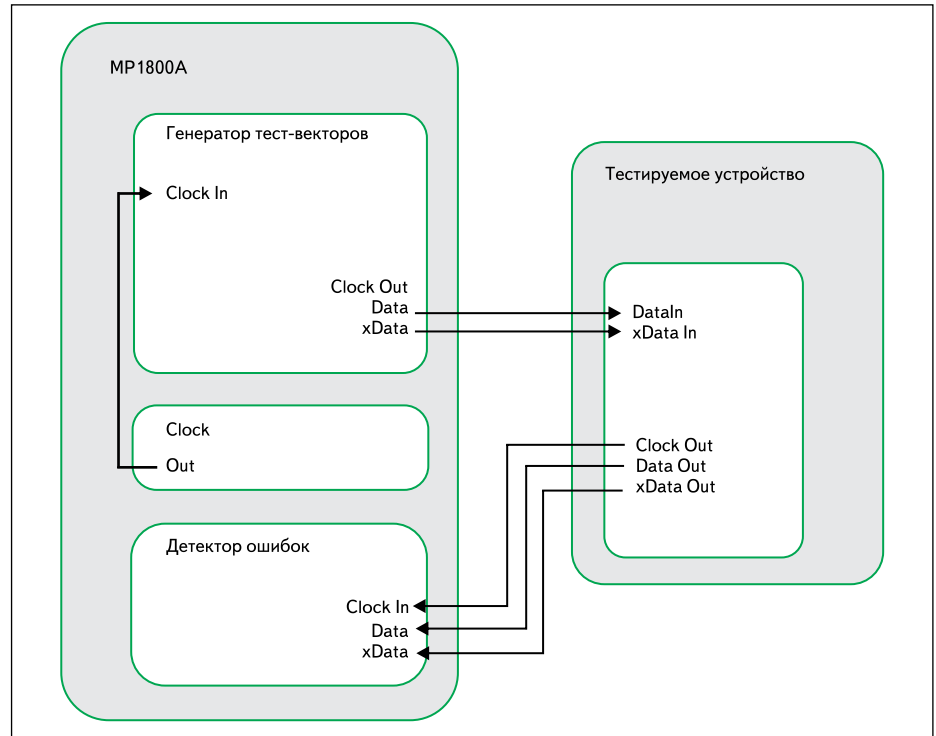


Рис. 2. Принцип измерения параметра BER

блоков: генератора тест-векторов, синхронизатора и детектора ошибок. Выходные тест-векторы генератора строго синхронизированы. В большинстве пользовательских программ тестируемое устройство получает эти тест-векторы, обрабатывает их соответствующим образом и выдает выходной сигнал. В примере на рис. 2 тестируемое устройство вырабатывает синхросигнал из получаемых тест-векторов и посылает его в детектор ошибок. Это, разумеется, лишь одна из множества возможных конфигураций.

Детектор ошибок, получающий ответный выходной сигнал, должен быть информирован о его ожидаемом значении для сравнения этих двух сигналов, и на основании такого сравнения детектор регистрирует факт отклонения от ожидаемого значения и подсчитывает число обнаруженных ошибок.

Значение параметра BER определяется выражением:

$$BER = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_{Errors}}{N},$$

где  $N_{Errors}$  — число битов с ошибками;  $N$  — полное число переданных битов.

Высокоскоростной BER-тестер обладает следующими характеристиками. Цифровой импульс на выходе генератора тест-векторов должен иметь почти идеальную форму меандра, то есть время нарастания и спада должно быть исключительно коротким. Этот импульс может быть в дальнейшем преобразован внешними фильтрами для эмуляции различных протоколов. Он также должен иметь минимальные искажения в связи с возможными помехами и дрожанием фазы сигнала

(джиттером). Широкие перепады напряжений также обязательны для работы с передатчиками данных на большие расстояния.

На рис. 3 изображена глазковая диаграмма сигнала со скоростью передачи данных 25 Гбит/с на экране анализатора сигналов Anritsu MP1800A. Границы раскрытия диаграммы: 3,5 В (peak-to-peak) для несимметричных сигналов и 7 В — для симметричных.

Для анализа передачи данных в стандартах 40 GbE и 100 GbE требуются генераторы сигналов произвольной формы с настройкой под конкретные требования пользователей, перекосами этих генераторов можно легко управлять. Например, анализатор сигналов MP1800A оборудован средствами подстройки задержек, обуславливающих перекосы, от 128 ЕИ (единичных интервалов) с шагом в 1 мЕИ (то есть 1/1000 единичного интервала или битового периода) до 14 Гбит/с с шагом в 2 мЕИ до 28 Гбит/с.

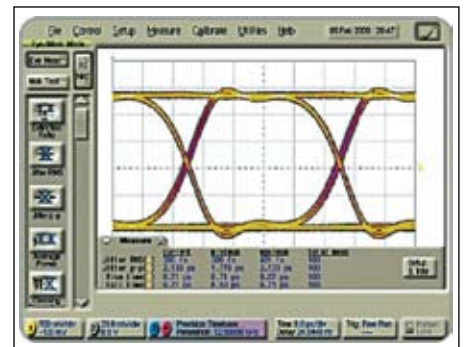


Рис. 3. Глазковая диаграмма сигнала 25 Гбит/с на экране AC Anritsu MP1800A

Генератор синхросигналов должен обладать высокой стабильностью и широкими возможностями деления частоты синхронизации. Модуляция синхросигналов должна обеспечивать калибровку уровней различных типов джиттера, не только расширяя спектр синхроимпульсов, но и позволяя калибровать периодический и случайный джиттер.

Детектор ошибок (ДО), находящийся с другой стороны линии передачи данных, должен иметь высокую чувствительность и запас по фазе, он также должен быть снабжен средствами быстрой синхронизации с входными сигналами. С увеличением скорости передачи данных влияние канала вызывает значительное закрытие глазка, поэтому наиболее важным параметром становится чувствительность детектора ошибок. Чувствительностью ДО принято считать минимальную разницу в напряжении логических уровней, необходимую для различения уровней «лог. 1» и «лог. 0». Современным лидером в своем классе являются анализаторы сигналов MP1800A с чувствительностью, равной 10 мВ.

BER-тестер должен быть, разумеется, обеспечен множеством прикладных измерительных программ для стандартизованного анализа глазковых диаграмм, построения U-образных диаграмм потока отказов, анализа джиттера, обусловленного межсимвольной интерференцией (ISI), иметь добротную фильтрацию (Q-фактор) и многое другое.

**Две общеизвестные проблемы: перекосы сигналов и перекрестные помехи**

При передаче данных по параллельным каналам на высоких скоростях 40 GbE и 100 GbE мы, как правило, сталкиваемся с двумя общеизвестными проблемами: перекосы сигналов и перекрестные помехи. В общем случае такие перекосы вызваны задержками прохождения сигналов по двум параллельным каналам. Эта разница вызвана различной длиной физических проводников (оптоволокон, печатных проводников или проводников в кабелях), а также задержками, вносимыми компонентами схем. Перекрестные помехи обусловлены в основном влиянием электромагнитных полей, излучаемых соседними длинными проводниками. Оптические сигналы не подвержены влиянию электромагнитного поля, однако при нарастании мощности излучения диэлектрическая проницаемость оптоволокна изменяется, что также вызывает помехи.

**Перекосы сигналов в физическом интерфейсе PCS**

Сама структура передаваемых данных приводит к возникновению двух основных проблем на стороне приемника. Обе эти проблемы возникают тогда, когда передаваемые данные содержат длинные непрерывные потоки одинаковых битов. Последовательность сигналов с одинаковым логическим уровнем в те-

чение временного интервала, более длинного или сравнимого по величине с постоянной времени RC-цепочки емкостной связи приемника, вызывает эффект смещения (дрейфа) постоянной составляющей от среднего значения. При длинном потоке логических единиц дрейф растет, а при длинном потоке логических нулей — падает. В обоих случаях координата точки выборки приемника, то есть того порогового уровня, в котором состояние шины читается и интерпретируется, смещается относительно значения оптимальной координаты, что приводит к увеличению параметра BER системы. Для предотвращения такого дрейфа необходимо обеспечить сбалансированное число логических нулей и единиц при передаче сигнала от передатчика к приемнику по линии емкостной развязки.

Вторая проблема связана с восстановлением синхронизации: чем больше переходов между разными логическими уровнями, тем легче синхросигнал может быть восстановлен и согласован с передаваемыми данными. Такая техника передачи со «встроенным» синхросигналом называется продвижением синхросигналов (clock forwarding). Если синхронизация неустойчива из-за дрейфа, то координата точки считывания также смещается, что приводит к увеличению параметра BER системы. Чтобы обеспечить частоту логических переходов, достаточную для приемника при восстановлении синхронизации, необходимо поддерживать минимальную плотность потока данных. Такая плотность потока вычисляется как отношение числа переходов логических уровней типа «лог. 1» – «лог. 0» (и наоборот) к общему числу битов в потоке данных.

В передатчике исходная информация кодируется по схеме 64 b/66 b и скремблируется. Техника кодирования позволяет преобразовать 64 бита данных в 66 передаваемых битов, а алгоритм скремблирования обеспечивает равное число «лог. 1» и «лог. 0» в каждой передаваемой 66-битовой последовательности. Данные, «перемешанные» таким образом, имеют достаточную частоту переходов для восстановления синхронизации. Указанный алгоритм гарантирует как минимум один логический переход в каждой 66-битовой последовательности. Алгоритм скремблирования уменьшает вероятность появления длинных последовательностей идентичных битов, однако не устраняет проблему в целом.

Вероятность появления длинных последовательностей идентичных битов (CID-битов) может быть определена с помощью тест-векторов, содержащих стандартную псевдослучайную двоичную последовательность типа 231-1 (PRBS31).

Такая последовательность превышает 2 млрд бит, предоставляя тестовому оборудованию возможность справиться с измерениями параметра BER. С помощью осциллографа невозможно, конечно, определить влияние таких длинных последовательностей сигналов, передаваемых на скоростях 25 Гбит/с и выше, даже при наличии значительных ресурсов памяти. Для того чтобы ваше оборудование соответствовало техническим требованиям высокоскоростной передачи сигналов, следует убедиться, что оно в состоянии генерировать псевдослучайные последовательности типа PRBS даже для очень высоких скоростей передачи.

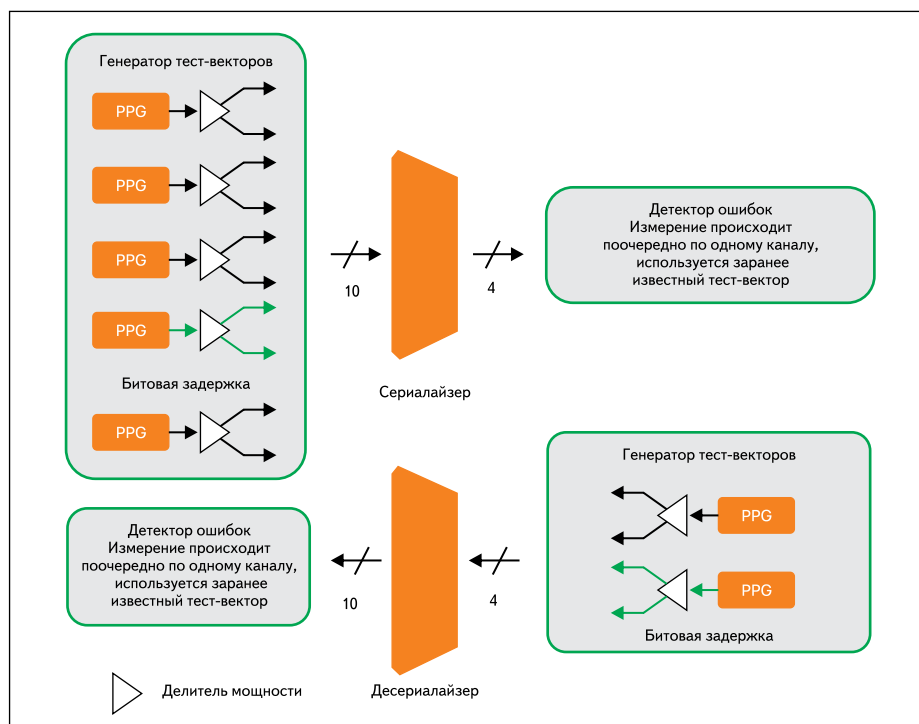


Рис. 4. Принцип измерения границы допуска перекоса PCS для протокола 100 GbE при передаче данных по четырем каналам на скорости 4×25 Гбит/с

Физический подуровень кодирования (PCS) обеспечивает распределение данных по параллельным каналам и их маркировку, включая периодический маркер выравнивания строки. PCS осуществляет кодирование потока данных, поступающих в канал передачи, таким образом, чтобы они могли быть различимы приемником и восстановлены в исходной форме. Наличие маркера выравнивания строки позволяет приемнику нормально функционировать при значительных перекосах сигналов между параллельными каналами. Максимально допустимое значение перекоса в PCS составляет 180 нс для всех протоколов 40 GbE и 100 GbE.

Для тестирования «коробки передач» необходимо определить суммарное отклонение по всем каналам передачи, вызываемое перекосом сигналов, которое определяется посредством PCS. На рис. 4 изображен эффективный способ, применяемый для этой цели для протокола 100 GbE при передаче данных по четырем каналам на скорости  $4 \times 25$  Гбит/с. При тестировании «коробки передач» генератор каждого BER-тестера посылает тест-вектор на каждый из параллельных каналов. «Коробка передач» преобразовывает их в высокоскоростные сигналы и активирует оптические передатчики. Каждый высокоскоростной сигнал поступает на соответствующий детектор ошибок. Детекторы ошибок синхронизированы с данными и занимаются измерениями параметров BER. Ключевым элементом такой методики измерения является возможность синхронизации по времени всех параллельных тест-генераторов. Временная задержка каждого канала по отношению к остальным растет, пока параметр BER не достигнет величины  $10^{-12}$ . При наличии случайного шума или джиттера параметр BER растет плавно по мере нарастания шума. В противоположность этому перекош сигналов всегда демонстрирует следующий граничный эффект: с возрастанием перекоса до определенной границы параметр BER остается низким, а затем существенно возрастает при достижении границы допуска. Если уменьшение перекоса на некоторую минимальную величину возвращает величину параметра BER в стабильно низкое состояние, то эта задержка и представляет собой значение допуска перекоса сигнала.

В случае тестирования принимающей «коробки передач» четыре канала со скоростью передачи 25 Гбит/с демультиплексируются в один канал со скоростью передачи 10 Гбит/с, при этом детектор ошибок анализирует каждый из каналов по очереди. Как и в предыдущем случае, по мере увеличения перекоса параметр BER резко возрастает при достижении границы допуска.

### Оптическая модуляция DQPSK и перекош I/Q

Способ модуляции оптического сигнала содержит ряд сложных моментов. Основным недостатком стандартной моду-

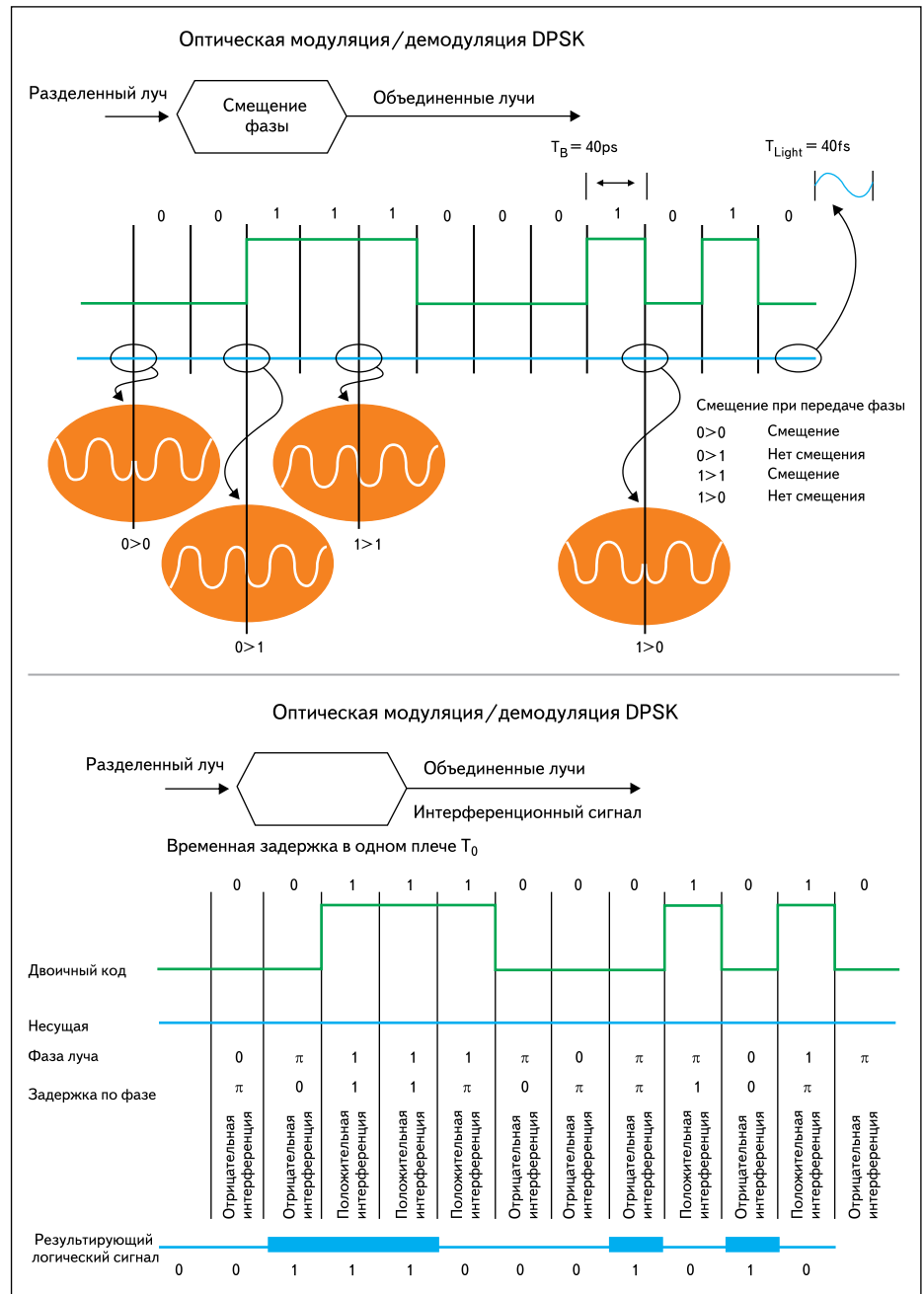


Рис. 5. Принцип оптической модуляции/демодуляции DPSK сигнала со скоростью передачи 25 Гбит/с

ляции типа NRZ (без возврата к нулю на тактовом интервале) является зависимость от скорости передачи сигнала: с уменьшением ширины импульса возрастает полоса пропускания в оптическом диапазоне, а с ней — минимально допустимая разница в длинах волн. Увеличение оптического диапазона, в свою очередь, увеличивает хроматическую и поляризационно-модальную дисперсии (CD, PMD). Кроме того, увеличение мощности сигнала, обуславливаемое уровнями «лог. 1», способствует возрастанию помех в оптических линиях.

Наиболее интересный подход к проблеме содержится в принципе оптической фазовой модуляции (Phase Shift Keying, PSK). Следует иметь в виду, что частота модулирующего

сигнала очень мала по сравнению с частотой оптического излучения. (Скорость передачи 100 Гбит/с соответствует частоте 1011 Гц; сравните с частотой несущего сигнала, равной 1014 Гц.) Модулируется фаза несущего оптического сигнала, а не длина волны, как это происходит при радиочастотной или микроволновой фазовой модуляции.

Как показано на рис. 5, принцип оптической дифференциальной фазовой модуляции (DPSK) состоит в инвертировании оптической фазы несущей в соответствии с определенными переключениями двоичного кода. Смещение фазы достигается с помощью интерферометра Маха-Зандера, в котором несущий луч расщепляется на два. Два результирующих луча проходят по сиг-

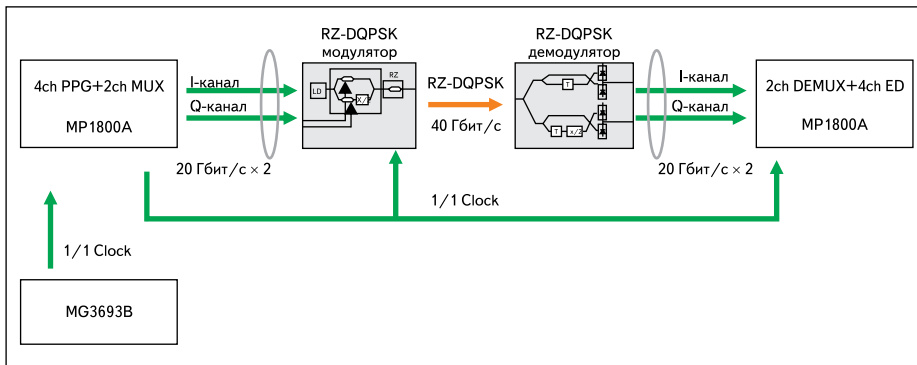


Рис. 6. Схема для анализа допуска перекоса I/Q

нальному и опорному плечам и когерентно соединяются на выходе. Вначале уровень сигнала соответствует «лог. 0» и не изменяется (переход «лог. 0» на «лог. 0»). Расстояния, проходимые лучами в двух плечах интерферометра, отличаются на половину длины волны. Такой логический переход вызывает изменение фазы объединенного выходного луча на противоположную. Если в двоичном коде «лог. 0» изменился на «лог. 1», длина пути оптических лучей не меняется, и фаза объединенного выходного луча также не меняется. Соответственно, переход «лог. 1» на «лог. 1» не меняет фазу, а переход «лог. 1» на «лог. 0» — меняет на противоположную.

Процесс демодуляции происходит изумительно просто: в приемнике принимаемый световой сигнал разделяется на два луча с временной задержкой длиной в один бит относительно другого. Когда эти лучи соединяются в один, то положительная интерференция сигналов обуславливает появление в выходном коде логических единиц, а отрицательная интерференция — логических нулей в удобном формате NRZ.

Методика фазовой модуляции DQPSK (дифференциальная квадратурная фазовая модуляция со сдвигом символов) является расширением метода модуляции DPSK и позволяет генерировать сигналы с той же скоростью при уменьшении скорости цифрового потока наполовину. В результате происходит сужение полосы сигнала, что делает систему более устойчивой к дисперсии, и уменьшается разнос каналов.

Поступающие на вход модулятора биты цифрового сигнала объединяются попарно в так называемые дибиты, где каждому дибиту ставится в соответствие приращение фазового угла. Нулевое приращение угла соответствует дибиту «00», приращение угла, равное  $\pi/2$ , соответствует «10», приращение  $-\pi/2$  соответствует «01», и приращение  $\pi$  соответствует «11». Две составляющие несущей I и Q модулируются двумя отдельными модуляторами. Демодулятор DQPSK сигнала состоит из двух согласованных DPSK-демодуляторов с фазовым сдвигом  $\pm\pi/4$ .

Еще более оригинальный подход заключен в принципе двойной поляризационной ква-

дратурной фазовой модуляции (DP-QPSK), где составляющие I и Q накладываются на каждое из двух состояний ортогональной поляризации несущей. В результате скорость цифрового потока дополнительно уменьшается еще вдвое, со всеми описанными выше преимуществами. Однако это достигается за счет усложнения аппаратной части приемника, необходимой для различения двух поляризационных состояний сигнала, и приносит в систему дополнительные помехи, обусловленные поляризационной модовой дисперсией.

Поскольку сигналы I и Q должны быть синхронизированы на трех этапах обработки — на подуровне кодирования (PCS), выравнивания тестовых векторов и обработки перекоса, допуск перекоса I/Q является ключевым тестом системы модуляции. На рис. 6 представлены два синхронизированных тест-генератора BER, управляющие сигналами I и Q. Модулятор генерирует сигнал DP-QPSK, который затем демодулируется и в виде сигналов I и Q подается на вход BER детектора ошибок. Фазовый сдвиг между каналами I и Q растет, пока параметр BER не достигнет величины  $10^{-12}$ , эта точка соответствует допуску перекоса I/Q.

### Перекрестные помехи

Сигнал со скоростью передачи 100 Гбит/с имеет длительность битового импульса, равную 10 пс, а со скоростью передачи 25 Гбит/с — 40 пс, этого времени недостаточно для полного раскрытия глазковой диаграммы. Поэтому при супервысоких скоростях передачи требование к исключительно короткому времени нарастания и спада сигналов смягчается. Чем ближе форма сигнала к идеальному меандру, тем больше в его спектре высокочастотных гармоник, которые вызывают «звон» при малейшем рассогласовании импеданса, но это еще не худшая проблема. Быстрые фронты сигналов вызывают резкие электрические импульсы, порождающие электромагнитное излучение: вот главный источник перекрестных помех.

Говоря простым языком, мы имеем дело с «сигналами-агрессорами» и «сигналами-

жертвами». «Жертва» — это сигнал, характеристики которого ухудшаются под воздействием электромагнитного излучения «агрессоров». Если речь идет об отдельных проводниках на печатной плате, то механизм перекрестных помех между ними обусловлен наличием емкостных и индуктивных связей между проводниками.

Когда по цепи сигнала-агрессора проходит импульс, он генерирует короткий импульс излучения, который распространяется по схеме и наводит паразитные токи в проводниках схемы.

Анализируя перекрестные помехи в системах, работающих в протоколах 40 GbE и 100 GbE, важно помнить, что передача данных по каждому параллельному каналу синхронизирована одним и тем же синхросигналом, то есть «жертва» и «агрессор» «скованы одной цепью» тактового сигнала. На рис. 7 приведена глазковая диаграмма «сигнала-жертвы», на которой перекрестные помехи имеют постоянный сдвиг по времени. В ситуации, когда «жертва» и «агрессор» не синхронизированы, перекрестные помехи накладываются на сигнал случайным образом и легко могут быть приняты за случайный шум.

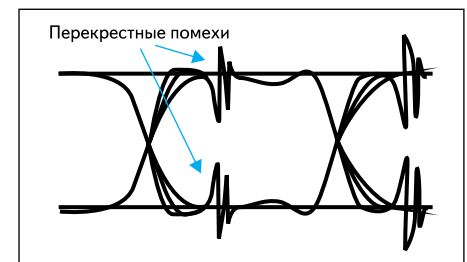


Рис. 7. Глазковая диаграмма, изображающая перекрестные наводки между «сигналом-жертвой» и «сигналом-агрессором» с общей синхронизацией

Амплитуда перекрестной помехи на диаграмме прямо пропорциональна величине времени нарастания/спада импульса-«агрессора», а его длительность обратно пропорциональна величине времени нарастания/спада импульса, поэтому чем медленнее время нарастания/спада, тем слабее излучаемый импульс и меньше амплитуда помехи. Однако чем медленнее время нарастания/спада, тем дольше длится излучение и искажается сигнал.

Штрафом перекрестной помехи принято называть единицу измерения степени ухудшения параметра BER в результате влияния перекрестных помех. Для измерения величины штрафа перекрестной помехи необходимо пересылать несколько сигналов со связанными частотами, меняя временную задержку между ними. На рис. 8 изображена схема, с помощью которой можно измерить параметр BER, меняя фазовый сдвиг между «жертвой» и «агрессором». Когда фаза помехи складывается с задержкой по времени между сигналами, проходящими по двум цепям,

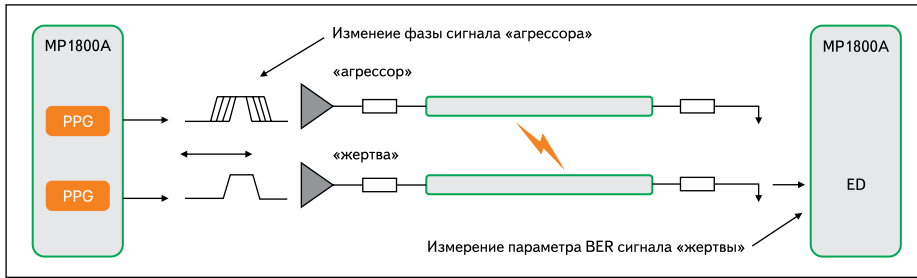


Рис. 8. Схема измерения штрафа перекрестной помехи

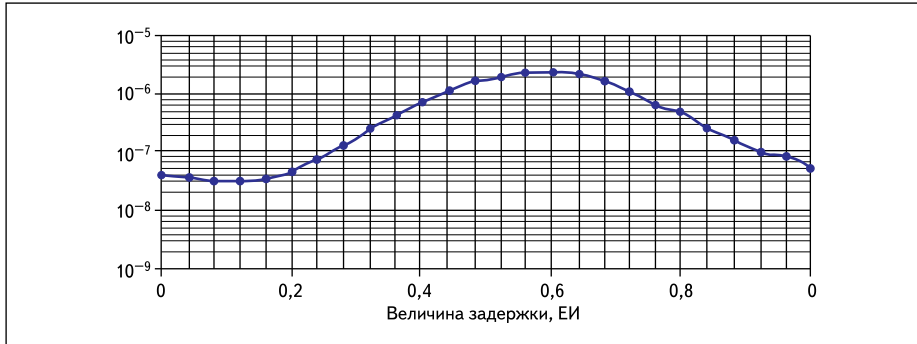


Рис. 9. Штраф перекрестной помехи в схеме приемопередатчика со скоростью 10 Гбит/с

таким образом, что перекрестная помеха находится в точке пересечения глазковой диаграммы (поскольку выборка битов происходит ближе к центру глазка и на некотором удалении от точки пересечения), то параметр BER почти не меняется. И наоборот, когда фаза помехи складывается с задержкой по времени и перекрестная помеха находится в центре диаграммы, параметр BER получает максимальное значение.

Каким же образом перекрестные помехи влияют на значение параметра BER?

Штраф перекрестной помехи измеряется ослаблением «сигнала-жертвы» до тех пор, пока параметр BER не достигнет довольно невысокого значения, порядка  $10^{-7}$  или около того. Затем варьируют относительную

задержку по времени «сигнала-агрессора». При каждом значении задержки измеряется величина параметра BER так, что в результате получается график значений, подобный показанному на рис. 9. В этом примере максимальное значение параметра BER, равное  $2 \times 10^{-6}$ , соответствует величине задержки, равной 0,6 ЕИ, а минимальное значение параметра BER, равное  $3 \times 10^{-8}$ , соответствует величине задержки, равной 0,1 ЕИ. Результирующая величина штрафа перекрестной помехи равна 18 дБ.

### Заключение

Вычисления с многоядерными процессорами и сетевым хранением информации в таких

технологиях, как IPTV и eCommerce, предполагают управление частотным диапазоном передаваемых сигналов. Такие технологии последовательной передачи данных на высоких скоростях, как улучшенное поколение PCIe, SAS, SATA, FibreChannel, DisplayPort, RapidIO и т. д., неизбежно будут взаимодействовать с технологиями в области передачи гигантских объемов информации на большие расстояния. То, что раньше находилось в зоне влияния технологий SONET/SDH, теперь перемещается в сторону технологий, работающих в протоколе Ethernet. В результате появились стандарты 40 GbE и 100 GbE и технология, в которой сочетаются высочайшие скорости передачи данных параллельным и последовательным способом и нет четких границ между оптическими и электрическими сетями.

Большие надежды возлагаются на две важные новые технологии — принцип двойной поляризационной квадратурной фазовой модуляции (DP-QPSK), которая должна помочь решить проблемы оптической дисперсии, и дешифрация на физическом подуровне кодирования (PCS) для решения проблем с перекосом сигналов.

Тем не менее постоянно появляются новые технологии, обуславливающие новые вызовы в связи с проблемами анализа целостности сигналов.

В каждом конкретном случае конечным критерием работоспособности будет являться величина коэффициента битовых ошибок BER, а BER-тестер всегда будет ключевым инструментом для его анализа. В стандартах 40 GbE и 100 GbE максимально допустимое значение параметра BER  $< 10^{-12}$ . Многоканальный анализатор качества сигнала Anritsu MP1800A с регулируемым перекосом сигналов и детектором ошибок обладает наилучшей чувствительностью в своем классе приборов и является единственным BER-тестером, идеально подходящим для измерений с требуемой точностью для высокоскоростных сигналов. ■