

# ТЕСТИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСИВЕРОВ: ЧТО НУЖНО ЗНАТЬ О ПРОЦЕССЕ ПЕРЕХОДА DP-QPSK ОТ ЭТАПА ИССЛЕДОВАНИЙ К ЭТАПУ ПРОИЗВОДСТВА И ВНЕДРЕНИЯ

## TESTING COHERENT OPTICAL TRANSCEIVERS: WHAT YOU NEED TO KNOW AS DP-QPSK MOVES FROM R&D TO PRODUCTION AND DEPLOYMENT

Дин Майлс (Dean Miles), Tektronix

Для ведущих телекоммуникационных операторов и провайдеров пришло время перехода на когерентные оптические каналы 100G, используемые для дальней и сверхдальней связи с применением мультиплексирования по длине волны повышенной плотности (DWDM). Быстрое распространение широкополосных приложений, таких как видео по запросу и услуги на основе облачных вычислений, делают увеличение пропускной способности задачей с наивысшим приоритетом. До недавнего времени решение заключалось в повышении спектральной эффективности имеющегося оптоволоконного канала. Для этого операторы переходили от обычной амплитудной модуляции (ОАМ) к когерентной квадратурной фазовой модуляции с двойной поляризацией (DP-QPSK), квадратурной амплитудной модуляции (QAM) и разным вариантам мультиплексирования с ортогональным разделением по частоте (OFDM).

По мере того как когерентные оптические технологии переходят из сферы научных исследований в производство, многие исследовательские лаборатории все еще пользуются когерентными приемниками и аналитическим программным обеспечением собственного изготовления, часто дополняемыми адаптивными эквалайзерами для достижения максимального раскрытия глазковой диаграммы в широком диапазоне условий. И хотя такой подход важен для разработки приемников, он часто может упускать важные источники искажений в передающей системе, а медленная реакция измерительных систем может сделать невозможным быстрое выявление истинных причин отказа.

Поэтому очень важно иметь точно описанные, калиброванные и воспроизводимые методы анализа, а также соответствующее оборудование. И хотя для лидирующего в настоящее время и одобренного OIF формата DP-QPSK многие методы измерения, направленные на обеспечение совместимости, такие как широко используемое в системах последовательной передачи данных тестирование глаза по маске, еще не определены, тестирование на соответствие заданной добротности обеспечивает, по крайней мере, проверку взаимовлия-

# Tektronix®

ния характеристик компонентов. В связи с ожидаемым в ближайшие годы развитием различных стандартов и технологий, очень важно создать стратегию тестирования, поддерживающую разные схемы когерентной модуляции.

Проектируя и внедряя когерентные оптические системы для передачи на большие расстояния, важно следить за тем, чтобы когерентный оптический трансивер имел предсказуемое значение коэффициента битовых ошибок и воспроизводимую добротность. В этой статье мы рассмотрим контрольно-измерительные приборы, и в частности, анализаторы когерентных оптических сигналов, которые позволяют обнаруживать и устранять недостатки физической конструкции, как в научных исследованиях, так и на этапах изготовления и внедрения.

### ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ТЕСТИРОВАНИЯ — ДИАГНОСТИКА ПРОБЛЕМ

В любых передающих системах залогом успеха является возможность определения «что пошло не так», когда трансивер отказывается работать в производственных или полевых условиях. К сожалению, традиционные методы прямого определения неэффективны при измерении сигналов с фазовой модуляцией. Например, используемый традиционным способом фотодиод с приемником, настроенным на обнаружение ОАМ или амплитудной модуляции, выдаст одни единицы при подаче сигнала с фазовой модуляцией, в котором оптическая несущая модулируется по фазе, а не по амплитуде. Поэтому не рекомендуется применять обычные анализаторы глазковых диаграмм в текущей конфигурации, поскольку традиционные измерения в этом случае ничего не покажут.

Вместо этого нужен анализатор когерентного оптического сигнала, извлекающий фазовую информацию путем смешения исследуемого сигнала с сигналом локального лазера, работающего с фиксированной длиной волны. Когерентный анализатор позволяет представить оптический сигнал на ком-

плексной плоскости, то есть, увидеть реальную и мнимую составляющую сигнала. Эта комбинация амплитуды и фазы (или вектор) описывает величину (амплитуду) и угол (фазу) по отношению к опорному сигналу, генерируемому локальным лазером.

На этапе перехода от исследований к производству испытательным системам необходима возможность компенсации искажений. Методы непосредственного обнаружения делают это в ограниченной степени аппаратными способами, тогда как когерентный подход может делать это программно путем эмуляции микропрограммы, используемой для восстановления фазы и тактовой частоты, анализа поляризации и выравнивания АЧХ. Кроме того, это позволяет моделировать канал передачи и выделять искажения для выявления причин возникновения битовых ошибок. Также на этом этапе имеется потребность в определении режимов тестирования и стратегий, позволяющих быстро идентифицировать и решить данную проблему.

Кроме того, когерентные контрольно-измерительные приборы могут использоваться в производственной среде для регулирования параметров в процессе поиска источников ошибок. Это включает настройку смещения модулятора трансивера, настройку фазы, мощности и длины волны источника, настройку самого лазера, а также определение мощности возбудителя модулятора и качества его сигнала. Другие потенциальные источники ошибок и отказов включают пороги и допуски для различных функций приемника, а также матрицу коэффициентов гибридной калибровки приемника на оптических трактах. В полевых условиях тест включает измерение смещения и обратной связи, измерение мощности источника, регулировку, выявление тепловых эффектов.

### КОГЕРЕНТНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ СИГНАЛОВ

В процессе когерентного анализа комплексная (квадратурная) модуляция с разнесением по поляризации позволяет полностью исследовать электрические характеристики оптической несущей. Кроме роста спектральной эффективности, доступ к этим параме-

трам поля в когерентном приемнике позволяет выполнить математическую фильтрацию для полной компенсации искажений, таких как хроматическая дисперсия и дисперсия релакса поляризации. Затем можно измерить качество сигнала с применением таких метрик, как добротность или амплитуда вектора ошибки (EVM), что позволяет оценивать характеристики передатчиков, трансверсов, лазеров, модуляторов и полупроводниковых приборов.

Когерентный или констелляционный анализатор содержит входной оптический интерфейс, интегрированный в сверхширокополосный малошумящий осциллограф реального времени, который оцифровывает выход четырех симметричных фотоприемников и обрабатывает результаты для восстановления фазы и частоты. Затем он строит стабильную констелляционную диаграмму для поляризации когерентно модулированных сигналов X и Y, передаваемых по оптоволоконному кабелю.

Когерентный анализатор позволяет выполнять полную калибровку от оптического входа до электрического выхода, что гарантирует достоверность измерений. Другими словами, применение сверхширокополосного осциллографа, высокой частоты дискретизации и самого чувствительного когерентного оптического анализатора позволяет выполнить полную калибровку и достоверно представить оптический сигнал в оптоволоконном кабеле. Сюда входит калибровка коэффициента усиления аналогового интерфейса, фазовых углов, а также АЧХ и фазовых сдвигов или задержек.

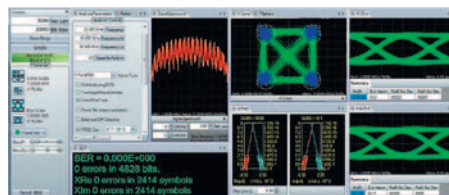


**Рис. 1. Структурная схема когерентного анализатора оптических сигналов**

Структурная схема оптического анализатора показана на рис. 1. Выступая в роли входного оптического интерфейса дискретизатора, опорный когерентный приемник принимает входные сигналы по двум одномодовым оптическим кабелям, один из которых передает исследуемый сигнал, а другой — сигнал с опорной фазой (или сигнал гетеродина). В приемнике сигнал с опорной фазой делится на составляющие с поляризацией X и Y и смешивается с сигналом двух трактов — I и Q. Четыре канала преобразуются симметричными фотодетекторами в электрический сигнал, который подается на осциллограф реального времени, обладающий достаточной полосой пропускания для захвата сигналов разностной частоты.

Сердцем этой системы является дискретизатор. В связи с высокой скоростью передачи данных в оптическом кабеле, дискретизатор должен обладать

высокой точностью и чувствительностью, а также максимально широкой полосой пропускания. Производители осциллографов постоянно совершенствуют технологию дискретизации для удовлетворения потребностей рынка. Недавно выпущенные модели обеспечивают полосу пропускания более 20 ГГц и частоту дискретизации 50 Гвыб./с по четырем каналам. Для повышения производительности можно объединить несколько осциллографов, что позволяет получить полосу более 30 ГГц и частоту дискретизации 100 Гвыб./с по четырем каналам. Число каналов очень важно, поскольку полное измерение характеристик оптических сигналов требует четырех каналов: для синфазной и квадратурной составляющих поляризации X и Y.



**Рис. 2. Функции управления и анализа, предлагаемые когерентными анализаторами оптических сигналов. В данном случае оптический сигнал, передаваемый со скоростью 32 Гбод, наблюдается после дискретизации с частотой 50 Гвыб./с в полосе 23 ГГц**

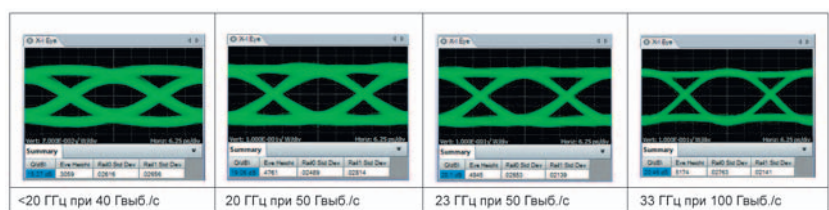
Затем пакетные данные канала обрабатываются работающим на осциллографе (или на внешнем компьютере) программным обеспечением для извлечения компонентов, связанных со схемой модуляции, составления отчета о результатах и для отображения извлеченного сигнала в разных форматах. Как показано на рис. 2, это может включать констелляционные диаграммы каждой поляризации и глазковые диа-

когерентным приемником. Измерительный прибор должен обладать максимально широкой полосой пропускания и калиброванными характеристиками. В отличие от этого, приемник должен иметь полосу, достаточную для обеспечения определенного коэффициента битовых ошибок при заданном отношении сигнал/шум. Это значит, что качество глаза такого приемника будет ниже качества, демонстрируемого точно откалиброванным прибором, что не позволяет правильно оценивать допуски тестирования или выявлять причины отказов. Роль приемника заключается в адаптации и сужении полосы для максимального подавления шума, что не позволяет использовать его в качестве контрольно-измерительного прибора, разве что для разбраковки типа «годен/не годен».

Для производственного тестирования когерентный анализатор сигналов можно настроить на автоматическое выполнение тестов, что существенно экономит время. Применение графического интерфейса дает возможность пользователям с разной степенью подготовки легко обучиться работе с системой. Кроме того, это позволяет проверять разные алгоритмы выравнивания и восстановления фазы в живой интерактивной среде с целью оптимизации характеристик. И более того, возможность понимания влияния ограниченной полосы на разных участках сигнального тракта может помочь выявить точки, где эти ограничения порождают слишком большие ошибки.

### ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСКРЕТИЗАТОРА

Одним из самых важных требований, предъявляемых к когерентному анализатору оптических сигналов, является точное представление на экране



**Рис. 3. Сравнение глазковых диаграмм, показывающих влияние полосы пропускания и частоты дискретизации на точность представления сигнала**

граммы каждого компонента с соответствующими графиками добротностей. Такое ПО предлагает множество других способов представления данных, и кроме того, пользователи могут создавать собственные представления с помощью MATLAB.

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СТРАТЕГИЙ ТЕСТИРОВАНИЯ

Учитывая варианты перехода от научных исследований к квалификационным и производственным испытаниям, важно понимать разницу между когерентным измерительным прибором и

сигналов, передаваемых по оптическому кабелю. Точность такого представления зависит от чувствительности, линейности и полосы пропускания дискретизатора. Для любого входного оптического интерфейса система дискретизации является наиболее важной составляющей, определяющей точность функционирования измерительной системы.

На рис. 3 представлен все тот же электрический сигнал с одной поляризацией и скоростью передачи данных 28 Гбод, но на этот раз данные регистрировались разными дискретизатора-



ми. На самой левой диаграмме явно наблюдается влияние ограниченной полосы пропускания осциллографа (<20 ГГц), которое проявляется в скруглении глаза диаграммы и в отсутствии полностью плоской верхней и нижней линии. И хотя глаз в этом случае полностью открыт и, следовательно, ошибки отсутствуют, такое представление входного сигнала нельзя назвать совершенно точным. С улучшением характеристик улучшается и качество глаза. Ограничения полосы пропускания и равномерности АЧХ сказываются значительно меньше при использовании дискретизатора с полосой 33 ГГц и частотой дискретизации 100 Гвыб./с, что демонстрирует важность применения точного и чувствительного дискретизатора.

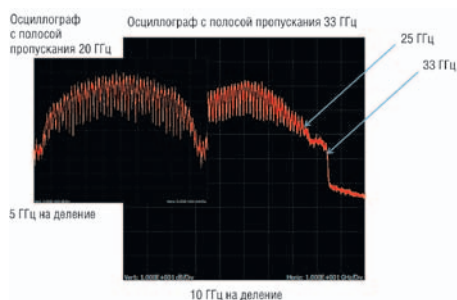


Рис. 4. Широкая полоса позволяет заметить ограничения модулятора и возбудителя

Преимущество сочетания широкополосного дискретизатора с когерентным анализатором заключается в том, что оно позволяет выявлять «узкие места» в оптических системах передачи. На рис. 4 показано другое представление полосы пропускания, в данном случае — спектр сигнала. При 20 ГГц ограничения модулятора и его возбудителя незаметны, поскольку полоса самого осциллографа дает существенный вклад в эти ограничения. Однако при 33 ГГц хорошо заметна точка, в которой начинается спад сигнала, поскольку полоса дискретизатора и оптического приемника уже не оказывает существенного влияния.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ПЕРЕДАТЧИКА ПО КОНСТЕЛЯЦИОННОЙ ДИАГРАММЕ

Когерентный анализатор оптических сигналов охватывает широкий диапазон измерений, позволяющих выявлять причины проблем и находить источники возникновения искажений. Одним из наиболее полезных измерений является измерение искажений передатчика, включая амплитуду вектора ошибки, добротность и фазовый угол, с использованием констеляционной диаграммы.

В сущности, амплитуда вектора ошибки является аналоговой мерой того, что в последствии становится цифровым сигналом. Как показано на рис. 5, исследование детектируемых символов и измерение их расстояния от идеального положения позволяет оценить амплитуду вектора ошибки. Получен-

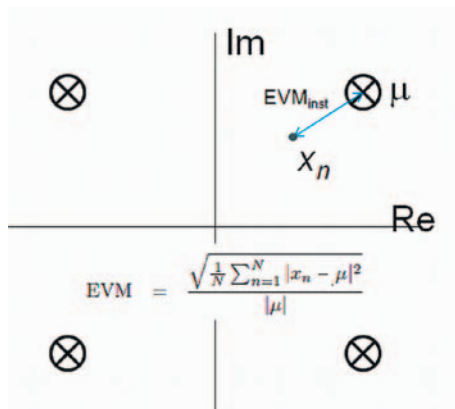


Рис. 5. Измерение искажений передатчика по констеляционной диаграмме с использованием амплитуды вектора ошибки (EVM)

ный результат можно представить средним значением или функцией зависимости от времени. Преимущество измерения амплитуды вектора ошибки заключается в том, что вам не нужен шаблон, как в случае добротности.

С другой стороны, добротность, как показано на рис. 6, дает куда более реалистичное и детальное представление символов. Когда мы рассматриваем добротность, система перемещает порог принятия решения и подсчитывает битовые ошибки, возникающие в результате перемещения этого порога. Графики добротности, имеющие форму перевернутой буквы «U», используются для индикации синфазных и квадратурных компонентов когерентно модулированного сигнала. График добротности предоставляет не только прогнозируемые значения коэффициента битовых ошибок, но и является уникальной мерой качества глаза, выраженного в виде коэффициента добротности. Это позволяет быстро выявить искажения в полосе пропускания, устраняемые за счет оптимизации добротности.

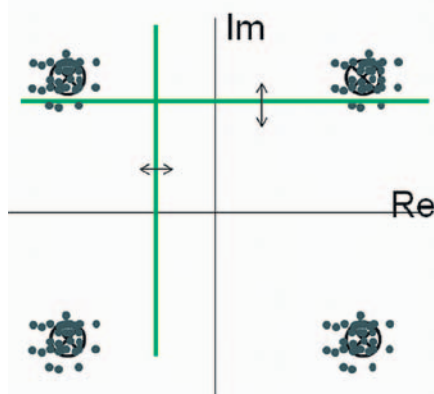


Рис. 6. Измерение искажений передатчика по констеляционной диаграмме с использованием коэффициента добротности

Другим измерением, помогающим выявлять причины искажений, является измерение фазового угла констеляционной диаграммы, который можно точно определить с помощью калиброванного прибора. На рис. 7 показан фазовый угол 76 градусов между синфаз-

ной и квадратурной составляющей модулированного сигнала, который сравнивается с идеальным углом 90 градусов. Подобный этому сигнал не показал бы ошибок в последовательном сценарии. Однако по мере увеличения шума число ошибок будет возрастать быстрее, чем в случае более точной настройки системы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когерентный анализатор оптических сигналов позволяет инженерам анализировать и оптимизировать оптические сети передачи данных, использующие расширенные методы модуляции, такие как DP-QPSK. Такой анализатор можно применять для измерения параметров констеляционной диаграммы, ортогональности и смещения модулятора, маскирования символов, амплитуды вектора ошибок, амплитудного и фазового спектра, зависимости коэффициента битовых ошибок и добротности от

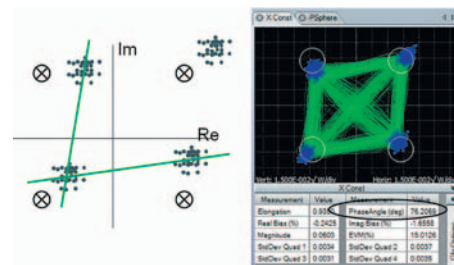


Рис. 7. Измерение искажений передатчика по констеляционной диаграмме — фазовый сдвиг 76 градусов демонстрирует неточную настройку, которая с ростом шума может привести к возникновению ошибок

порога принятия решения. Такой диапазон точного и воспроизводимого анализа экономит время и позволяет работать с системой техникам и инженерам с разным уровнем знаний и подготовки.

По мере перехода технологий 100G из исследовательских лабораторий в серийное производство, автоматизированное тестирование, ставшее возможным за счет применения когерентных анализаторов сигналов, приобретает все большее значение. Другие возможности анализатора сигналов включают тестирование алгоритмов выравнивания АЧХ, восстановления фазы и оценку влияния ограничения полосы пропускания на характеристики передатчика, дискретизатора и приемника.

*The rapid growth of high-bandwidth applications like on-demand video and cloud-based services conspire to make carrying capacity an absolute top priority. A coherent lightwave signal analyzer allows engineers to understand and optimize optical networks that use advanced modulation such as DP-QPSK.*