

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФОРМАТОВ МОДУЛЯЦИИ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ DWDM

**А.Леонов**, д.т.н., заместитель генерального директора ООО "Т8 НТЦ",  
**О.Наний**, д.ф.-м.н., профессор МГУ им. М.В.Ломоносова, Физический факультет, начальник отдела  
ООО "Т8 НТЦ" / naniy@t8.ru,  
**В.Трещиков**, к.ф.-м.н., генеральный директор ООО "Т8 НТЦ"

УДК 681.7.06, DOI: 10.22184/2070-8963.2019.85.8.30.36

Исследования в области новых форматов модуляции стимулируются поиском путей увеличения скорости передачи информации и снижения стоимости единицы переданной информации. Прямой путь – увеличение спектральной эффективности DWDM-систем связи и их пропускной способности при использовании многоуровневых форматов. В статье показана перспективность применения в линиях связи большой протяженности формата 8PolSK-QPSK, в котором используется один уровень энергии и сочетание поляризационной и фазовой модуляции. Для ВОЛС меньшей дальности передачи, для которых достижимы более высокие уровни OSNR на выходе линии, можно ожидать все более масштабное внедрение форматов nQAM.

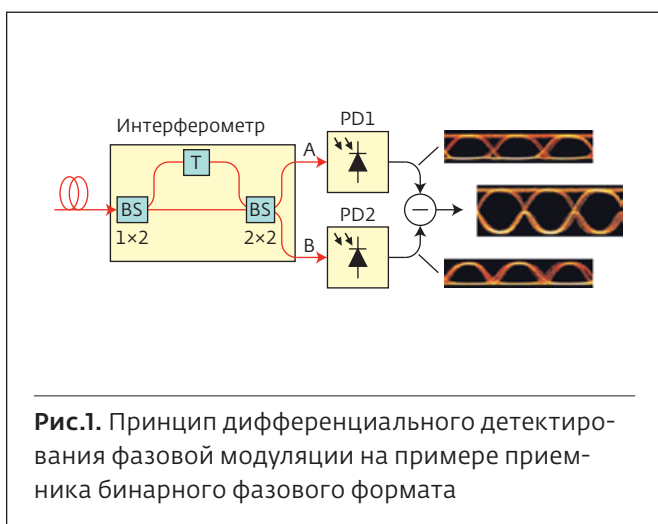
## ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ И НОВЫЕ ФОРМАТЫ МОДУЛЯЦИИ

Оптические линии и системы связи с момента своего появления непрерывно совершенствовались и прошли большой путь развития. В первых системах использовались передатчики с прямой модуляцией источников излучения, приемники с прямым детектированием (DMDD-системы), простейший бинарный амплитудный формат модуляции (ООК или Binary ASK) и регенераторы. В современных оптических системах дальней связи используются многоуровневые и многомерные векторные форматы модуляции, передатчики на основе узкополосных лазеров с внешней модуляцией, когерентное детектирование, плотное спектральное мультиплексирование (DWDM) и оптическое усиление [1, 2].

Одним из важнейших направлений дальнейшего развития оптических систем связи является совершенствование используемых и поиск новых

форматов модуляции, оптимальных для конкретных областей применений и параметров сетевой инфраструктуры. Действительно, различные области применения оптических систем связи предъявляют разные требования к используемым технологиям. Так, в системах дальней связи, обеспечивающих работоспособность опорных сетей передачи информации, ключевыми являются два параметра: максимальная скорость передачи информации по одному волокну и максимальная дальность безрегенерационной передачи информации. В локальных сетях, сетях доступа и сетях ЦОД наиболее важны экономичность и низкое энергопотребление. В системах дальней космической связи на первый план выходит энергетическая эффективность, надежность, а также малые размеры и вес оборудования.

В соответствии с различием в требованиях к аппаратуре систем связи для разных областей



**Рис.1.** Принцип дифференциального детектирования фазовой модуляции на примере приемника бинарного фазового формата

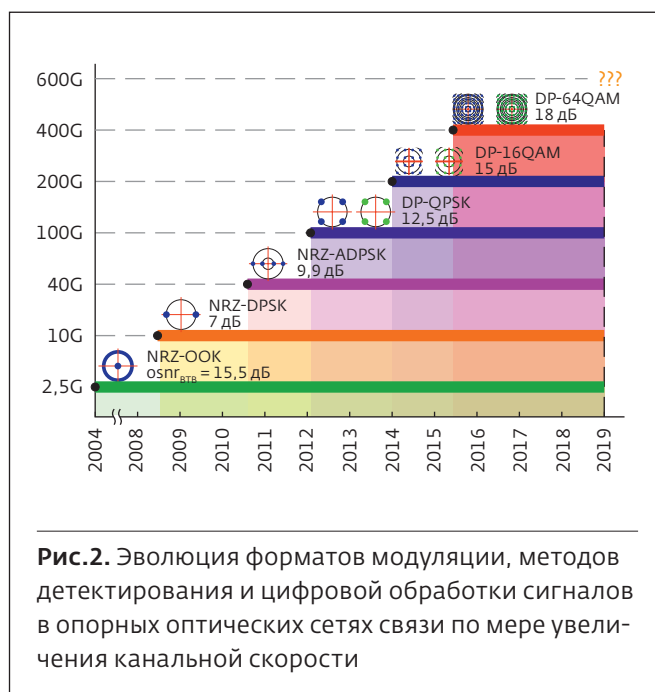
применения предпочтительными оказываются разные форматы, а также связанные с ними методы модуляции и детектирования. В данной статье представлен обзор направлений совершенствования форматов модуляции в оптических DWDM-системах для опорных сетей дальней связи.

### НОВЫЕ ФОРМАТЫ МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ОПОРНЫХ DWDM-СЕТЕЙ ДАЛЬНЕЙ СВЯЗИ

Наряду с расширением используемого спектрального диапазона и развитием систем пространственного мультиплексирования приоритетным направлением развития магистральных систем связи, призванным обеспечить непрерывный рост их пропускной способности, дальности работы и канальной скорости является разработка и коммерциализация новых спектрально эффективных форматов модуляции, в наибольшей степени стойких к воздействию шумов и нелинейных искажений.

Для систем дальней связи наибольший экономический эффект дает увеличение информационного потока, передаваемого по одному волокну на большое расстояние без регенерации. В прошлом обеспечивать рост производительности ВОЛС даже при использовании простейших форматов и методов детектирования, основанных на использовании модуляции мощности (формат ООК) и прямого детектирования (DD, в зарубежной литературе – IMDD), удавалось за счет увеличения канальной скорости вплоть до 10 Гбит/с, использования плотного спектрального мультиплексирования DWDM и эрбиевых волоконно-оптических усилителей EDFA [1-3].

Однако для того чтобы увеличить канальную скорость с 10 до 40 Гбит/с, потребовалось усовершенствовать формат модуляции и технологию



**Рис.2.** Эволюция форматов модуляции, методов детектирования и цифровой обработки сигналов в опорных оптических сетях связи по мере увеличения канальной скорости

детектирования из-за трудностей обеспечения требуемого роста технических характеристик в системах, использующих формат ООК и прямое детектирование. Хорошим промежуточным решением оказалось использование дифференциальных фазовых форматов модуляции (бинарных и четырехуровневых) в сочетании с дифференциальным фазовым приемником [4, 5] (рис.1). Технически детектирование возможно с использованием одного фотоприемника (либо в канале А, либо в канале В), однако эффективнее использовать балансный приемник. На двух детекторах балансного приемника формируются противофазные бинарные амплитудные электрические сигналы. Вычитая один из них из другого формируется дифференциальный сигнал с более высоким SNR, чем каждый из сигналов детекторов.

Но появление когерентных приемников с цифровой обработкой сигналов, которые в принципе позволяют реализовать все потенциальные возможности оптических систем связи и приблизить их пропускную способность к теоретическому пределу, практически полностью вытеснило из сетей дальней связи технологии, основанные на дифференциальном детектировании. Когерентный прием с цифровой обработкой не только позволяет реализовать поляризационное и квадратурное мультиплексирование, но также дает возможность компенсировать при цифровой обработке такие линейные искажения сигналов, как хроматическая и поляризационная модовая дисперсия (рис.2).

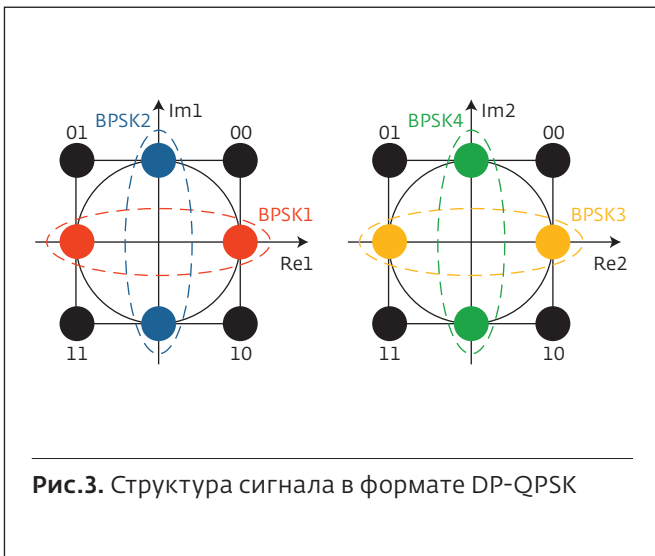


Рис.3. Структура сигнала в формате DP-QPSK

## ФОРМАТ DP-QPSK

Самым простым в реализации форматом, полностью раскрывающим возможности когерентных оптических систем связи, является формат, каждый передаваемый символ в котором содержит в каждой из 2-х поляризаций независимые фазово-модулированные сигналы с 4-мя значениями фазы. Для обозначения такого формата используется аббревиатура его английского названия – DP-QPSK (Dual Polarization Quarter Phase Shift Keying). Подчеркнем еще раз, что в формате DP-QPSK передаются 4 бита информации при использовании только одного уровня мощности сигнала. Структура сигнала в формате DP-QPSK приведена на рис.3.

Каждый символ может принимать одно из 16-ти значений, расположенных на 4-мерной сфере, в вершинах вписанного в нее 4-мерного куба. Слева и справа показаны проекции на две ортогональные в 4D-пространстве плоскости и на четыре взаимно ортогональные оси.

По совокупности существенных параметров, включая удобство реализации, формат DP-QPSK со скоростью передачи информации 100 Гбит/с на один канал оказался самым перспективным форматом и стал очень широко использоваться в когерентных DWDM-системах дальней связи с суммарной скоростью 10 Тбит/с в С-диапазоне и до 25 Тбит/с в С+L-диапазоне [6, 7].

Принцип работы когерентных систем связи на основе DP-QPSK достаточно подробно описан в литературе [1, 8, 9] (рис.4). Фактически один передаваемый оптический символ несет четыре независимых бинарных сигнала в каждом из 4-х независимых измерений, характерных для световой волны. Могут использоваться для реализации любых 4-мерных форматов: DP-QPSK, DP-nQAM, векторные форматы с произвольным расположением символов в 4-мерном пространстве.

В настоящее время формат DP-QPSK наиболее широко используется в когерентных сетях связи нового поколения. Тем не менее, существует также несколько

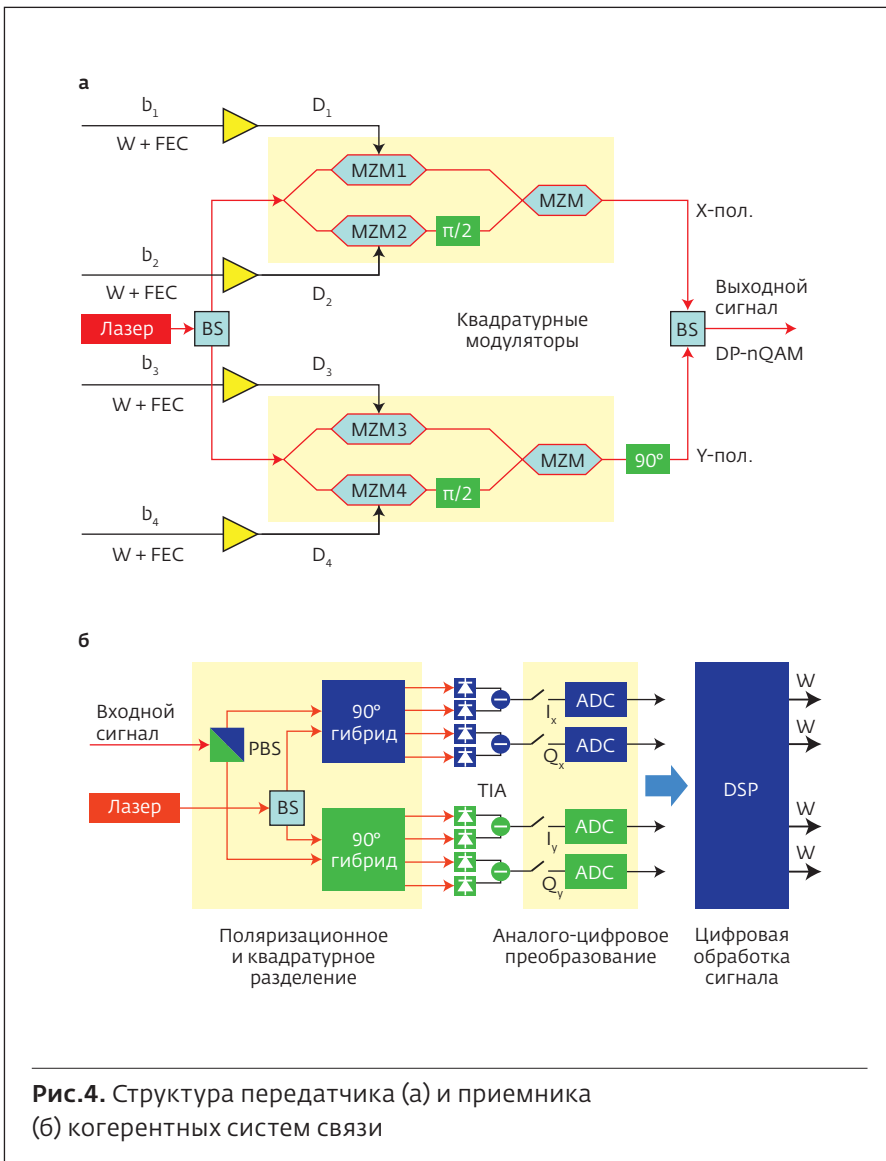


Рис.4. Структура передатчика (а) и приемника (б) когерентных систем связи

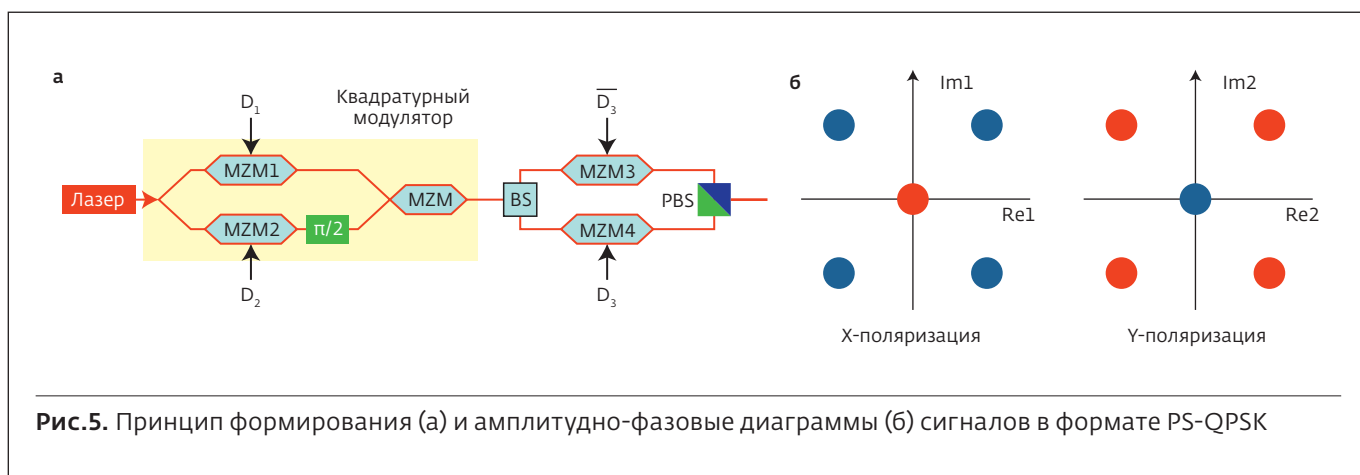


Рис.5. Принцип формирования (а) и амплитудно-фазовые диаграммы (б) сигналов в формате PS-QPSK

других энергоэффективных форматов модуляции, которые могут представлять интерес для реализации в будущих волоконно-оптических системах связи.

### ФОРМАТ PS-QPSK

Формат DP-QPSK – это формат, в котором два QPSK-сигнала передаются одновременно в двух поляризациях. Можно видоизменить принцип кодирования и создать формат, в котором передается только один сигнал QPSK в одном состоянии поляризации; при этом во втором состоянии поляризации мощность равна нулю. Кроме того, для передачи еще одного бита информации используется кодирование поляризации: поляризация, используемая для передачи QPSK-символа, несущего 2 бита, выбирается в соответствии со значением 3-го бита. Такой трехбитовый формат модуляции получил название PS-QPSK – QPSK с переключением поляризации [10]. Интерес к этому формату обусловлен его высокой энергетической эффективностью – это самый энергетически эффективный 4-мерный формат [10]. Принцип формирования сигналов в формате PS-QPSK иллюстрирует рис.5а, а на рис.5б показаны амплитудно-фазовые диаграммы этого формата.

Сформированный в квадратурном модуляторе (IQM) QPSK-сигнал в зависимости от значения в информационном потоке D3 передается либо в х-поляризации, либо в у-поляризации.

Излучение CW-лазера модулирует IQM двумя информационными потоками D1 и D2, формируя 2-битовый QPSK (4 значения фазы, 2 бита/символ), затем информационный поток D3 кодирует поляризацию (еще 1 бит/символ). В результате формируется 3-битовый сигнал PS-QPSK, который передает 4 значения фазы либо в поляризации x, либо в поляризации y (см. рис.5б).

Формат PS-QPSK обладает наибольшей энергетической эффективностью и стойкостью к нелинейным эффектам. Это позволяет уменьшить число усилителей за счет увеличения длины пролетов многопролетных линий связи. Энергетическую эффективность при сравнении форматов с разной символьной эффективностью удобно характеризовать минимальной требуемой энергией на бит.

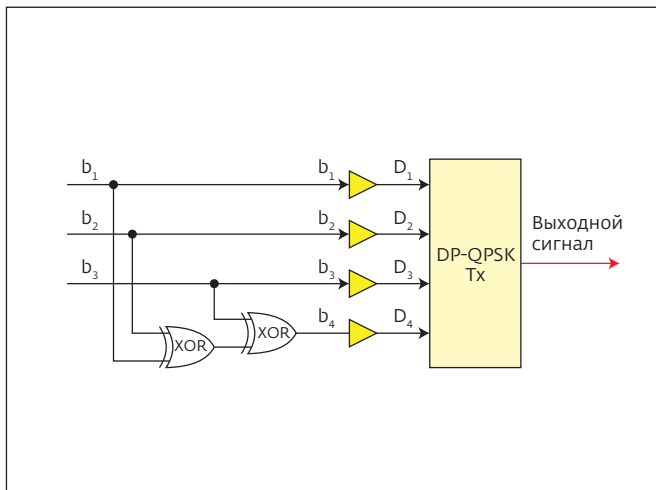
При использовании когерентного приема и модели линии, ограниченной шумом ASE, можно получить следующие выражения для SNR на бит [11]:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{n_b}{N_A n_{sp}},$$

где  $E_b$  – средняя энергия на бит,  $N_0$  – спектральная плотность мощности шума,  $n_b$  – среднее число принятых фотонов на символ,  $N_A$  – число пролетов,  $n_{sp}$  – фактор спонтанного излучения оптических усилителей.

В случае одного усилителя с шум-фактором 3 дБ для чувствительности, определенной как минимальное число фотонов на бит, необходимое для получения  $BER = 10^{-9}$ , для форматов BPSK, QPSK, DP-BPSK и DP-QPSK получается известное значение 18 фотонов/бит (одинаковое для всех 4-х форматов) [11, 12], а для формата PS-QPSK при этом требуется 13 фотонов/бит [10]. При использовании FEC, когда достаточно обеспечить до FEC значение  $BER = 10^{-3}$ , для DP-QPSK требуются 4,5 фотон/бит, а для PS-QPSK – всего 3,8 фотон/бит.

Формат PS-QPSK может продлить жизнь волоконно-оптической линии связи, параметры которой ухудшились настолько, что невозможно поддержание работоспособности системы связи на основе формата DP-QPSK. В этом случае транспондер можно переключить в режим использования формата PS-QPSK с сохранением прежней символьной скорости. Правда, за это придется



**Рис.6.** Передатчик формата PS-QPSK на основе передатчика DP-QPSK: независимыми являются только три информационных потока, а четвертый – их комбинация [10]

заплатить уменьшением на 25% пропускной способности линии связи. Действительно, как показано на рис.6, для реализации передатчика PS-QPSK может быть использован типовой модулятор, применяемый для формирования сигналов в формате DP-QPSK [10], с перепрограммированием четвертого информационного потока.

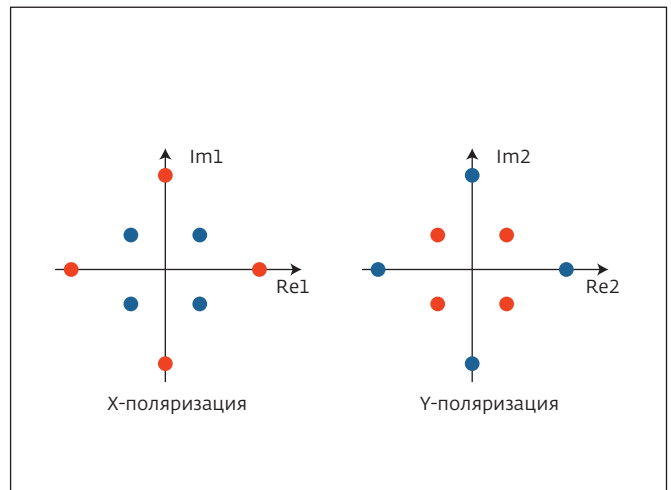
### ФОРМАТ 8PolSK-QPSK

В работе [13] описан еще один формат модуляции, в котором используется только модуляция поляризации (PolSK) и фазовая модуляция (PSK). Формат, получивший название 8PolSK-QPSK, характеризуется символевой эффективностью 5 бит/символ.

Можно описать 8PolSK-QPSK, пользуясь аналогией с форматом DP-8QAM. Действительно, каждый из двух поляризационных компонентов обоих форматов представляется идентичным амплитудно-фазовой диаграмме (сигнальному созвездию), показанной на рис.7 и совпадающей с диаграммой формата 8QAM.

Различие форматов состоит в следующем:

- в формате DP-8QAM значения символа в ортогональных поляризациях совершенно независимы: каждому из 8-ми значений 8QAM символа поляризации x (рис.7а) может соответствовать любое из 8-ми значений 8QAM символа поляризации y (рис.7б);
- в формате 8PolSK-QPSK в двух поляризациях разрешены только такие сочетания значений 8QAM-символов, которые расположены на окружностях разного радиуса. В этом случае энергия всех разрешенных символов в формате 8PolSK-QPSK оказывается постоянной.

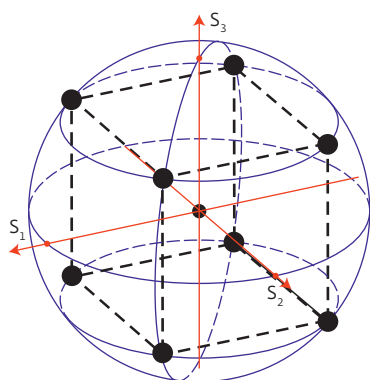


**Рис.7.** Амплитудно-фазовые диаграммы сигналов в формате 8PolSK-QPSK

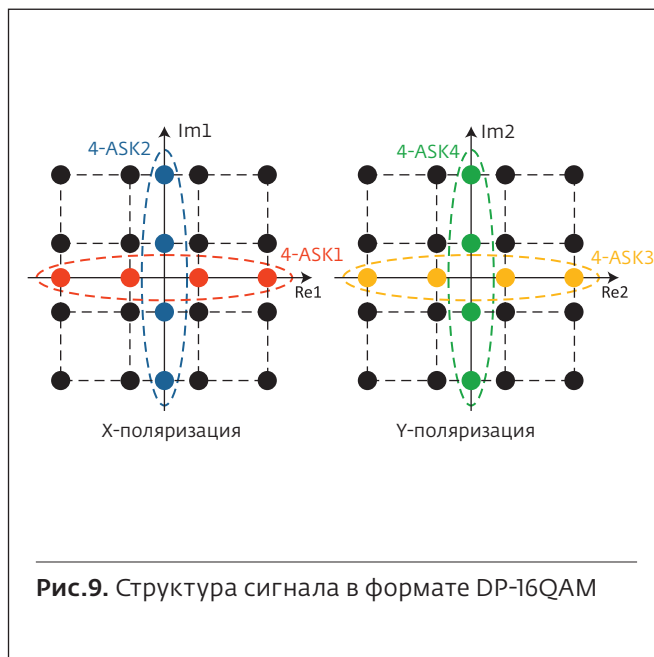
На рис.7 цветами показаны допустимые сочетания значений 8QAM-символов двух поляризаций в формате 8PolSK-QPSK: первое сочетание (красный цвет) соответствует четырем значениям 8QAM-символов внешнего круга поляризации x и четырем значениям 8QAM-символов внутреннего круга поляризации y; второе сочетание (синий цвет) соответствует четырем значениям 8QAM-символов внутреннего круга поляризации x и четырем значениям 8QAM-символов внешнего круга поляризации y. Таким образом, число разрешенных значений символа 8PolSK-QPSK складывается из 16 значений 1 типа (красный цвет) и 16 значений 2 типа (синий цвет). Общее число 32 различных значений символа обеспечивает символическую эффективность  $\log_2 32 = 5$  (бит/символ).

Особенность формата 8PolSK-QPSK состоит в том, что информация кодируется путем модуляции поляризации и фазы оптического сигнала, а мощность остается постоянной. Преимущество форматов с сохранением постоянной мощности состоит в значительном ослаблении нелинейных искажений, вызванных эффектом Керра.

Постоянство мощности символов легко представляется в пространстве Стокса, в котором все значения символов оказываются расположенными на одной сфере. Различных состояний поляризации, которые могут принимать символы в формате 8PolSK-QPSK – восемь, что и показано на рис.8 в виде точек в пространстве Стокса. Поскольку энергии всех значений символов одинаковы, все точки лежат на одной сфере в пространстве Стокса. Символ



**Рис.8.** Различные состояния поляризации символов в формате 8PolSK-QPSK: все восемь возможных значений вектора Стокса (в пространстве Стокса) лежат на одной сфере, символ каждой поляризации может иметь любое из 4-х значений фазы



**Рис.9.** Структура сигнала в формате DP-16QAM

в каждой из 8-ми показанных на рис.8 точек может принимать любое из 4-х значений абсолютной фазы, соответствующих формату QPSK. Именно из этого рисунка становится ясным название формата 8PolSK-QPSK – это формат, в котором для кодирования информации используется восьмиуровневая поляризационная модуляция и независимая четырехуровневая фазовая модуляция (общее число уровней  $8 \times 4 = 32$ ).

Напомним, что восьмиуровневая (трехбитовая) модуляция поляризации (8PolSK) исследовалась ранее без фазовой модуляции в работах [14, 15]. Достоинством для ряда применений поляризационных форматов является возможность их использования в системах связи с прямым детектированием. В когерентных же системах связи они проигрывают по техническим характеристикам более сложным форматам, совмещающим поляризационную и фазовую модуляцию, то есть использующим все четыре размерности электромагнитного поля для модуляции.

### Формат DP-16QAM

Формат DP-16QAM обеспечивает удвоение символьной и спектральной эффективности системы связи по сравнению с форматом DP-QPSK. При сохранении символьной скорости переход от формата DP-QPSK к формату DP-16QAM увеличивает канальную битовую скорость вдвое. Иногда более полезным оказывается уменьшение в два раза символьной скорости и занимаемой каналом полосы при сохранении битовой скорости.

Большим достоинством формата DP-16QAM является возможность его реализации с использованием модифицированного передатчика для формата DP-QPSK. Модификация заключается в использовании сигналов 4-ASK с неэквидистантным расстоянием между значениями электрического напряжения. Значения электрических напряжений подбираются с использованием DSP таким образом, чтобы обеспечить эквидистантность четырех значений амплитуды оптического сигнала в сигнальном созвездии. Структура сигнала в этом формате показана на рис.9.

Каждый символ может принимать одно из 256 значений 4-мерной символьной диаграммы. Слева и справа показаны проекции на две ортогональные в 4D-пространстве плоскости (черные точки) и на четыре взаимно ортогональные оси (цветные точки). На каждую точку в плоскости Im1, Re1 (слева) и на каждую точку в плоскости Im2, Re2 (справа) проецируется по 16 точек 4D-пространства.

За все указанные преимущества, однако, приходится расплачиваться снижением энергетической эффективности, то есть в конечном счете дальностью безрегенерационной передачи сигналов. Несмотря на это, переход ко все более многоуровневым форматам модуляции DP-16QAM и DP-64QAM – это основная тенденция развития DWDM-оборудования для систем связи разного уровня [16–18]. Значительно расширяет возможности форматов nQAM применение технологии кодирования с неравными вероятностями выпадения разных точек сигнального созвездия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования в области новых форматов модуляции стимулируются поиском путей увеличения скорости и снижения стоимости единицы передаваемой информации. Экономичность DWDM-систем связи с большой суммарной скоростью передачи данных в значительной степени зависит от эффективности использования рабочего спектра, предназначенного для передачи информации, которая характеризуется спектральной эффективностью, максимальная практически достижимая величина которой при использовании обычной ASK-модуляции в наиболее спектрально эффективном варианте (формате NRZ) не превышает 0,4 бит/Гц. Поэтому веская причина для исследования альтернативных форматов модуляции – увеличение спектральной эффективности DWDM-систем связи.

Однако использование многоуровневых форматов с несколькими уровнями мощности передаваемых символов резко ограничивает дальность передачи по сравнению с форматами, использующими один уровень энергии и сочетание поляризационной и фазовой модуляции.

Наряду с традиционно используемым и хорошо себя зарекомендовавшим форматом DP-QPSK очень обнадеживающим по своим характеристикам является формат 8PolSK-QPSK. Для ВОЛС меньшей дальности безрегенерационной передачи, для которых достижимы более высокие уровни OSNR на выходе линии, можно ожидать все более масштабное внедрение форматов nQAM.

В современных приемниках и передатчиках когерентных систем связи заложены возможности программной перестройки формата модуляции и избыточности. Это делает решения на их основе гибкими и удобными для работы в сетях DWDM.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Листвин В.Н., Трещиков В.Н.** DWDM-системы / 3-е изд. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. 333 с.
2. **Winzer P.J., Neilson D.T., Chraplyvy A.R.** Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years // Optics express. 2018. Т. 26. № 18. С. 24190–24239.
3. **Charlet G.** Progress in optical modulation formats for high-bit rate WDM transmissions // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. 2006. Т. 12. № 4. С. 469–483.
4. **Наний О.Е., Трещиков В.Н.** Форматы модуляции для оптических DWDM систем связи с канальной скоростью 40 и 100 Гбит/с // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. Т. 2011. № 8. С. 76–78.
5. **Редюк А.А.** и др. Математическое моделирование экспериментального прототипа высокоскоростной линии связи на основе дифференциального фазового формата модуляции без возвращения к нулю // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 10. С. 929–933.
6. **Трещиков В.Н., Гуркин Н.В., Наний О.Е.** Оптические когерентные DWDM системы связи с канальной скоростью 100 Гбит/с // Фотон-экспресс. 2014. № 4. С. 24–27.
7. **Портнов Э.Л., Фатхулин Т.Д.** Технологии достижения высоких скоростей передачи в современных когерентных DWDM-системах связи // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт. Т. 2015. Т. 9. № 8. С. 34–37.
8. **Трещиков В.Н., Наний О.Е.** Новое поколение DWDM-систем связи // Фотон-экспресс. 2014. № 4. С. 18–23.
9. **Наний О.Е.** Когерентные системы связи // Lightwave RE, 2008. № 4. С. 23–27.
10. **Karlsson M., Agrell E.** Which is the most power-efficient modulation format in optical links? // Optics express. 2009. Т. 17. № 13. С. 10814–10819.
11. **Ip E.** et al. Coherent detection in optical fiber systems // Optics express. 2008. Т. 16. № 2. С. 753–791.
12. **Kahn J.M., Ho K.P.** Spectral efficiency limits and modulation/detection techniques for DWDM systems // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. 2004. Т. 10. № 2. С. 259–272.
13. **Chagnon M.** et al. Analysis and experimental demonstration of novel 8PolSK-QPSK modulation at 5 bits/symbol for passive mitigation of nonlinear impairments // Optics express. 2013. Т. 21. № 25. С. 30204–30220.
14. **Benedetto S., Gaudino R., Poggiolini P.** Direct detection of optical digital transmission based on polarization shift keying modulation // IEEE Journal on Selected areas in Communications. 1995. Т. 13. № 3. С. 531–542.
15. **Benedetto S., Poggiolini P.** Theory of polarization shift keying modulation // IEEE Transactions on communications. 1992. Т. 40. № 4. С. 708–721.
16. **Леонов А.В.** и др. Тенденции развития оптических систем дальней связи // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 2. С. 123–145.
17. **Коньшев В.А.** и др. Оптическая революция в системах связи и ее социально-экономические последствия // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 1. С. 15–27.
18. **Коньшев В.А.** и др. Развитие оптических информационных сетей DWDM DCI // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2019. № 4. С. 46–50.

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ И УЧАСТИИ:

Министерство промышленности,  
связи, цифрового и  
научно-технического развития  
Омской области

Администрация города Омска

Межрегиональная ассоциация  
«Сибирское соглашение»

Омская ТПП

НП «Сибирское машиностроение»

Союз машиностроителей России

**24 - 27** МАРТА 2020 Г.



**ОМСК**



## СИБИРСКИЙ ПРОМЫШЛЕННО- ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

# ПРОМТЕХЭКСПО

В ЭКСПОЗИЦИИ ФОРУМА:

**АВТОМАТИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРЕНИЯ**

**СВЯЗЬ**

**IT-ТЕХНОЛОГИИ**

**ОМСКГАЗНЕФТЕХИМ**

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

**МЕТАЛООБРАБОТКА**

**СВАРКА**

**ЭНЕРГОСИБ, СИБМАШТЭК**

**ИНЭКСПО**

МВЦ «ИНТЕРСИБ», ВК «ОМСК\_ЭКСПО»

Тел./факс: +7 (3812) 22-04-59; 23-23-30; 22-01-59

E-mail: expo@intersib.ru

www.intersib.ru