

Производительность когерентных DWDM-систем с канальной скоростью 100 Гбит/с*

Н.В. ГУРКИН, инженер ООО “Т8”, кандидат технических наук, О.Е. НАНИЙ, заведующий отделом, профессор физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, доктор физико-математических наук, В.Н. ТРЕЩИКОВ, генеральный директор, кандидат физико-математических наук, Р.Р. УБАЙДУЛЛАЕВ, инженер, кандидат физико-математических наук

При использовании формата DP-QPSK и коррекции ошибок на основе алгоритмов мягкого принятия решений SoftFEC с избыточностью 20 % достигнуто рекордно низкое значение требуемого OSNR в транспондерах 100 Гбит/с равное 12,5 дБ. Максимальное значение накопленной дисперсии составляет 70 000 пс/нм. Максимальная емкость 88-канальной DWDM-системы на основе транспондера 100 Гбит/с “Волга” — 8,8 Тбит/с.

Оптические схемы передатчика и приемника когерентной системы связи с канальной скоростью 100 Гбит/с на основе формата DP-QPSK приведены на рис. 2.

Транспондеры, использующие такую технологию, обеспечивают передачу оптических сигналов без регенерации и оптической компенсации дисперсии на расстояние от 1000 до 3000 км по стандартному волокну G.652 в сетке 50 ГГц в линиях с несколькими ROADMs. Спектральная эффективность таких систем равна 2 бит/с/Гц.

При использовании совместно с указанными технологиями мощного алгоритма коррекции ошибок Super-FEC G.975.1.7 и улучшенных алгоритмов автоматической электронной коррек-

ции дисперсии дальность передачи удалось увеличить до 4000 км (электронная компенсация накопленной дисперсии составляет 70000 пс/нм) [6]. Запас по OSNR на выходе линии 4000 км составил 5,5 дБ, что позволяет оценить максимальную дальность безрегенерационной передачи на уровне 8000 км.

Таким образом, производительность систем связи на основе транспондеров, реализующих формат DP-QPSK, составляет 70,4 Пбит/с x 1 км: 8,8 Тбит/с x 8000 км. При этом используется только традиционный C-диапазон и сетка DWDM с шагом 50 ГГц.

Увеличить пропускную способность DWDM-системы на основе формата DP-QPSK при сохранении канальной скорости 100 Гбит/с можно, увеличив рабочий диапазон спектра и/или уменьшив шаг в DWDM-сетке до 33 ГГц. По нашим оценкам, при использовании двух этих возможностей (диапазоны C+L, шаг 33 ГГц) емкость DWDM-системы можно довести до 25 Тбит/с при дальности порядка 4000 км. В результате производительность DWDM-системы составит 100 (Пбит/с) x км.

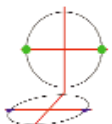
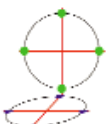
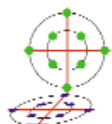
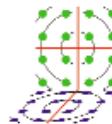

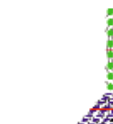
Системы передачи с канальной скоростью 200 и 400 Гбит/с

Наряду с внедрением систем передачи с канальной скоростью 100 Гбит/с ведутся научные исследования путей увеличения канальной скорости до 200 и 400 Гбит/с. Наиболее перспективными форматами для этих скоростей передачи считаются многоуровневые квадратурные форматы mQAM с когерентным детектированием.

Недавно в лабораторном эксперименте была продемонстрирована передача со скоростью 200 Гбит/с с использованием формата DP-16QAM. Спектральная эффективность такого формата 8 бит/с/Гц и для передачи 200 Гбит/с, в зависимости от используемой техники коррекции ошибок (FEC), требуется символьная скорость от 28 до 32 Гбод. Однако энергетическая эффективность формата DP-16QAM на 4 дБ меньше, что не позволяет сохранить дальность безрегенерационной передачи, характерной для систем связи на основе формата DP-QPSK. Сравнительные характеристики многоуровневых форматов с поляризационным мультиплексированием приведены в табл. 1.

Таблица 1

Уменьшение энергетической эффективности (штраф по OSNR) многоуровневых форматов модуляции относительно формата DP-DPSK. Штраф равен 0 только для формата DP-QPSK

Формат модуляции	DP-DPSK	DP-QPSK	DP-8QAM	DP-16QAM	DP-32QAM	DP-64QAM
бит/символ	2x1	2x2	2x3	2x4	2x5	2x6
Сигнальное созвездие						
Штраф по OSNR, дБ	0	0	2	4	6	8,5

* Окончание. Начало в ВС № 1, 2013 г.

Из рис. 1 и табл. 1 видно, что с увеличением числа символов расстояние между ними в евклидовом пространстве быстро сокращается. К сожалению, это приводит к значительному ухудшению энергетической эффективности формата, т. е. возрастает чувствительность к шумам и требуемый OSNR. В табл. 2 приведены теоретические значения штрафа по OSNR при передаче информации с одинаковой скоростью [7]. Необходимость увеличивать отношение сигнал-шум для увеличения спектральной эффективности следует из знаменитой формулы Шеннона, которую можно записать в следующем виде:

$$SE = B/\Delta f = \log_2[1 + (P_S/P_N)], \quad (3)$$

где Δf — полоса частот, занимаемая информационным каналом, B — пропускная способность канала, (P_S/P_N) — отношение мощности сигнала к среднеквадратичному значению мощности шума [8]. Переход к каналным скоростям более 200 и 400 Гбит/с сопровождается быстрым увеличением требуемого OSNR в системе передачи. Это иллюстрирует табл. 2.

В табл. 2 дан обзор форматов, предназначенных для реализации канальной скорости 200 и 400 Гбит/с, которые сравниваются с форматом DP-QPSK при канальной скорости 100 Гбит/с. Все форматы используют поляризационное мультиплексирование (DP). Минимальная символьная скорость 28 Гбод соответствует 7 % дополнительного кода, необходимого для реализации 2-го поколения FEC, а максимальная скорость соответствует 20 % дополнительного кода, используемого для реализации нового поколения FEC с мягким принятием решений.

Заключение

Начавшаяся не так давно и продолжающаяся модернизация сетей связи в России характеризуется увеличением скорости передачи информации с 10 до 40 и 100 Гбит/с. В процессе перехода на более высокие канальные скорости (вплоть до 100 Гбит/с) удалось сохранить используемую в течение десятилетий кабельную инфраструктуру, спектральную сетку и не увеличивать количество промежуточных регенераторов. Такой экономически очень эффектив-

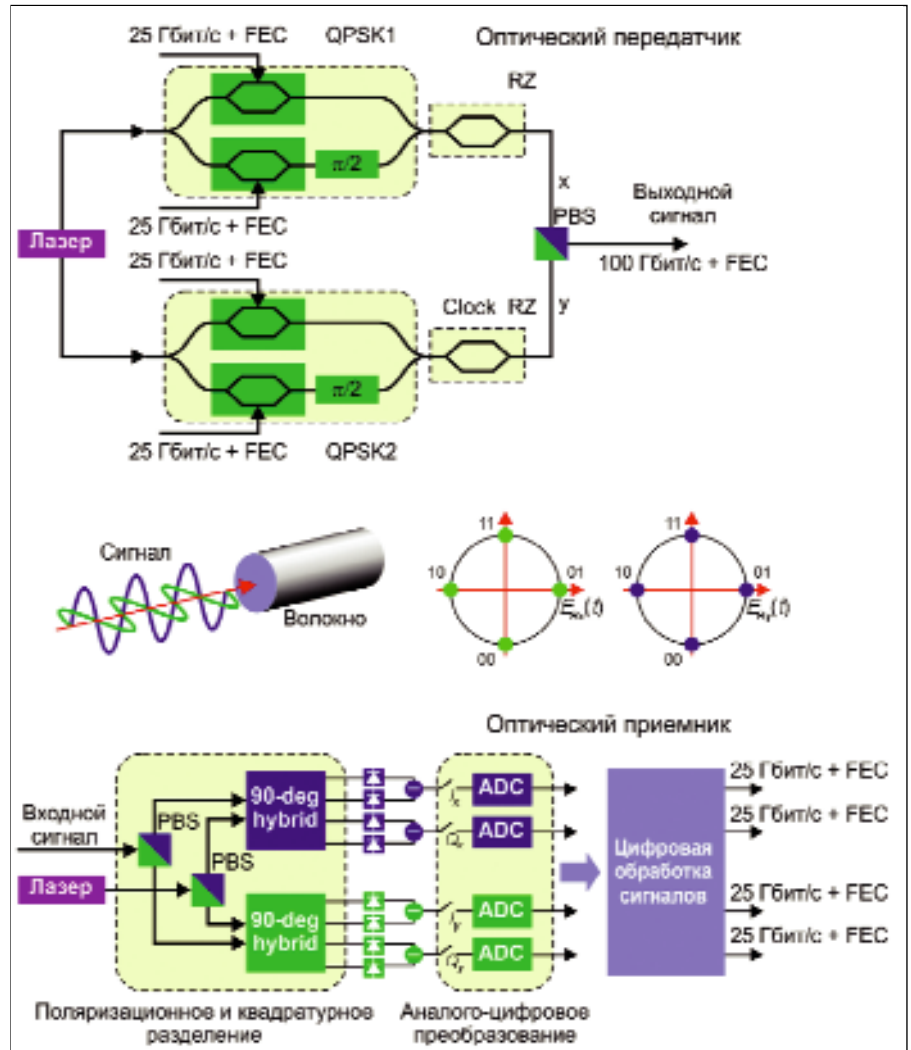


Рис. 2. Схемы оптического передатчика и приемника в системе передачи 100 Гбит/с DP-QPSK с когерентным приемом



Таблица 2

Обзор вариантов реализации систем передачи со скоростями 200 и 400 Гбит/с на основе различных форматов модуляции

Формат модуляции	DP-QPSK	DP-QPSK	DP-8QAM	DP-16QAM	DP-32QAM	DP-QPSK	DP-8QAM	DP-16QAM	DP-32QAM
Скорость передачи, Гбит/с	100	200	400						
Символьная скорость, Гбод	28 — 32	56 — 64	38 — 43	28 — 32	22 — 26	112 — 128	75 — 85	56 — 64	45 — 51
Бит/символ	4	4	6	8	10	4	6	8	10
Межканальный интервал, Гц	50	100	50	50	50	200	150	100	100
SE, бит/с, Гц	2	2	4	4	4	2	2,7	4	4
Количество каналов в С-диапазоне	88	44	88	88	88	22	30	44	44
Полная емкость, Тбит/с	8,8	8,8	17,6	17,6	17,6	8,8	12,0	17,6	17,6
OSNR min, дБ	12,2	15,2	17,2	19,2	21,2	18,2	20,2	22,2	24,2
Штраф по отношению к 100G	0	3	5	7	9	6	8	10	12

ный результат получен благодаря разработке и внедрению новых форматов модуляции, которые позволяли увеличивать битовую скорость без уменьшения энергетической эффективности.

В результате был создан наиболее оптимальный формат DP QPSK, который обладает наибольшим теоретическим значением производительности и обеспечивает передачу информации до 10 Тбит/с на расстояние до 4000 км с канальной скоростью 100 Гбит/с. Поскольку в формате DP QPSK используются все четыре степени свободы светового пучка, которые обеспечивают символьную эффективность 4 бит/с/Гц, то дальнейшее увеличение канальной скорости может быть достигнуто двумя

путями: увеличением символьной скорости либо увеличением числа уровней m формата DP-mQAM.

Литература

1. Редюк А.А. и др. Математическое моделирование экспериментально прототипов высокоскоростной линии связи на основе дифференциально-фазового формата модуляции безвозвращения нулю // Квантовая электроника — 2011. — Т. 41, № 10. — С. 929—933.
2. Наний О.Е., Трещиков В.Н. Российское оборудование DWDM с канальной скоростью 40G и 100G // Вестник связи — 2011. — № 4. — С. 52—53.
3. Наний О.Е., Новиков А.Г., Плоцкий А.Ю., Трещиков В.Н., Убайдуллаев В.Р. Характеристики многопролетной системы DWDM кана-

лами 40 Гбит/с DPSK в сетке 50 ГГц // Электросвязь—2012.—№ 5.

4. Наний О.Е., Трещиков В.Н. Анализ форматов модуляции для систем DWDM со скоростью 40 Гбит/с // Вестник связи — 2012. — № 1. — С. 35—38.
5. Lach E., Idler W. Modulation formats for 100G and beyond // Optical Fiber Technology 17 (2011) 377—386.
6. Гуркин Н.В., Наний О.Е., Новиков А.Г., Трещиков В.Н. Передача DWDM-сигнала // Вестник связи — 2012. — № 8. — С. 25—27.
7. Zyskind J., Srivastava A. Optically Amplified WDM Networks. Academic Press, Amsterdam, the Netherlands (2011).
8. Shannon C.E. A mathematical theory of communication // Bell. Syst. Tech. J. — 27, (1948) 379—423.