ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ В 2010-2025 гг.

А.В. ЛЕОНОВ, В.Н. ТРЕЩИКОВ, Р.Р. УБАЙДУЛЛАЕВ,
ООО «Т8 НТЦ»

Подробную информацию об авторах см. на сайте www.fotonexpres.ru раздел «Наши авторы»

ВВЕДЕНИЕ

В конце 2000-х гг. на смену традиционным системам связи с прямым детектированием оптического сигнала пришли системы связи с когерентным приёмом и цифровой обработкой принятого оптического сигнала («когерентные системы») [1]. Суть когерентного приёма состоит в том, что принятый из линии сигнал смешивается с излучением опорного лазера на близкой частоте. Разностный сигнал оцифровывается с помощью высокоскоростного аналого-цифрового преобразователя, после чего анализируется и обрабатывается на специализированном когерентном цифровом сигнальном процессоре (Coherent DSP). Это позволяет детектировать одновременно амплитуду и фазу сигнала для каждой из поляризаций.

Переход к когерентному приему открыл возможность применения многоуровневых амплитудно-фазовых форматов модуляции и соответствующего неограниченного повышения спектральной эффективности, рис.1, табл.1. Спектральная эффективность *SE* – число бит, которые могут быть переданы с использованием данного формата модуляции за одну секунду в спектральной полосе один герц, размерность бит/с/Гц:

$$SE = \frac{C}{W},$$

где *C*– битовая скорость передачи, размерность бит/с, *W* – отводимая спектральная полоса, размерность Гц.

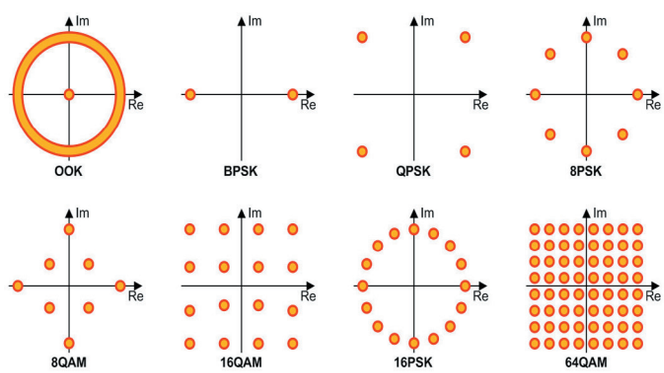

Рис.1. Диаграммы созвездий для различных форматов модуляции

Таблица 1. Значения спектральной и энергетической эффективностей для различных форматов модуляции

Формат модуляции	Спектральная эффективность, бит/с/Гц, *SE*	Энергетическая эффективность, η_P
NRZ-OOK	1	2
BPSK	1	4
DP-BPSK*	2	4
DP-QPSK	4	4
DP-8PSK	6	$6 - 3\sqrt{2} \approx 1.76$
DP-8QAM	6	$6 - 2\sqrt{3} \approx 2.54$
DP-16QAM	8	8/5 = 1.6
DP-16PSK	8	$8 - 4\sqrt{(2+\sqrt{2})} \approx 0.609$
DP-64QAM	12	$4/7 \approx 0.571$

** – в когерентных системах сигнал передается в двух поляризациях (Dual Polarization), таким образом число бит, передаваемых одним символом, удваивается по сравнению со случаем передачи в одной поляризации.*

При этом по мере увеличения числа точек в созвездии уменьшается энергетическая эффективность, что снижает устойчивость передаваемого сигнала к помехам, табл. 1. Добавление поляризации не ведет к уменьшению энергетической эффективности. Энергетическая эффективность – безразмерная величина, которая определяется как отношение квадрата минимального расстояния между точками в созвездии (на фазовой диаграмме сигнала) к средней передаваемой энергии сигнала в расчете на один бит:

$$\eta_P = \frac{d_{min}^2}{E_S / \log_2 M} = \frac{d_{min}^2}{E_b}$$

Здесь d_{min} – минимальное расстояние между точками созвездия, *M* – число точек созвездия (число различных возможных символов), E_S и E_P– средние энергии, приходящиеся на один символ и на один бит передаваемого сигнала, соответственно.

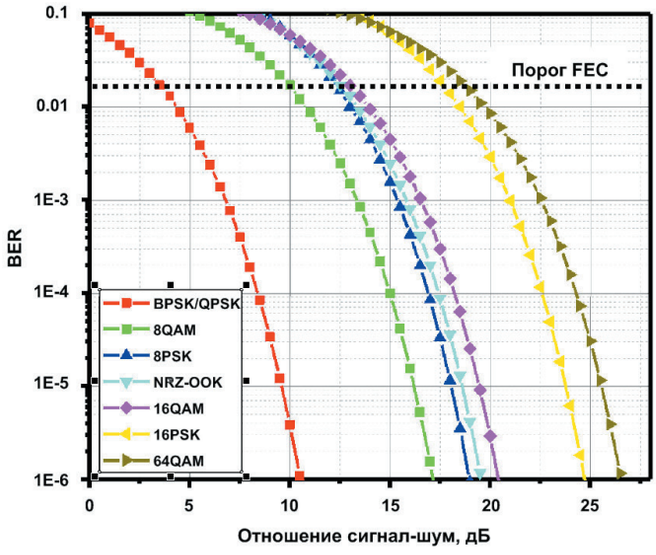

Рис.2. Теоретическое значения BER до отработки механизма коррекции ошибок для разных форматов модуляции

На рис.2 приведены зависимости коэффициента ошибок от отношения сигнал-шум для разных форматов модуляции. Важным для работоспособности линии связи является критический уровень битовых ошибок $BER_0 \sim 2 \cdot 10^{-2}$, порог для отработки механизма коррекции ошибок SoftFEC. Если коэффициент ошибок в непосредственно приходящем из линии сигнале меньше этого значения, то после коррекции ошибок на приемной стороне коэффициент ошибок (BER после FEC) становится практически нулевым, и линия работоспособна.

Из рис.2 видно, что переход к более сложному формату модуляции ведет к увеличению SNR, при котором BER достигает порогового значения. Это повышает требования и стоимость строительства протяженных DWDM-линий, поскольку приходится сокращать расстояния между усилительными пунктами, использовать волокно с меньшим затуханием и т.д. Так, увеличение критического SNR на 3 дБ ведет к уменьшению числа пролетов многопролетной DWDM-линии в 2 раза при прочих равных условиях (длины пролетов, характеристики оптического волокна, параметры эрбиевых усилителей). С другой стороны сокращение длины пролетов со 100 км до 50 км, при километрическом затухании 0.2 дБ/км позволяет перейти к системе с критически OSNR на 3.6 дБ больше, при сохранении прежней работоспособности.

В протяженных междугородних линиях связи когерентные системы имеют преимущество перед традиционными системами OOK с прямой модуляцией (как правило это системы передачи до 10 Гбит/с), поскольку, во первых, когерентные системы позволяю получить выигрыш в 3 дБ, за счет того, что сигнал передается сразу в двух поляризациях, во-вторых, когерентные системы не требую установки промежуточных физических компенсаторов, в третьих, позволяют увеличивать пропускную способность, переходя на более высокие амплитудно-фазовые форматы модуляции.

Вероятнее всего на последней миле и в сетях доступа сохранится экспоненциальный рост, который шел в последние 10 лет, рис. 3. Это связано с высоким темпом увеличения двухстороннего трафика между дата-центрами и ЦОДами, а также увеличением нисходящего трафика к абонентам, причем не из-за роста какой-то одной услуги, а по совокупности используемых услуг. Когерентные системы связи в этой сфере также начинают приобретать конкурентные преимущества. Так волоконно-оптическая система “точка-точка” с расстоянием между транспондерами до 75 км и более может обходится без использования эрбиевых усилителей. Это позволяет «забыть» про отношение сигнал-шум – транспондеры между собой соединяются по выделенной паре волокон без использования мультиплексоров. Поскольку нет EDFA, то не аккумулируется и ASE-шум. Так построенная когерентная система передачи может работать с любым форматом модуляции, начиная с QPSK и допуская апгрейд до 64QAM/256QAM.

На протяжении последних десяти лет когерентные системы прошли несколько этапов своего развития, начиная с первых систем со скоростью передачи 40 Гбит/с по одной длине волны (символьная скорость 20 Гбод, формат модуляции DP-BPSK) и до наиболее современных разрабатываемых систем со скоростью передачи 600 Гбит/с по одной длине волны (символьная скорость 56 Гбод, формат модуляции DP-64QAM). Таким образом, примерно за 10 лет символьная скорость в коммерческих когерентных системах выросла почти в 3 раза, а символьная эффективность – в 6 раз, что обеспечило рост скорости передачи по одной длине волны в 15 раз.

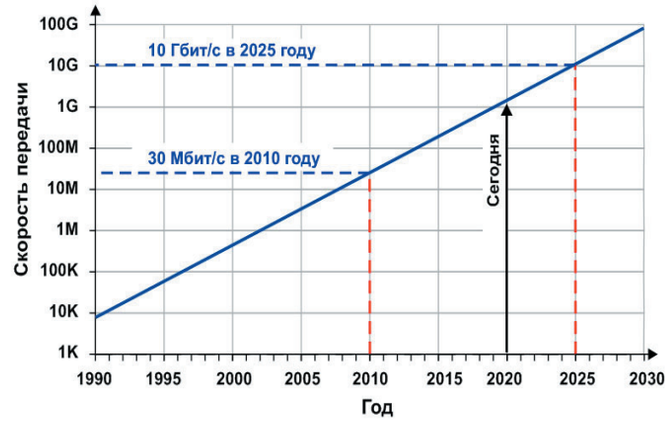

Рис.3. Экспонециальный рост сервисныхуслуг в расчете на одного абонента, [2] (обозначения:K–Кбит/с, M–Мбит/с, G–Гбит/с)

В то же время, усложнение формата модуляции неизбежно ведет к падению дальности. Чем больше дискретных состояний оптического сигнала используется – тем выше символьная эффективность кодирования (т.е. число бит, кодируемых одним состоянием сигнала), но при этом ниже устойчивость системы к помехам, и соответственно ниже дальность передачи (при фиксированной максимальной амплитуде сигнала).

Поэтому использование более сложных форматов модуляции, с одной стороны, позволяет кратно увеличить скорость передачи информации по одной оптической несущей (при той же символьной скорости, т.е. тактовой частоте модуляции), но с другой стороны, ведёт к кратному падению дальности передачи.

Дальность передачи не менее важна для операторов связи, чем скорость передачи по одной длине волны. Поэтому современные когерентные системы поддерживают возможность выбора формата модуляции, благодаря чему оператор может настроить оптимальный для своих задач баланс между дальностью и скоростью передачи данных. Максимальная удельная производительность (произведение спектральной эффективности на дальность передачи) достигается в системах 100 Гбит/с с модуляцией DP-QPSK [3,4].

1. ОБЗОР РАЗВИТИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМ

Первыми появились когерентные системы со скоростью передачи 40 Гбит/с (символьная скорость 20 Гбод, формат модуляции DP-BPSK), но они не получили широкого распространения.

В 2012-2013 гг. началось широкое внедрение когерентных коммерческих систем с символьной скоростью около 30 Гбод и форматом модуляции DP-QPSK. Формат модуляции DP-QPSK имеет символьную эффективность 4 бита/символ, что при символьной скорости 30 Гбод обеспечивает скорость передачи полезной информации до 100 Гбит/с на оптическую несущую (с учетом некоторой избыточности, необходимой для реализации механизмов коррекции ошибок). Для передачи 30 Гбод в системах с фиксированной канальной сеткой используется полоса 50 ГГЦ, таким образом, для таких систем *SE*=2 бит/с/Гц.

С 2015 г. началось коммерческое внедрение нового поколения когерентных систем (так называемые «400G»), в которых максимальная скорость передачи составляла 200-250 Гбит/с на оптическую несущую 50 ГГц, при этом использовалось две несущих для достижения психологически важной цифры «400 Гбит/с». В этих системах использовались модуляторы с возможностью гибкого выбора формата модуляции (DP-BPSK, DP-QPSK, DP-8QAM, DP-16QAM и т.д.) и символьной скоростью 30 Гбод либо 45 Гбод. Таким образом, в коммерческих системах с фиксированной канальной сеткой была достигнута *SE*=4-5 бит/с/Гц (200-250 Гбит/с в 50 ГГц). В 2016-2017 гг. некоторые производители продемонстрировали также системы 400 Гбит/с с символьной скоростью 45 Гбод.

В некоторых системах поддерживается также возможность гибкой настройки спектральной полосы, занимаемой оптическим каналом (FlexGrid), при этом, например, занимаемая спектральная полоса для сигнала с символьной скоростью 30 Гбод может быть сокращена до 37,5 ГГц. Это позволяет дополнительно повысить спектральную эффективность систем, но требует замены мультиплексоров в промежуточных узлах сети, что на практике сильно ограничивает применение таких решений.

В 2018 г. появились системы с символьной скоростью 56 Гбод, что позволяет достичь скорости передачи по одной несущей от 100 до 600 Гбит/с. В сетях с фиксированной канальной сеткой канал 56 Гбод занимает полосу 100 ГГц, при использовании гибкой настройки спектральная полоса для такой символьной скорости может быть сокращена до 75 ГГц и меньше. В коммерческих системах с символьной скоростью 56 Гбод в 2018 г. была реализована скорость передачи данных до 400 Гбит/с по одной длине волны (модуляция DP-16QAM), в разработке находятся системы до 600 Гбит/с по одной длине волны (модуляция DP-64QAM). При использовании двух несущих, в таких системах может быть достигнута скорость передачи данных до 1.2 Тбит/с, что позволяет назвать их «терабитными системами».

2. МАРКЕТИНГОВЫЕ АСПЕКТЫ В РАЗВИТИИ КОГЕРЕНТНЫХ СИСТЕМ

Анализ этапов развития когерентных систем обнаруживает любопытную взаимосвязь технических решений с психологией. Развитие сетей SDH, а после и других стандартов (ATM, OTN) на протяжении более чем 20 лет сформировало у технических специалистов и руководителей разных уровней устойчивую привычку к тому, что при переходе к новому поколению магистральных систем связи скорость передачи возрастает четырехкратно. Так, скорость в сетях SDH возрастала последовательно от 155 Мбит/с (STM-1) до 40 Гбит/с (STM-256), с 4-кратным ростом на каждом шаге. Аналогичная картина наблюдалась в сетях OTN (2.5, 10, 40 Гбит/с), которые явились логическим развитием подходов и стандартов SDH.

Прекращение развития SDH-сетей на уровне 40 Гбит/с и переход к когерентным системам на основе OTN со скоростью 100 Гбит/с, казалось бы, сломал привычную закономерность. Однако в качестве следующего шага производителями оборудования был снова анонсирован

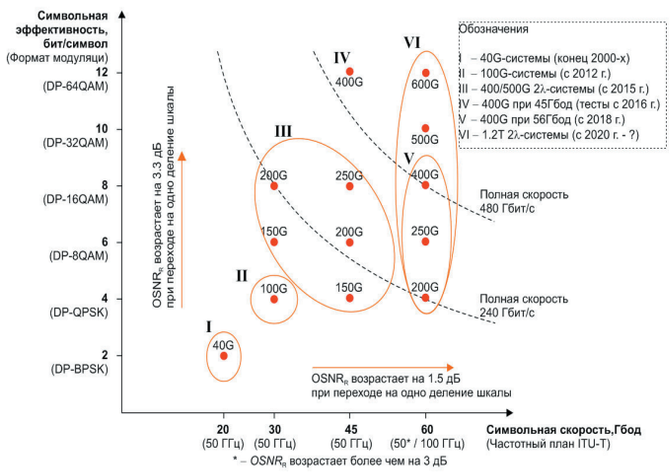

Рис.4. Основные этапы развития когерентных систем

4-кратный рост и переход к скорости передачи 400 Гбит/с. Технические сложности не позволили осуществить этот скачок в заявленные сроки, но разогретые ожидания заказчиков и давление на технических специалистов со стороны маркетинговых служб привели к парадоксальному результату: производители систем связи массово вывели на рынок когерентные системы, использующие две длины волны со скоростью 200-250 Гбит/с в каждой, позиционируя их как системы «400 Гбит/с». Таким образом, техническое решение было продиктовано не логикой развития техники, а привычками заказчиков и потребностями маркетинга (т.е. задачами завоевания или удержания рынка за счет соответствия ожиданиям заказчиков), рис.4.

Опыт использования двух несущих оказался успешен, и следующее поколение систем связи также, скорее всего, будет основано на этом подходе (две несущие по 600 Гбит/с). При этом будет не только достигнут очередной психологически важный рубеж (1 Тбит/с), но и естественным образом продолжено развитие заложенных на предыдущем этапе технических решений. Таким образом, ожидания заказчиков по увеличению скорости в 4 раза на каждом шаге развития магистральных систем, сформированные более чем за два десятка лет, оказали существенное влияние на техническую политику производителей и привели к появлению целой ветки развития систем связи на основе двух оптических несущих.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В развитии когерентных систем в 2010-2025 гг. можно выделить шесть основных этапов: (I) 40-гигабитные системы, (II) 100-гигабитные системы, (III) системы «400 Гбит/с» с использованием двух несущих, (IV) системы 400 Гбит/с на одной несущей 45 Гбод, (V) системы 400 Гбит/с на одной несущей 56 Гбод, (VI) перспективные терабитные системы.

На первом этапе, в 40-гигабитных системах (I) была апробирована технология когерентного приема в коммерческих системах связи и подтверждена ее эффективность. На втором этапе, широкое коммерческое применение получили 100-гигабитные системы (II), которые на сегодняшний день составляют основу скоростных систем связи во всем мире. Эти системы обладают максимальной удельной производительностью [3,4], которая не превзойдена и по сей день.

После этого планировался переход к скорости передачи 400 Гбит/с по одной несущей, но это оказалось технически гораздо сложнее, чем представлялось на первый взгляд. Поэтому в качестве промежуточного решения были созданы системы «400 Гбит/с», реализованные с использованием двух несущих (III). Несмотря на существенное падение дальности передачи по сравнению со 100-гигабитными системами, системы «400 Гбит/с» нашли свою нишу в региональных и городских сетях и успешно применяются в настоящее время, в том числе и в России.

Попытки реализовать системы 400 Гбит/с по одной несущей на символьной скорости 45 Гбод (IV) не увенчались коммерческим успехом. Системы 400 Гбит/с на одной несущей на символьной скорости 56 Гбод (V) оказались более удачными, хотя оба этих класса систем (IV и V) выглядят скорее промежуточной отработкой технических решений, которые должны получить широкий коммерческий успех на следующем шаге. Таким шагом должно стать появление в 2020 году систем терабитного класса, реализованных с использованием двух несущих со скоростью передачи до 600 Гбит/с в каждой, с символьной скоростью 56 Гбод (VI).

ЛИТЕРАТУРА

1. Трещиков В.Н., Листвин В.Н. DWDM-системы. Третье издание, исправленное и дополненное.– М.: Техносфера, 2017.

2. Z. Jia, L.A Campos et al. "Digital Coherent Transmission for Next-Generation Cable Operators' Optical Access Networks", SCTE/ISBE and NCTA 2017, P.1 43.

3. Leonov A.V., Konyshev V.A. From the revolution to the evolution: the change in the character of development of fiber optic communications technology – And the Record Performance of 100 Gbit/s Systems as a Marker of this Change // Proc. of 2017 International Workshop on Engineering Technologies and Computer Science. – 2017. – P. 34-36.

4. Конышев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Рекордная производительность систем 100G как маркер перехода к эволюционному развитию ВОСП // Первая миля. 2015. № 6. С. 40-43.