

Показатели качества сигналов со сложной модуляцией — задачи стандартизации

Оливер ФУНКЕ (Oliver FUNKE)

Широкое распространение сложных схем модуляции в оптических системах связи, особенно в магистральных сетях, и создание нового контрольно-измерительного прибора — анализатора оптической модуляции — расширило диапазон параметров, используемых для определения качества сигналов со сложной модуляцией, и стандартизованные условия тестирования.

Прежде чем новые параметры или методы получат широкое признание, нужно доказать, что прежние методы имеют серьезные ограничения или вообще не работают. Затем следует стандартизировать новый метод или параметр и условия, необходимые для его измерения. В некоторых случаях, когда новый показатель качества дает явные преимущества за счет простоты применения и удешевления измерений, стандартизация закрепляет его как уже общепризнанный и получивший широкое распространение.

В этой статье мы анализируем, нужен ли новый параметр для оценки качества сложной модуляции, и исследуем необходимые шаги для его повсеместного принятия и стандартизации.

Нужен ли новый показатель качества сигналов со сложной модуляцией?

В обычной схеме модуляции с амплитудной манипуляцией мы используем для кодирования информации лишь один параметр — амплитуду оптического сигнала. В сложных схемах модуляции обычно добавляется еще один параметр — фаза. Схема

модуляции QPSK представляет собой специальный случай, в котором информация кодируется только по фазе несущей, но сигнал по-прежнему представлен двумя параметрами. (Поскольку двойная поляризация скорее подобна дополнительному каналу передачи, чем третьему параметру модуляции, мы не будем считать ее третьим параметром.) Такое двумерное кодирование уже дает ответ на вопрос: «Нужен ли новый показатель качества сигналов со сложной модуляцией?»

Прежде чем перейти к глубокому анализу этого вопроса, давайте взглянем, как обычно измеряются и анализируются сигналы с амплитудной манипуляцией, и рассмотрим ограничения, связанные с переносом этой концепции на сигналы со сложной модуляцией.

На рис. 1 показаны типичные параметры сигналов с амплитудной манипуляцией. Во многих случаях оценка коэффициента битовых ошибок (BER) выполняется на основе распределения шума в сегментах сигнала, соответствующих «1» и «0». Исходя из гауссовского распределения шума, можно определить добротность, которая непосредственно связана с предполагаемым значением BER. Кроме того, в качестве другого параметра, описывающего качество сигнала или системы, часто используется процент попаданий в маску. Стандарты на характеристики определяют конечное число допустимых попаданий в маску. Эта маска приводится в стандарте, и при этом стандартизируются факторы, влияющие на измерительный приемник, например фильтр Бесселя-Томпсона с определенной полосой пропускания на входе измерительного прибора.

Внимательно рассмотрев особенности «глазковой» диаграммы в применении к сигналу со сложной модуляцией, мы сразу же заметим, что, в сущности, они не являются реально сравниваемыми измерительными концепциями. Давайте начнем с сигнала QPSK, применяемого в современных систе-

мах передачи 100 Гбит/с. На рис. 2 показана «глазковая» диаграмма сигнала QPSK. Она представляет собой проекцию сигнала на реальную или квадратурную ось, что дает две «глазковые» диаграммы сигнала со сложной модуляцией.

Например, мы видим, что переход от низкого уровня к высокому на рис. 2 (график 1) не позволяет сказать, является ли этот переход переходом от символа «01» к символу «11» или от символа «01» к символу «10», как показано на сигнальном созвездии. Для «глазковой» диаграммы Q (рис. 2) мы, естественно, наблюдаем ту же неоднозначность, что порождает сомнения в полезности «глазковой» диаграммы для оценки сигналов со сложной модуляцией.

В амплитудной манипуляции обычно определяют наилучший уровень принятия решения, изменяя этот уровень малыми шагами и рассчитывая для каждого шага добротность или BER. Минимальный BER соответствует оптимальному уровню принятия решения. Поскольку когерентный приемник «принимает решение» не на основе амплитудного порога, а в результате двумерного поиска ближайшего символа в сигнальном созвездии в определенный момент времени, роль «глазковой» диаграммы для измерения качества сигнала не столь очевидна.

Дополнительная сложность заключается в необходимости различать «глазковые» диаграммы проекций I и Q, что требует подробного документирования испытаний.

И наконец, давайте взглянем на рис. 3, показывающий результаты измерения модуляции 16-QAM [1]. Этот сигнал имеет неортогональное распределение точек сигнального созвездия, что повышает стойкость к искажениям в оптическом канале. Глядя на проектируемые оси такого сигнала, можно сразу сказать, что любая оценка качества сигнала по «глазковой» диаграмме будет неудачной.

Выполненный анализ показал, что мы не можем сохранить измерительные концеп-

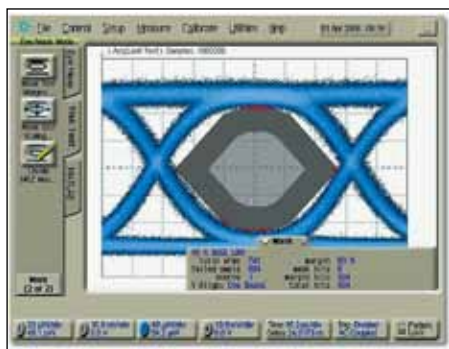


Рис. 1. «Глазковая» диаграмма сигналов с амплитудной манипуляцией

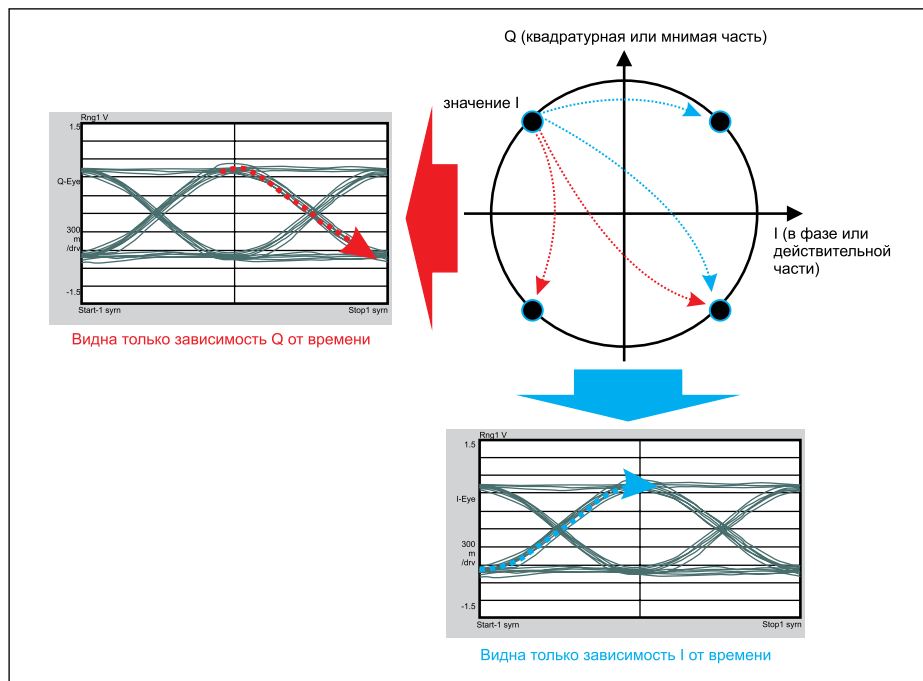


Рис. 2. «Глазковая» диаграмма сигнала QPSK

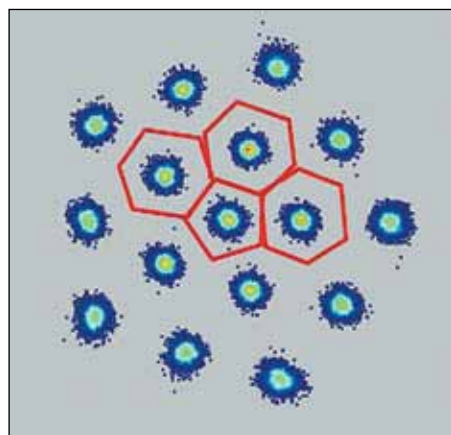


Рис. 3. Результаты измерения модуляции 16-QAM

ции, используемые для оценки амплитудной манипуляции, без серьезных ограничений, связанных:

- с наличием дополнительных параметров модуляции сложных сигналов по сравнению с амплитудной манипуляцией;
- с неоднозначностью «глазковых» диаграмм по отношению к проекциям на оси I и Q;
- с широким распространением модуляции QAM более высокого порядка, в которой практически отсутствует взаимосвязь между результатами и измеренными параметрами «глазковой» диаграммы.

Поскольку QPSK представляет собой особый случай с одним параметром модуляции, существует несколько подходов, переносящих концепции амплитудной манипуляции на сложную модуляцию. До определенного момента это может хорошо работать, но ограничения все же появятся.

Какковы альтернативы?

Оптическая связь удобна, поскольку в ней можно воспользоваться наработками мобильной связи, в которой похожие проблемы решены несколько десятилетий назад при переходе от чистой АМ и ЧМ к сложной модуляции для повышения скорости передачи данных.

В этой отрасли была принята концепция амплитуды вектора ошибки (EVM), которая широко используется в таких стандартах, как WLAN, и многих других. Она основана на очень простой идее.

Насколько принимаемый сигнал далек от идеального? Именно это и измеряет амплитуда вектора ошибки.

Причина широкого распространения этой концепции в радиосвязи кроется в том, что она преодолевает описанные выше ограничения.

Сравнивая измеренный сигнал с идеальным, мы можем выполнять это сравнение для любого числа уровней амплитуды и фазы в любых определенных нами точках сигнального созвездия. Это устраняет неоднозначность, поскольку каждая точка сравнивается с ближайшим идеальным «соседом». Неверная ассоциация приведет к такой же ошибке символа, как и в реальном приемнике.

Кроме того, эта концепция предполагает, что для определения принимаемого символа измерительный приемник должен измерять сигнал только в те моменты времени, когда это делает реальный приемник. Любая информация о переходе в этой концепции неинтересна. Конечно, ее можно расширить до измерений во время перехода, но это было бы полезно, если бы результаты сравнивались со стандартизированным переходом.

Другим важным аргументом является тот факт, что EVM, рассчитанную как среднеквадратическое значение статистически большого числа векторов, можно использовать для расчета добротности. Следовательно, EVM имеет такую же непосредственную связь с BER в тех же условиях, как и в случае амплитудной манипуляции, а именно в условиях гауссовского распределения шумов [2].

Основные факторы, влияющие на EVM

Как и для амплитудной манипуляции, основным требованием к испытаниям является наличие фильтра Бесселя-Томпсона в эталонном приемнике. Для приемников сложных сигналов можно указать и другие влияющие факторы, например:

- полоса пропускания приемника;
- АХЧ приемника;
- влияние приемника на сигнал, например фазовый сдвиг;
- шум;
- эффективная разрядность АЦП;
- искажения;
- алгоритм обработки сигнала.

Одним из важнейших параметров является полоса пропускания электрического тракта между рип-диодами и АЦП, включая, конечно, и сам АЦП.

На рис. 4 показано влияние полосы пропускания электрического тракта на результаты измерения EVM, полученные путем моделирования. Видно, что при изменении полосы от 22 до 25 ГГц EVM меняется примерно на 1% для сигнала QPSK, передаваемого со скоростью 28 Гбод.

Конечно, оценки влияния одного лишь параметра недостаточно. Фазовая ошибка, вносимая в результате несовершенства изготовления оптических гибридных схем для когерентных интрадинных приемников, является примером того, как оптические компоненты могут ухудшать параметры приемника. На рис. 5 показана смоделированная погрешность фазового угла оптической гибридной схемы IQ.

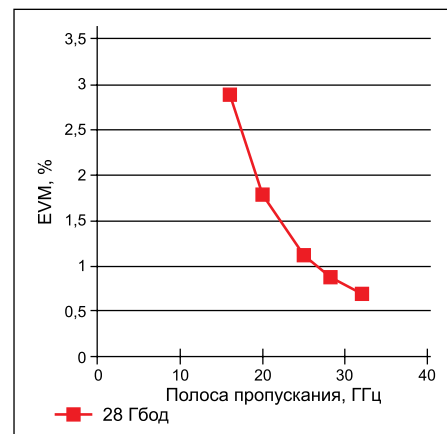


Рис. 4. Зависимость EVM от полосы пропускания

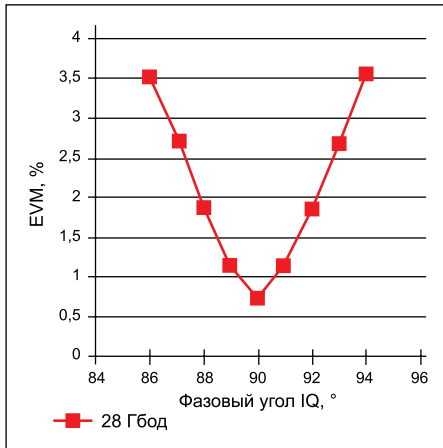


Рис. 5. Зависимость EVM от фазового угла IQ

В версии 1.1 соглашения OIF об интегрированных интрадинных приемниках допускается фазовый угол $\pm 5^\circ$ для оптических гибридных схем, что, согласно моделированию, соответствует погрешности EVM около 3%.

И наконец, следует упомянуть о том, что даже способ обработки сигнала, особенно отслеживания фазы, в когерентном оптическом приемнике может привести к различиям в результатах измерения EVM в пределах нескольких процентов или более для сигналов с большим фазовым шумом, вызванным передающим лазером.

Описанные выше примеры показывают, что применение EVM в качестве широко распространенного показателя качества может потребовать более четкой стандартизации, чем это было раньше.

Показатели качества оптических сигналов со сложной модуляцией требуют эталонно-

го сигнала, который должны предоставить институты стандартизации в качестве отслеживаемых образцов, либо комитеты стандартизации должны определить параметры для эталонного приемника, включая правила коррекции искажений и схему обработки сигналов. Эта схема обработки сигналов необязательно должна совпадать со схемой, используемой в стандартных телекоммуникационных приемниках, поэтому поставщики телекоммуникационного оборудования по-прежнему могут использовать собственные схемы обработки сигналов. Дополнительным преимуществом является то, что результаты тестирования оптических сигналов со сложной модуляцией, полученные на разном контрольно-измерительном оборудовании, можно будет сравнивать между собой.

В каком состоянии находится стандартизация EVM в оптической промышленности и что еще нужно?

Концепция EVM хорошо знакома производителям оптоэлектронного оборудования. Тем не менее она практически не используется для «стандартизации» качества оптических сигналов со сложной модуляцией и еще реже для оценки BER.

Одна из причин этого может быть в том, что без определенных условий для измерения EVM, подобных тестированию амплитудной манипуляции по маске с помощью фильтра Бесселя-Томпсона, трудно будет сравнивать результаты, полученные на разном измерительном оборудовании или встроенных измерителях телекоммуникационных приемников.

Чтобы найти выход из сложившейся ситуации, подкомитет «Оптоволоконные системы и активные устройства» МЭК SC86C начал работу в этом направлении. Он подготовил и распространил документ, в котором дано определение EVM, адаптированное к сфере оптической связи, и предлагаются система и условия для стандартизации измерений этого параметра. Кроме того, исследовательская группа ITU-T 15 тоже взялась за разработку этой темы для оценки телекоммуникационных передатчиков.

Пока у нас не будет определенного соглашения или стандарта на эталонный приемник для измерения EVM, аналогичного тому, что используется для оценки амплитудной манипуляции с помощью приемника с фильтром Бесселя-Томпсона, мы будем вынуждены учитывать ограничения, связанные с разными условиями измерения. Поэтому нужно довести до конца начатую работу.

В противном случае отсутствие возможности сравнения результатов, полученных изготовителями модулей и компонентов, с результатами, полученными поставщиками систем и услуг, может дать отрицательный экономический эффект. ■

Литература

1. Pfau T., Liu X., Chandrasekhar S. Optimization of 16-ary Quadrature Amplitude Modulation Constellations for Phase Noise Impaired Channels // ECOC Technical Digest. 2011.
2. Schmogrow R., et al. Error Vector Magnitude as a Performance Measure for Advanced Modulation Formats // IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 24, No 1. Jan. 1, 2012.