

**Изучение принципов кодирования оптических
сигналов в когерентных системах
(модуляционные форматы)**

Лабораторно-практическое занятие.

Время изучения 2 часа

Цель работы, порядок выполнения и содержание

- Цель работы: изучить современные и перспективные решения по кодированию оптических канальных сигналов одноканальных и многоканальных ВОСП DWDM.
- Порядок выполнения:
 - изучить предлагаемые материалы;
 - ответить кратко по существу на контрольные вопросы;
 - решить задачу;
 - составить отчёт с выводами по проделанной работе.

Список литературы для самостоятельного изучения

- 1. Supplement 39 to ITU-T (02/2016) G-series Recommendations Optical system design and engineering considerations
- 2. Когерентные оптические сети [Электронный ресурс] : учеб. пособие / [Фокин, В. Г.](#) *Когерентные оптические сети.*[Текст]: учебное пособие, СибГУТИ, 2015. 371с. Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск : СибГУТИ, 2015. - 371 с. : ил. - Библиогр.: с. 356-364. - Б. ц. http://ellib.sibsutis.ru/cgi-bin/irbis64r_12/cgiirbis_64.exe
- 3. Оптические мультиплексоры OADM/ROADM и коммутаторы РХС в мультисервисной транспортной сети [Электронный ресурс] : учеб. пособие / [Фокин, В. Г.](#) *Когерентные оптические сети.*[Текст]: учебное пособие, СибГУТИ, 2015. 371с. Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. - Новосибирск: [б. и.], 2011. - 204с. - Б. ц. http://ellib.sibsutis.ru/cgi-bin/irbis64r_12/cgiirbis_64.exe
- 4. [Фокин, В. Г.](#) Когерентные оптические сети.[Текст]: учебное пособие, СибГУТИ, 2015. 371с.

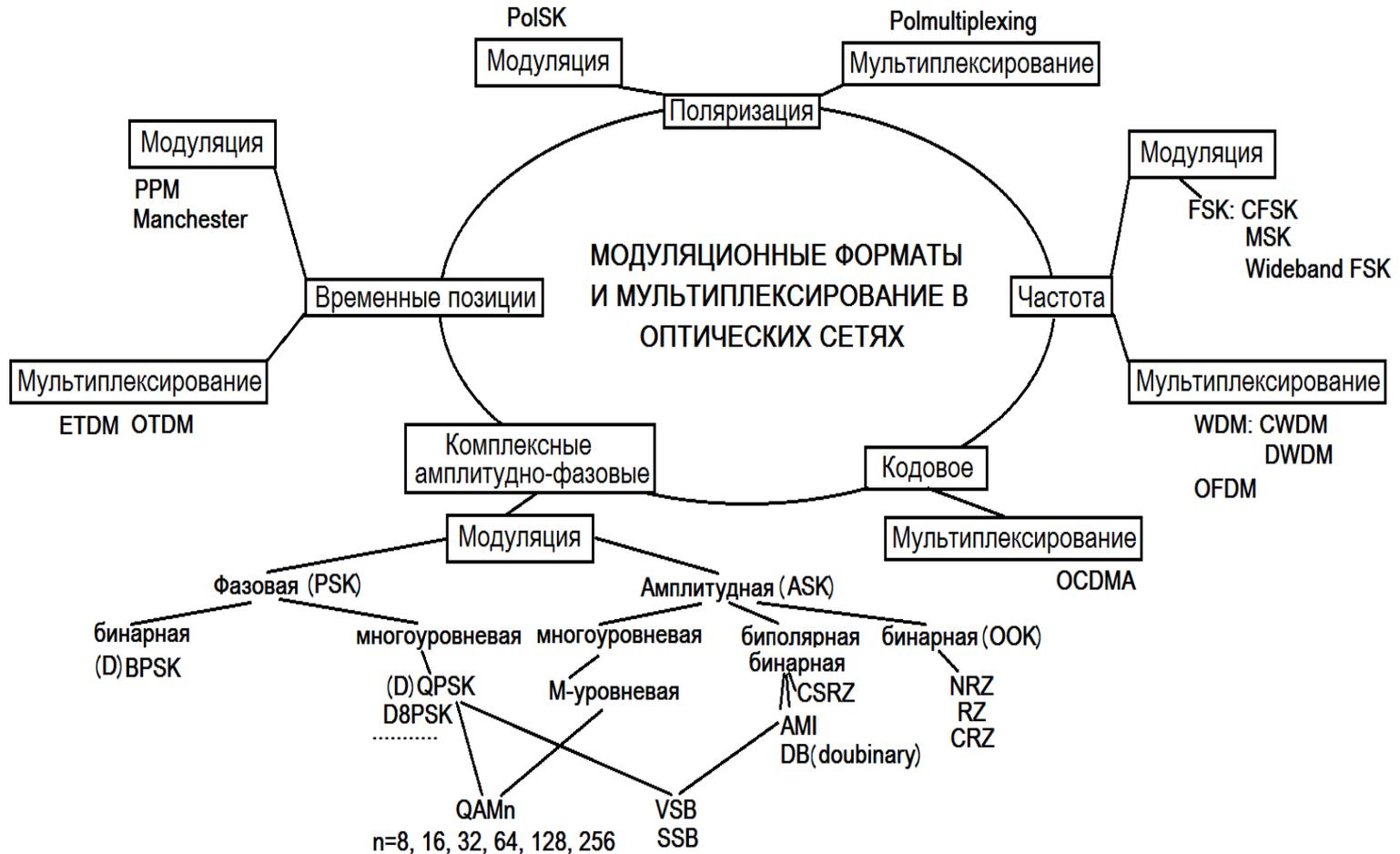
Содержание отчёта

- 1. Название работы. Ф.И.О. исполнителя с подписью. Руководитель занятия. Дата выполнения.
- 2. Цель занятия.
- 3. Содержание занятия с перечнем изучаемых разделов.
- 4. Краткие ответы на контрольные вопросы.
- 5. Решение задачи и выводы по результатам выполнения работы.

Введение

- Рассматриваются принципы формирования различных оптических сигналов в передатчиках когерентных и некогерентных систем. Формируемые сигналы должны отвечать определенному набору требований, обусловленных областью использования систем, дистанциями организации оптических каналов и секций, требуемыми скоростными режимами передачи цифровых данных, контролем качества передачи, технико-экономическими показателями и др.
- К определенному набору требований относятся:
- максимально эффективное использование полосы частот оптического канала (бит/с/Гц), т. е. наибольшее возможное число информационных бит в единицу времени 1 сек в полосе частот 1 Гц ;
- максимальная помехоустойчивость оптического канала, оцениваемая оптическим отношением оптический сигнал/шум или OSNR, т. е. нормальная работоспособность оптического канала (выполнение заданного коэффициента ошибок BER, Bit-Error Rate) при минимальном OSNR;
- устойчивость к линейным (хроматическая и поляризационные дисперсии) и нелинейным (ФСМ, ФКМ, ВКР, ВРМБ, ЧВС) искажениям;
- минимальная сложность оптической и электронной схмотехники, интегрируемость компонентов и малые массогабаритные показатели, технологичность в производстве;
- возможность перестройки передатчиков на различные волны в пределах стандартных диапазонов оптических волокон;
- стабильность характеристик модулированных оптических сигналов;
- наличие в спектре модулированного оптического сигнала частот для синхронизации приемной стороны для использования при цифровой обработке;
- минимальная стоимость передатчиков при их серийном производстве.
- В полной мере удовлетворить вышеприведенным требованиям могут только оптические передатчики с внешней модуляцией излучения одномодовых узкополосных лазеров. При этом почти все возможные параметры модуляции излучения (кроме модуляции в пространстве, что для волоконных линий не рассматривается) подлежат рассмотрению (рис.).

Возможные оптические модуляционные форматы и варианты оптического мультиплексирования в оптических передатчиках



Параметры модуляции

- Параметрами модуляции оптического излучения могут быть:
- амплитудное значение (интенсивность или мощность в единицу времени через единицу площади);
- фаза излучения или фаза импульсной посылки;
- комплексное значение амплитуды и фазы;
- поляризация оптического излучения;
- частота (волна) оптического излучения;
- кодовое наложение на оптическое излучение;
- временные позиции импульсных посылок оптического излучения.
- Модуляция в оптических передатчиках может сочетаться с мультиплексированием информационных потоков и оптических модулированных сигналов. Например, доступ к оптическому каналу производится с применением различных кодовых комбинаций (OCDMA, Optical Code Division Multiple Access), или мультиплексированием временных позиций информационных сигналов в электронном (ETDM, Electrical Time Division Multiplexed) или оптическом форматах (OTDM, Optical Time-Division Multiplexing).

Основные модуляционные форматы

- Краткая характеристика модуляционных форматов и технологий оптического мультиплексирования:
- PolSK, Polarization Shift-Keying, манипуляция поляризацией оптического излучения;
- PM, Polmultiplexing, поляризационное мультиплексирование оптических сигналов;
- PPM, Pulse Position Modulation, модуляция позиции импульсов;
- Manchester, группа линейных кодов класса 1B2B;
- PSK, Phase-Shift-Keying, манипуляция фазой;
- BPSK, Binary Phase-Shift Keying, двоичная фазовая манипуляция;
- DPSK, Differential Phase Shift Keying, дифференциальная (раздельная) фазовая манипуляция;
- DQPSK, Differential Quaternary Phase Shift Keying, дифференциальная квадратурная фазовая манипуляция;
- DnPSK, Differential n (8, 16, 32 и т. д.) Phase Shift Keying, дифференциальная многопозиционная фазовая манипуляция;
- QAM, Quadrature-Amplitude-Modulation, квадратурная амплитудная модуляция;
- M-QAM, M = 8, 16, 32, 64, 128, 256 Quadrature-Amplitude-Modulation, многопозиционная квадратурная амплитудная модуляция;
- VSB, Vestigial Side Band, амплитудно-модулированный сигнал с частично подавленными боковыми полосами частот;
- SSB, Single-Side-Band, амплитудно-модулированный сигнал с одной боковой полосой частот;
- ASK, Amplitude Shift Keying, амплитудно-манипулированный сигнал;
- APSK, Amplitude- and Phase-Shift-Keying, амплитудно- и фаза-манипулированный сигнал;
- CSRZ, Carrier Suppressed Return to Zero, формат с возвращением к нулю и подавление несущей частоты.

Производные форматы модуляции

- Характеристика производных форматов модуляции:
- AMI, Alternate Mark Inversion, кодирование с инверсией;
- DB, Doubinary, доубинарное кодирование (модуляция);
- NRZ, RZ, CRZ, Non-Return-to-Zero, Return-to-Zero, Chirped RZ, *варианты абсолютного кодирования без возвращения к нулю или модуляция с возвращением к нулю, модуляция с частотным предискажением (для протяженных линий)*;
- FSK, Frequency-Shift Keying, частотная манипуляция;
- CFSK, Continuous-phase frequency-shift keying (CPFSK), непрерывная фазочастотная манипуляция;
- MSK, Minimum-Shift Keying, минимальная манипуляция;
- Wideband FSK, широкополосная частотная манипуляция;
- WDM, CWDM, DWDM, wavelength-division multiplexing, Coarse WDM, Dense WDM, мультиплексирование с разделением по длине волны (разреженное и плотное);
- OFDM, Optical Frequency-Division Multiplexing and Orthogonal Frequency Division Multiplexing, оптическое частотное мультиплексирование, ортогональное частотное мультиплексирование;
- OCDMA, Optical Code Division Multiple Access, множественный доступ с оптическим кодовым разделением;
- ETDM, Electrical Time Division Multiplexed, электрическое мультиплексирование с временным разделением (*используется в технологиях PDH, SDH, OTH*);
- OTDM, Optical Time Division Multiplexed, оптическое мультиплексирование с временным разделением;
- OOK, On-Off Key, включено – выключено (*вид манипуляции оптическим сигналом*);
- OSSB, optical single-side-band, оптический сигнал с одной боковой полосой частот;
- PM-QPSK, Polarization-Multiplexed QPSK, поляризационно-мультиплексированный сигнал QPSK;
- PS-QPSK, Polarization-Switched-QPSK, поляризационно-коммутируемый сигнал QPSK.

Многоступенчатое кодирование оптического сигнала

- Реализация указанных форматов модуляции производится в оптических схемах с одним, двумя и большим числом ступеней MZM, включенных последовательно (каскадно) и параллельно. При этом возможно построение схем модуляторов в трех вариантах первой ступени.
- В первом варианте (рис.1) излучение узкополосного лазера поступает в формирователь оптических импульсов трех способов получения форматов, задаваемых электрическим сигналом, близким к синусоидальному и кратному тактовой частоте информационного сигнала, и постоянным напряжением смещения ($U_{см}$), где U_{π} полуволновое напряжение (рис.3). На второй (и последующих) ступени модулятора импульсы электрического сигнала, представляющие собой кодовые комбинации информационного сигнала, управляют оптическими импульсами от первой ступени (фазой импульсов, амплитудой импульсов, поляризацией импульсов).
- Во втором варианте излучение поступает на модулятор, в котором происходит изменение его интенсивности по формату модулирующего сигнала вида CSRZ, при котором соседние оптические импульсы имеют фазы 0 и π . На второй (и последующих) ступени формируется линейный оптический сигнал по заданному формату с согласованием тактов информационного сигнала (рис. 2).

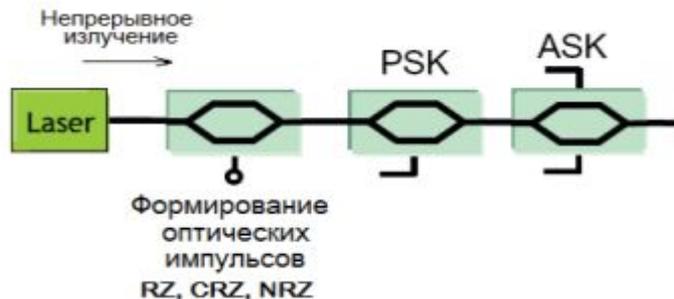


Рис. 1. Первый вариант построения оптического передатчика со ступенями формирования канального сигнала

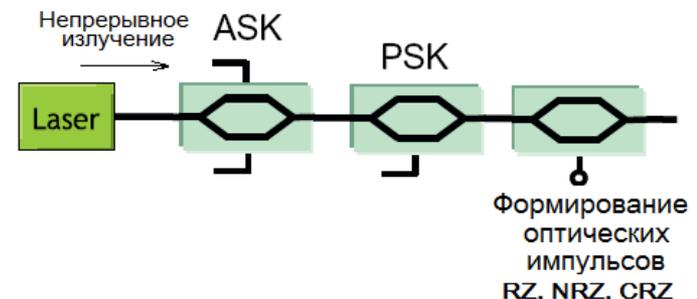


Рис. 2. Второй вариант построения оптического передатчика со ступенями формирования канального сигнала

Многоступенчатое кодирование оптического сигнала

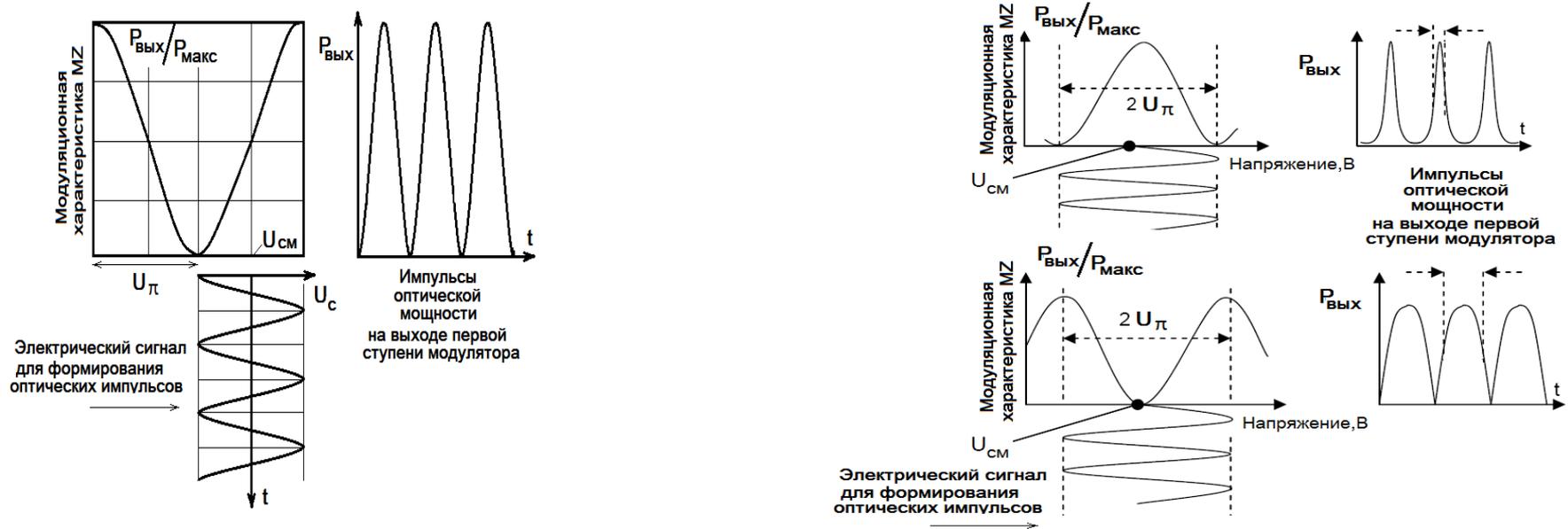
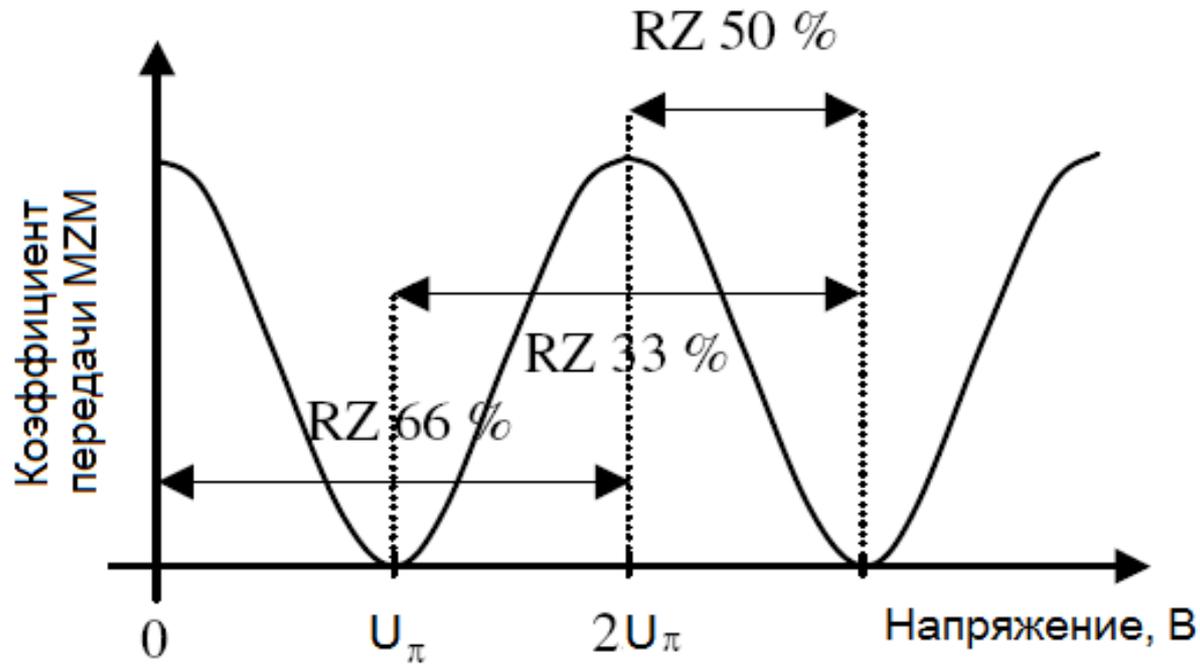


Рис. 3. Формирование оптических импульсов на первой ступени модулятора в пределах полуволнового напряжения U_{π} с сохранением тактов (RZ50%) – а; два способа формирования оптических импульсов на первой ступени с использованием размаха $2U_{\pi}$ модулятора с удвоением тактов (CSRZ) – б

Зоны формирования формата RZ (33 %, 50 % и 66 %) оптических импульсов в первой ступени оптического модулятора

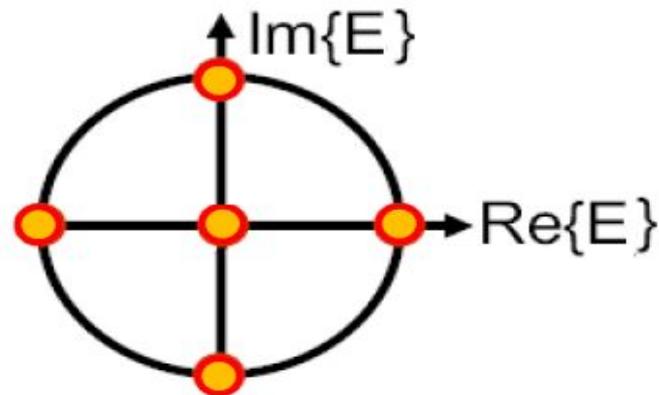


Шумы модуляции

- На практике фаза и амплитуда оптической несущей частоты изменяются случайно и характеризуются «интенсивностью шума», т. е. не обнаруживаются с высокой точностью. Это обусловлено спонтанностью индуцируемых фотонов с флуктуацией интенсивности и флуктуациями фазы с образованием фазового шума. Спонтанный шум лазера должен учитываться при формировании модулированного оптического сигнала и для этого флуктуации фазы оцениваются на определенном временном интервале τ , который устанавливает диапазон случайных изменений.
- Ширина спектра излучения лазера на уровне половины максимальной мощности определяется плотностью спектральной интенсивности частотного шума на интервале или временной когерентностью.
- Учитывая, что лазеры в когерентных системах используются не только в передатчиках, но и в приемниках, для них введены характеристики относительной интенсивности шума в полосе частот излучения RIN (Relative Intensity Noise). Типовые значения для лазерных диодов в пределах -160 дБ/Гц... -130 дБ/Гц. Таким образом, использование в системах передачи различных форматов модуляции может быть основой для определения требования к источникам излучения по ширине спектральной линии, по интенсивности шумов. На что влияют эти характеристики? На количество уровней мощности излучения, используемых для кодирования информационных сигналов, на количество фазовых состояний излучения, используемых для кодирования информационных сигналов и т. д.
- Прямое использование модуляции амплитуды, частоты, фазы оптического излучения ограничено вышерассмотренными шумами и в практических схемах применяется только при модуляции амплитудной составляющей, т. е. прямой модуляции интенсивности излучения, что для высокоскоростной передачи в магистральных сетях (от 10 Гбит/с до 1 Тбит/с) неприменимо из-за многократного расширения спектра и дисперсионных искажений. В конечном итоге эти обстоятельства привели к обоснованному использованию двух и более ступеней модуляторов. При этом создаются вполне определенные импульсные посылки излучения из непрерывного излучения лазера, которые затем становятся предметом управления в модуляторах (по фазе на одной частоте PSK или на нескольких, с квадратурными состояниями, по интенсивности ASK, смешанно по фазе и интенсивности ASK-PSK, с бинарными, квадратурными и другими состояниями).

Круговая диаграмма для представления состояний амплитуды и фазы модулированного оптического сигнала

- Для наглядного представления процедур формирования оптических сигналов в модуляторах часто используются, помимо временных диаграмм, отображения состояний сигналов в круговых диаграммах (рис.), где по горизонтальной оси ($\text{Re}\{E\}$, где E – электрическая составляющая оптического поля) отмечаются амплитудные значения сигнала для одной и двух полярностей (малые круги на рис.), что соответствует двум, трем и большему числу уровней мощности излучения, а по вертикальной оси ($\text{Im}\{E\}$) отмечаются фазовые сдвиги оптических импульсов также с двумя, тремя и большим числом состояний фазы. Учитывая существование смешанных решений по модуляции амплитуды и фазы, вся область внутри окружности может заполняться позициями модулированных сигналов, что показано далее. Каждому амплитудному и фазовому значению соответствует определённая кодовая комбинация двоичного числа, например, для кодирования четырёх состояний достаточно двоичных комбинаций: 00, 01, 10, 11.



Простые варианты кодирования оптических сигналов (ASK-OOK: NRZ, RZ, CRZ; CSRZ, DB, AMI)

- Простые варианты кодирования оптических сигналов при модуляции отличаются минимальной сложностью электронных и оптических схем, в которых для двухуровневой манипуляции OOK NRZ достаточно применения одного модулятора MZ (рис. 1 а). Меняется амплитудное значение (б), но остается неизменной фаза импульсов (в). Пример отображения амплитудных и фазовых состояний сигнала после модулятора также представлен круговыми диаграммами на рис. 2, а. Обозначение в виде соответствует действующему амплитудному значению поля E.
- Для реализации оптического сигнала в формате RZ требуется применение второго MZ (рис. 3), в котором оптические импульсы формата NRZ превращаются в импульсы с возвратом к нулю, что наглядно отмечено при чередовании двух единиц.

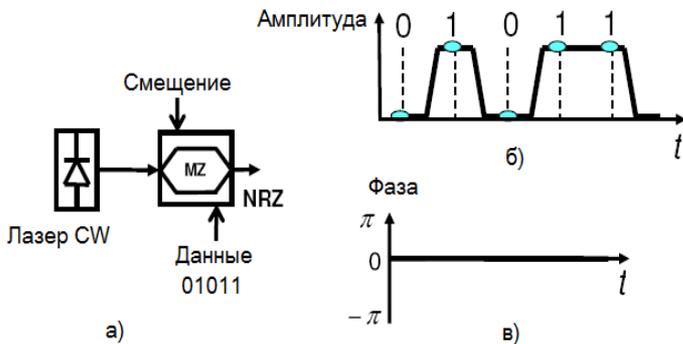


Рис. 1. Пример формата оптического сигнала NRZ на выходе модулятора

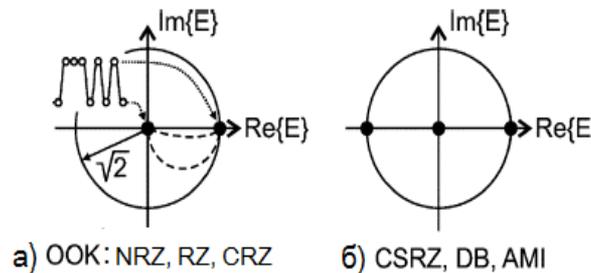


Рис. 2. Примеры 2-х и 3-х уровневых состояний модулированного оптического сигнала в круговых диаграммах

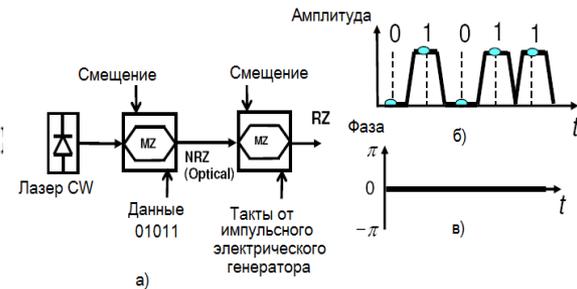


Рис. 3. Пример формата оптического сигнала RZ на выходе модулятора

Простые варианты кодирования оптических сигналов

- Для реализации формата CRZ потребуется включение третьей ступени модуляции, где с использованием внешнего электрического сигнала в выходные импульсы оптического сигнала будут вноситься предискажения для частичной компенсации дисперсионных искажений в протяженной волоконной линии.
- Формирование оптического сигнала CSRZ производится в двухступенчатой схеме модулятора (рис.1, а), где на первой ступени электрический сигнал с размахом в пределах полуволнового напряжения формирует оптические импульсы NRZ, а на второй ступени такты, согласованного с информационным потоком генератора управляют передачей импульсных посылок CSRZ (рис. 1, б). Обозначения на рисунке «+1», «-1» соответствуют передаче амплитудного значения разной полярности относительно средней точки (рис. 1, б) или изменению фазы на 180° (π), т. е. от 0 до π .
- Пример временных диаграмм формирования оптического сигнала в формате CSRZ представлен на рис. 2. Сигнал передачи данных имеет скорость V и полосу частот, ограниченную фильтром нижних частот (LPF, Low-Pass Filter) значением V , из него выделяется синусоидальное колебание с частотой $V/2$. Смещение оптического сигнала в формате NRZ и управляющих синусоидальных импульсов во второй ступени модулятора позволяет сформировать оптическую излучаемую мощность в формате CSRZ.

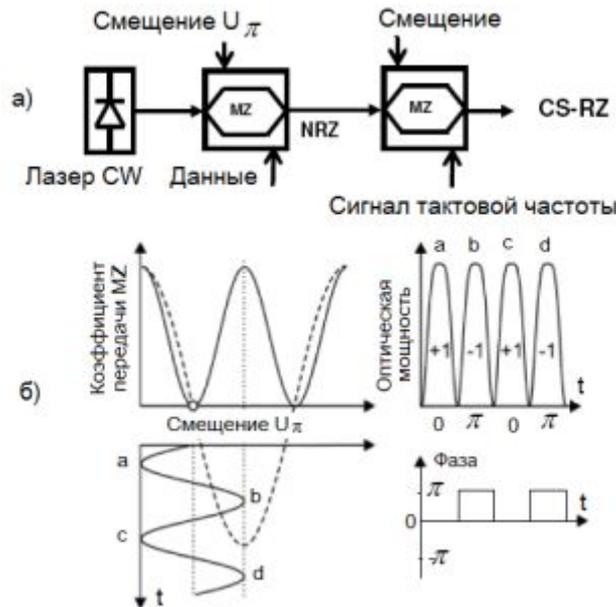


Рис. 1. Пример структуры модулятора CSRZ и формирования оптических импульсов с подавленной несущей частотой

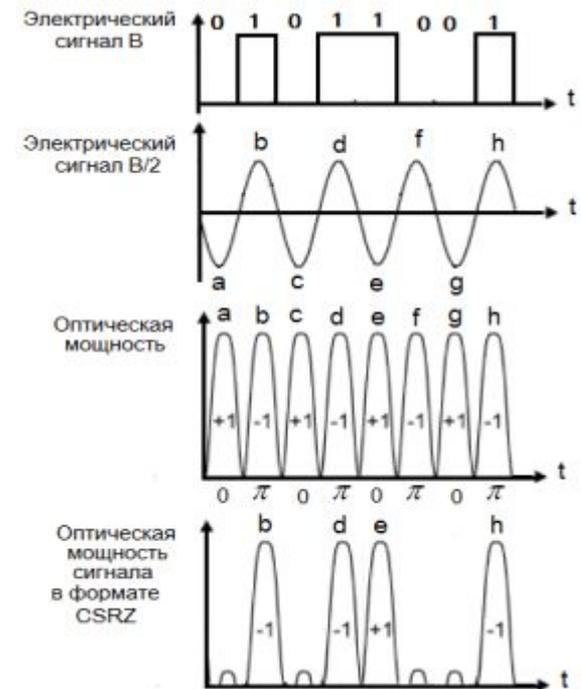


Рис. 2. Временные диаграммы формирования оптического сигнала CSRZ

Простые варианты кодирования оптических сигналов

- Формирование дуобинарного оптического сигнала DB может выполняться в электронной и оптических схемах. Пример оптической схемы представлен на рис. 1, где роль формирователя сигнала выполняет третья ступень модулятора MZ с одним каналом для задержки оптического импульса на величину такта и учет его возможной погрешности в фазовом сдвиге (рис.2). После сложения задержанных импульсов с импульсами без задержки формируется сигнал DB с отличающимися от сигналов CSRZ, RZ и NRZ характеристиками спектра (рис. след слайд). На приемной стороне для восстановления сигнала CSRZ применяется аналогичная схема третьей ступени модулятора.

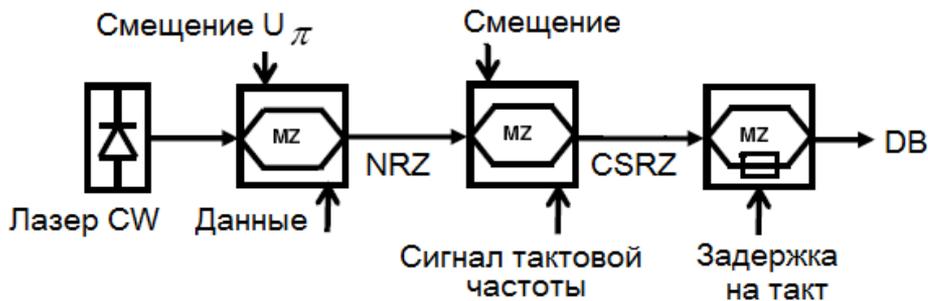


Рис. 1. Пример структуры модулятора DB

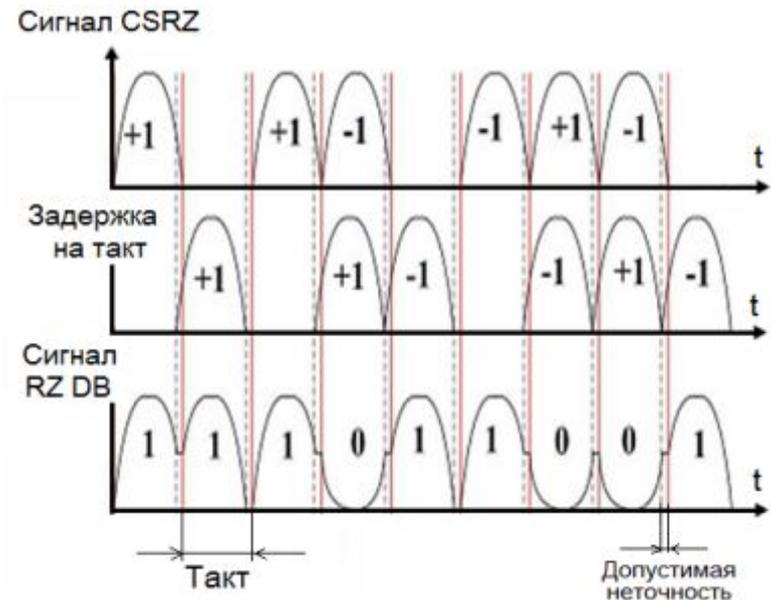
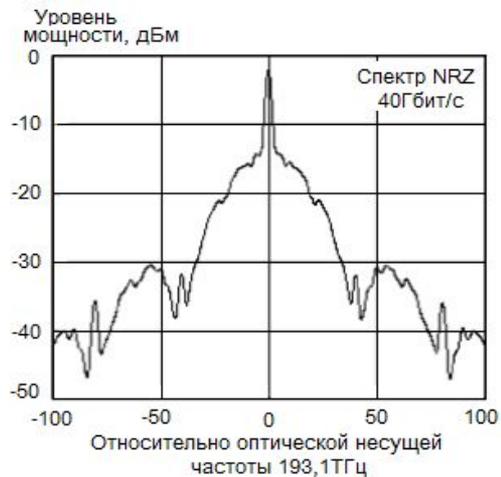


Рис. 2. Формирование сигнала формата DB

Простые варианты кодирования оптических сигналов. Спектры сигналов



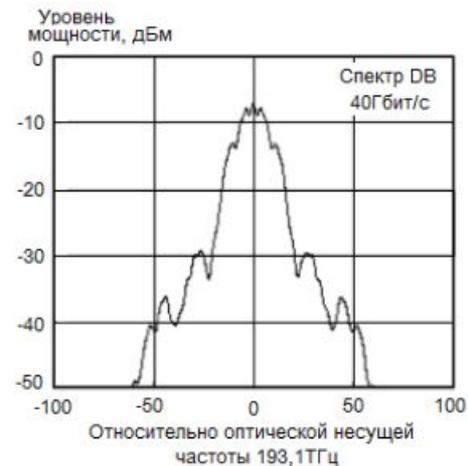
а) оптический спектр NRZ



б) оптический спектр RZ



в) оптический спектр CSRZ

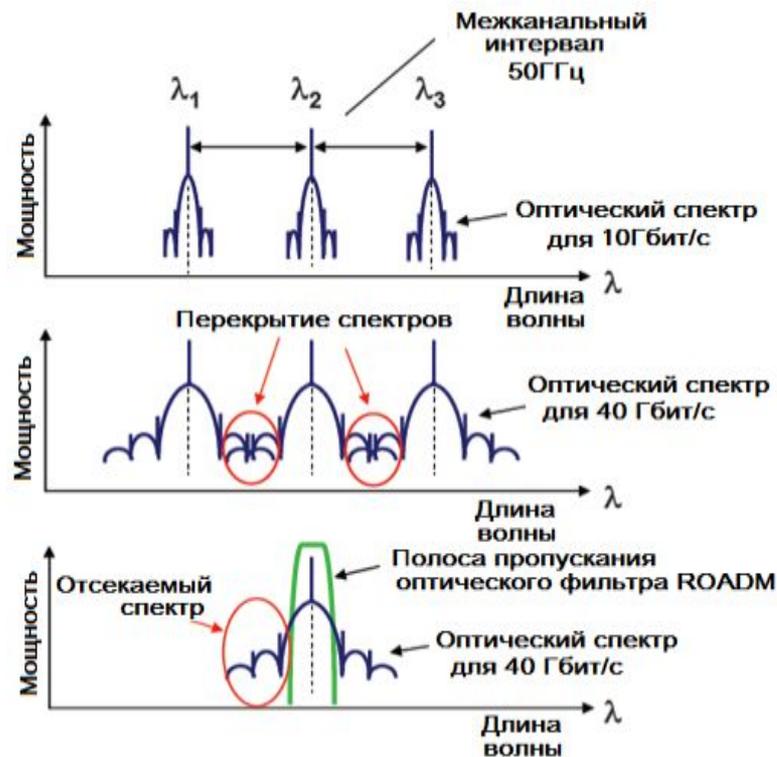


г) оптический спектр DB

Простые варианты кодирования оптических сигналов. Спектры сигналов

- Спектры оптических сигналов на выходе модуляторов четырех форматов отличаются составом, в частности, для CSRZ характерно отсутствие или пониженный уровень оптической несущей, что снижает мощностную нагрузку на волоконный световод, спектр формата DB самый узкий по уровню -20 дБм, как принято оценивать по стандартам ITU-T. Обычно для сравнительной оценки спектров модулированных сигналов используется спектральная эффективность, измеряемая [бит/секунда/Герц]. Все рассмотренные спектры простых форматов модуляции имеют эффективность в пределах $0,4-0,8$ бит/с/Гц. По этой причине применение этих форматов передачи в когерентных системах на скоростях от 40 Гбит/с и выше практически не рассматривается. Кроме того, как показано в ряде исследований, эти форматы сигналов имеют в основном низкую устойчивость к дисперсионным искажениям, нелинейным эффектам в волокне, шумам спонтанной эмиссии оптических усилителей, сужению полосы оптического канала при использовании мультиплексоров ROADM (рис.).

Рис. Проблемы расширения спектра оптических сигналов при увеличении скорости передачи информационного потока



Формирование оптических сигналов с фазовой модуляцией (кодирование, кодеры) и двойной поляризацией

В числе форматов фазовой модуляции, нашедших широкое использование в системах передачи со скоростями выше 10 Гбит/с, значатся BPSK, DPSK, QPSK, DnPSK и их расширение с двумя мультиплексированными ортогональными когерентными лучами (X, Y) от одного источника PM (polarization multiplexing) (рис.1): PM-BPSK, PM-DPSK, PM-QPSK и т. д. Кроме обозначения PM для поляризационного мультиплексирования используется обозначение DP (Dual Polarization, две поляризации). Волны PM позволяют удвоить пропускную способность оптического канала благодаря делению одного высокоскоростного потока данных на два параллельных. Применение фазового кодирования в форматах QPSK, DnPSK также позволяет снизить физическую скорость импульсов информационного сигнала и, как следствие, требуемую полосу частот для передачи. На требуемую полосу частот влияет также выбор формы оптических импульсов, фазовые состояния которых модулируются. Формы импульсов уже рассмотрены выше: NRZ, RZ и CSRZ. Принцип формирования сигнала в формате BPSK представлен на рис. 2, где несущее колебание меняет свою фазу на величину π при каждом переходе амплитуды двоичного сигнала из 1 в 0 и из 0 в 1. Этот пример фазовой манипуляции характерен для электрических и радиочастотных модемов. Иначе происходит манипуляция с фазами оптических сигналов.

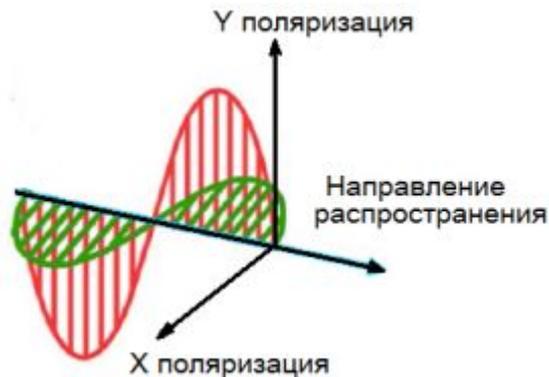


Рис. 1. Поляризованные мультиплексированные (PM, DP) волны от одного источника излучения

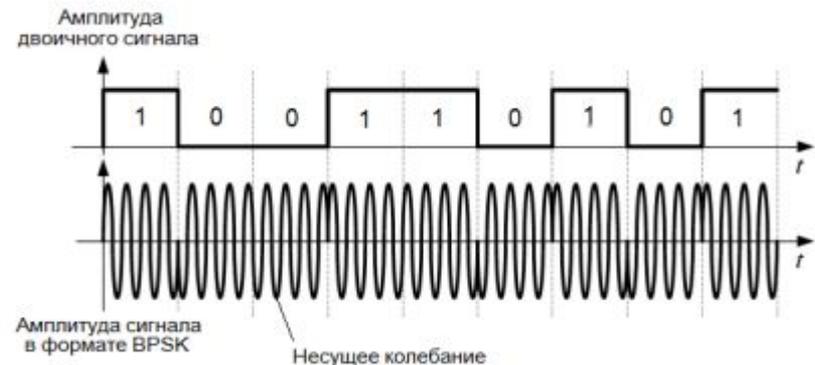


Рис. 2. Принцип формирования сигнала BPSK

Формирование оптических сигналов с фазовой модуляцией (BPSK)

- При формировании оптического BPSK импульсы биполярного двоичного сигнала управляют непрерывным оптическим излучением лазера в MZM таким образом, что формируются оптические импульсы с чередованием фаз излучения 0 и π (рис. 1). При этом уровень мощности излучения в среднем сохраняется неизменным, что отражено на круговой диаграмме рис. 2.

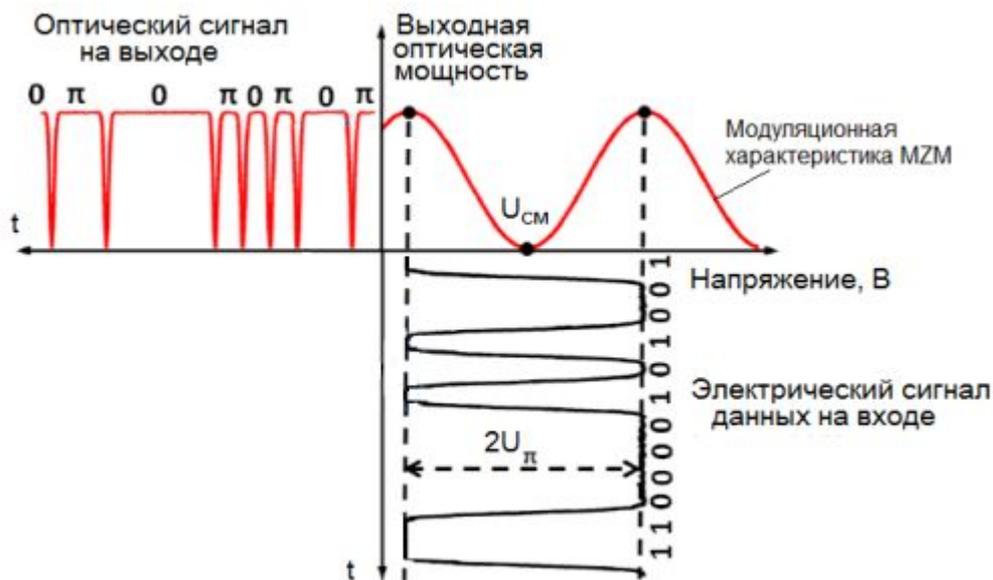


Рис. 1. Формирование оптического сигнала в формате NRZ-BPSK

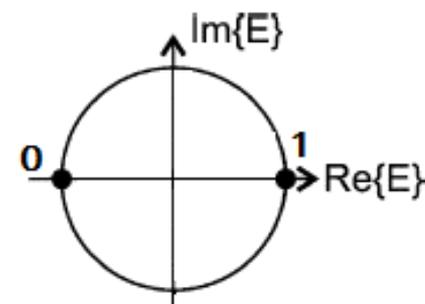


Рис. 2. Круговая диаграмма для BPSK

Формирование оптических сигналов с фазовой модуляцией (DPSK)

- Аналогичным BPSK является формат манипуляции DPSK, в котором каждый двоичный переход электрического сигнала 0 в 1 и 1 в 1 сопровождается изменением фазы несущего колебания на π (рис. 1). Этот пример, также как и для BPSK, характерен для электрических и радиочастотных модемов. Манипуляция фазы оптического сигнала выполняется в MZM для возможных форматов NRZ, RZ (CSRZ). В рассматриваемом ниже примере используется двухкаскадный модулятор с MZM и логическая схема формирования сигнала DPSK.

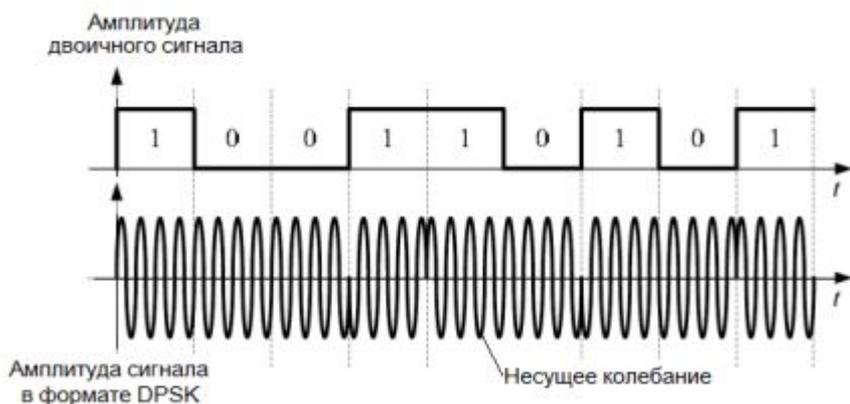


Рис. 1. Принцип формирования сигнала DPSK

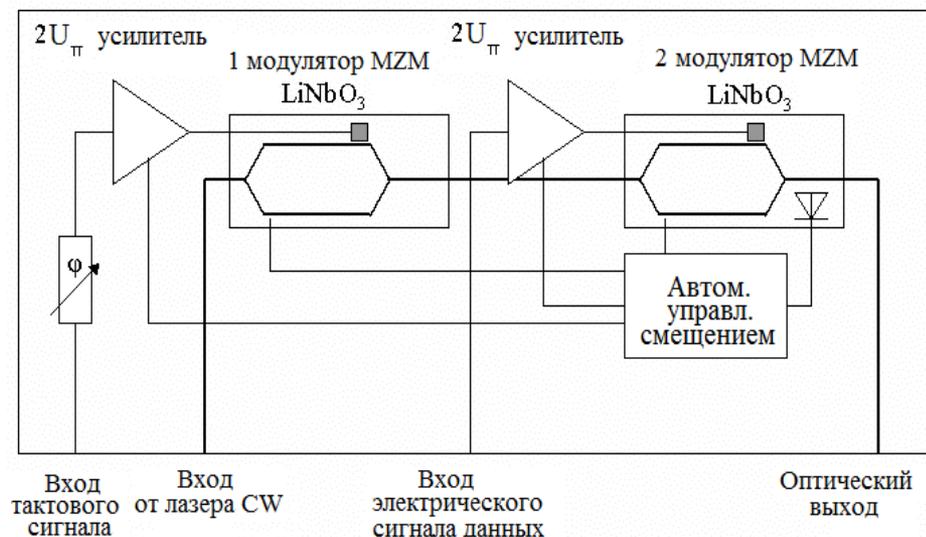


Рис. 2. Структура модулятора SHF 5003 DPSK (SHF Communication Technologies AG)

Формирование оптических сигналов с фазовой модуляцией (DPSK)

- В логической схеме формирования модулирующего электрического сигнала формата DPSK в формирователе линейного сигнала (ФЛС) выделяется из входящего сигнала полутактовая частота ($B/2$), которая направляется в схему модулятора для формирования оптических импульсов первой ступенью MZM1. Полученные оптические импульсы чередуются с фазовыми состояниями $0, \pi$. Логическая схема состоит из элемента «исключающий или» (суммирование по модулю два) и элемента задержки на один такт информационного потока (T). В результате суммирования по модулю два сигналов по входам $1(a_k), 2(b_{k-1})$ (рис. 1, 2) формируется сигнал для манипуляции оптическими импульсами на выходе $3(b_k)$. Этот сигнал приобретает двухполярную форму после разделительного конденсатора и направляется к электрическому усилителю второй ступени MZM. На MZM2 происходит управление оптическими импульсами от ступени MZM1. В результате излучаемые импульсы получают прерывания в передаче низких логических уровней.

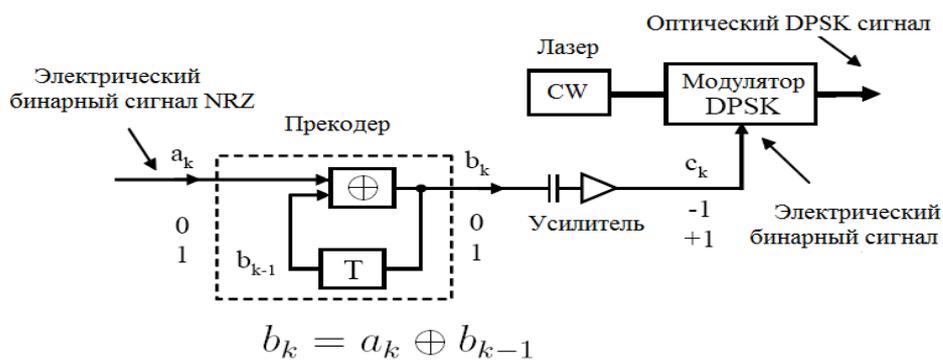


Рис. 1. Формирование модулирующего сигнала DPSK

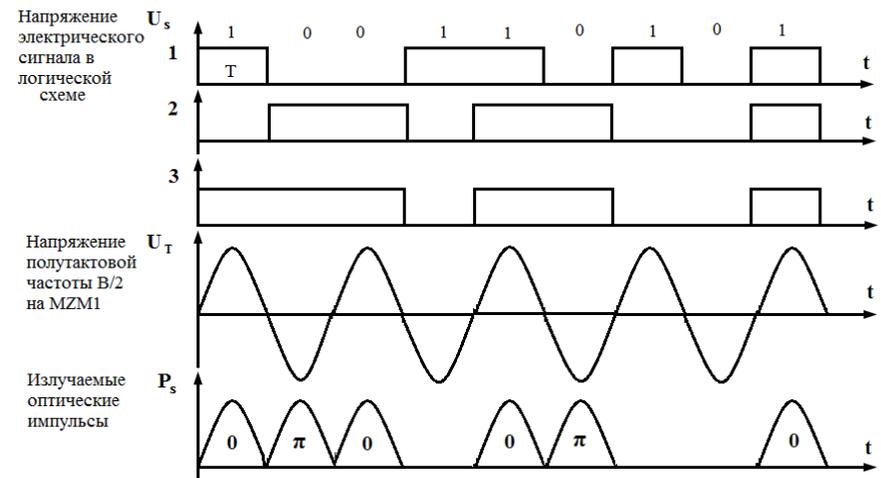


Рис.2. Формирование оптического сигнала в формате RZ-DPSK

Формирование оптических сигналов с фазовой модуляцией (DPSK)

- Использование различных форматов манипуляции приводит к формированию различных спектров оптических сигналов, представленных на рис. В этом примере приведены данные по спектру для скорости передачи 43 Гбит/с. Как видно из графиков более узкий спектр оптического сигнала характерен для формата NRZ. Большая ширина спектра характерна для формата RZ. В формате CSRZ подавляется оптическая несущая частота. При этом спектральная эффективность остается в пределах не более 1 бит/с/Гц. При использовании поляризационного мультиплексирования спектральная эффективность может достигать значения 2 бит/с/Гц. Формат рекомендован ITU-T (рек. G.680) к применению в некогерентных и когерентных системах на скоростях 40/100 Гбит/с в протяженных линиях благодаря высокой устойчивости к дисперсионным искажениям.

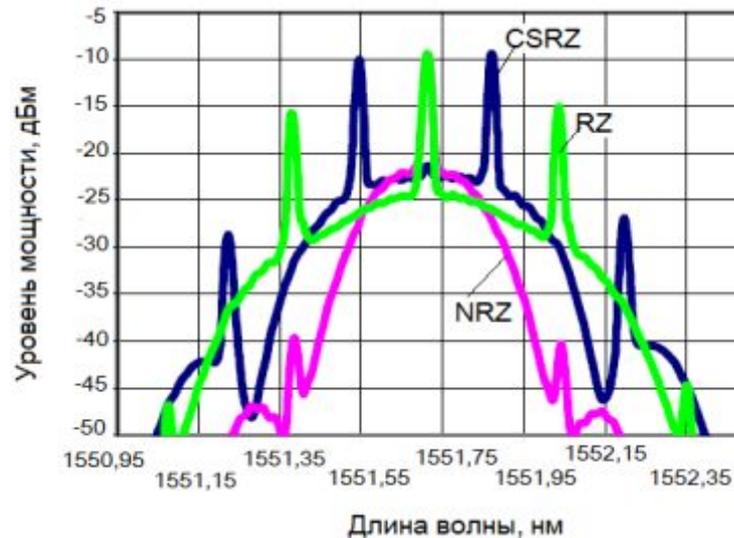


Рис. Спектры сигналов DPSK на выходе модулятора с различными форматами оптических импульсов (NRZ, RZ, CSRZ)

Формирование оптических сигналов с фазовой модуляцией (DQPSK)

- Формирование сигнала с квадратурной фазовой манипуляцией предполагает предварительное кодирование (рис.1) двоичной последовательности цифрового сигнала, при котором фаза несущей частоты может принимать четыре состояния (0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$). При формировании оптического сигнала могут реализовываться форматы NRZ, RZ, CSRZ. Пример схемы формирования фазовых позиций оптических импульсов формата NRZ представлен на рис.2 (след. слайд). Излучение E_0 от лазера CW проходит в два параллельных канала (I_k, Q_k) с модуляторами MZM и фазовращателем $\pi/2$. Таким образом получают два ортогональные оптические сигнала с осями фаз электрического поля $\text{Re}(E)$ и $\text{Im}(E)$:

Комбинации двоичных сигналов в каналах электрического управления модуляторами создают различный поворот результирующей фазы оптических импульсов, т. е. ϕ_k может стать $\pi/4, 7\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4$.

$$E_k = E_0 \cdot \cos \left[\frac{\pi \cdot (I_k - Q_k) + \frac{\pi}{2}}{2} \right] \cdot e^{j \left(\frac{\pi \cdot (I_k + Q_k) + \frac{\pi}{2}}{2} \right)}$$

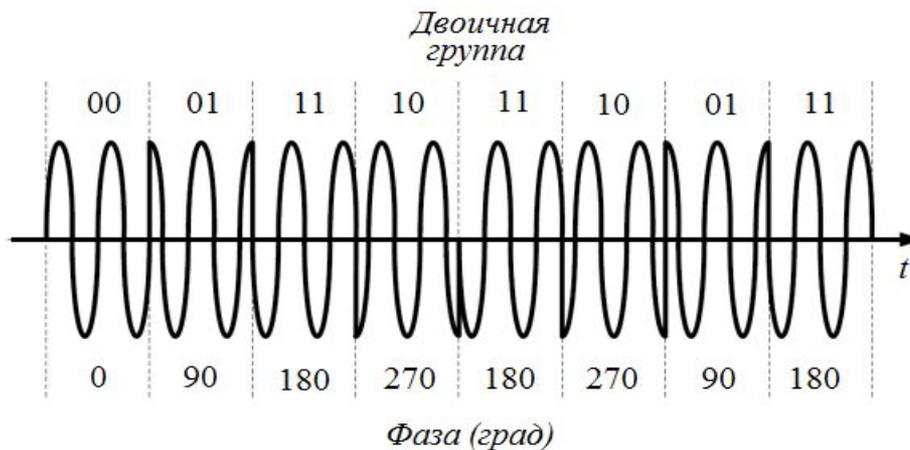


Рис. 1. Принцип формирования сигнала (D)QPSK

Формирование оптических сигналов с фазовой модуляцией (DQPSK)

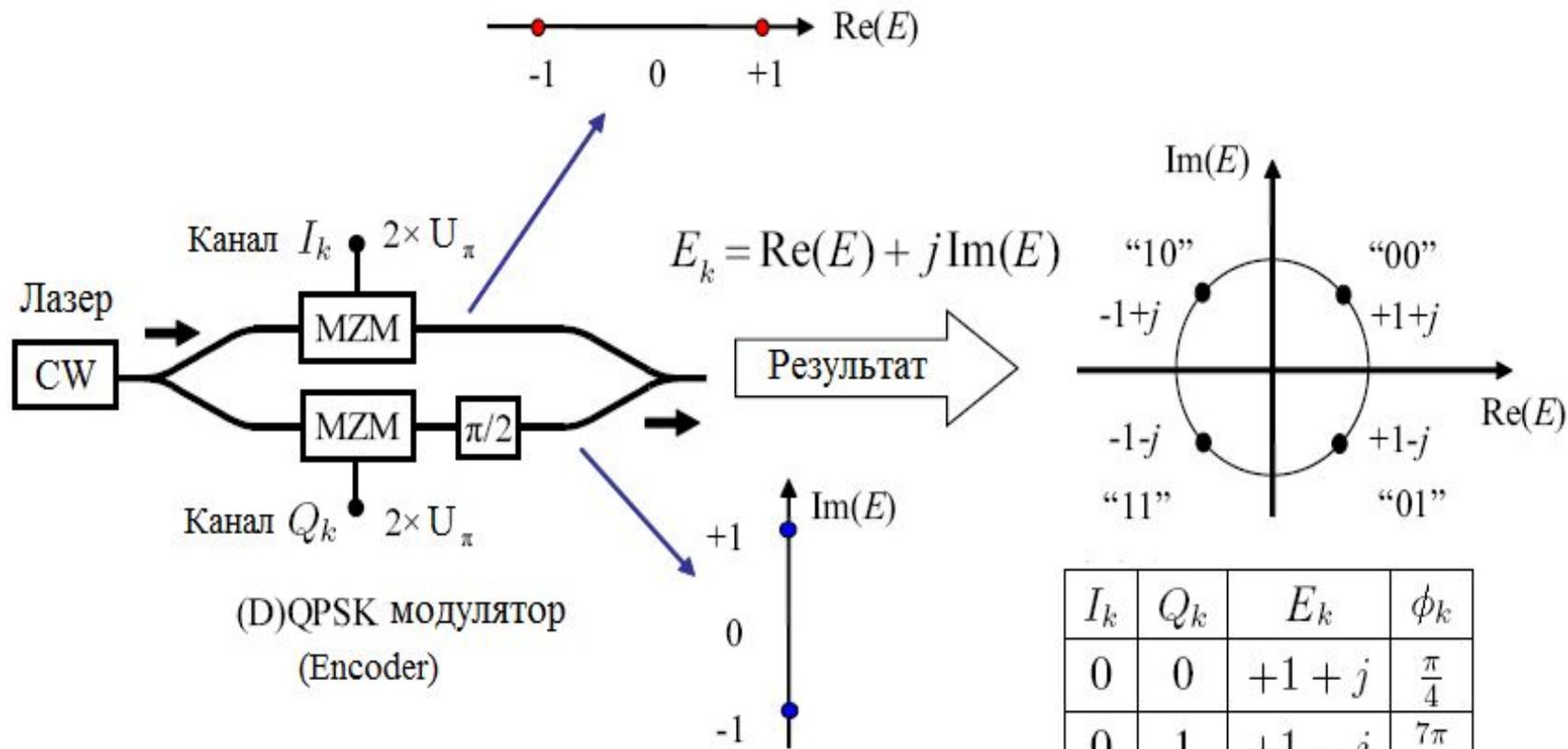
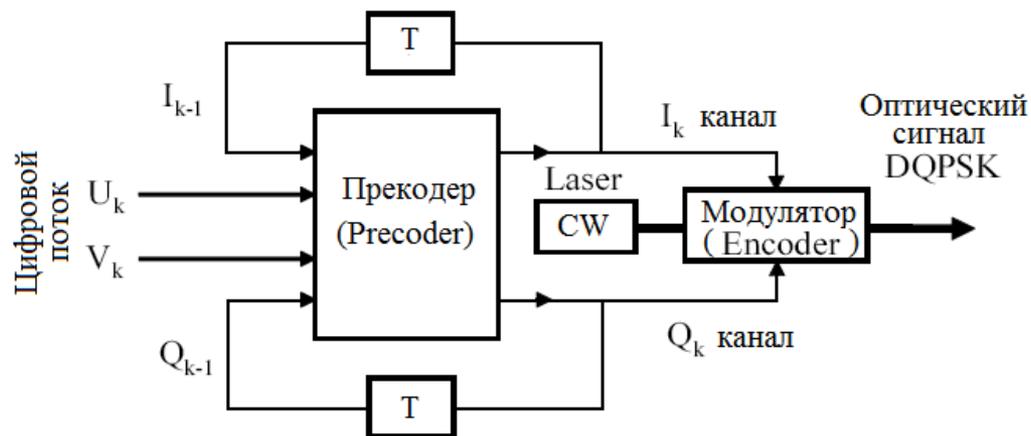


Рис. 2. Схема формирования фазовых позиций (D)QPSK

Формирование оптических сигналов с фазовой модуляцией (DQPSK)

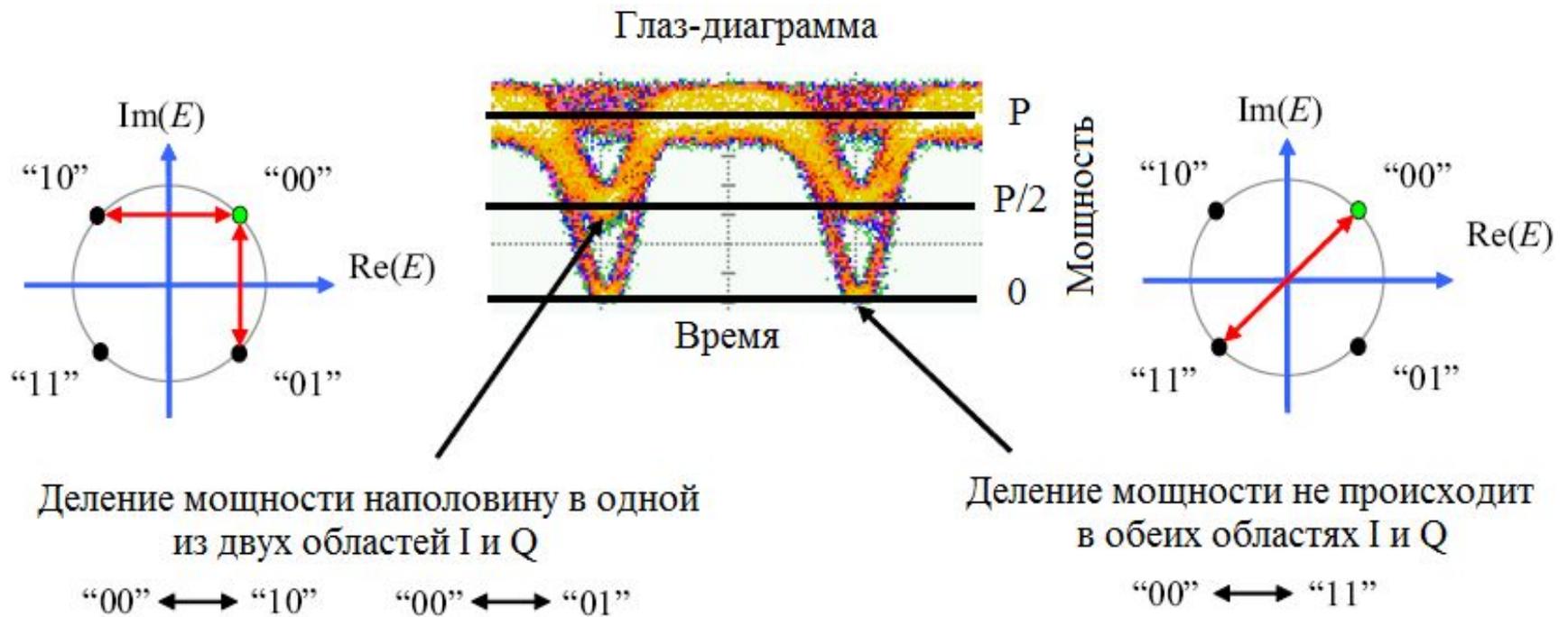
- Двоичные кодовые комбинации формируются в прекодере по принципу DPSK с фазовой задержкой T в рекурсивных связях (рис.) в двух параллельных потоках на скоростях $B/2$ (цифровые потоки U_k, V_k).
- Логика кодирования в каналах прекодера (D)QPSK:

$$I_k = \bar{U}_k \bar{V}_k \bar{I}_{k-1} + \bar{U}_k V_k Q_{k-1} + U_k V_k I_{k-1} + U_k \bar{V}_k \bar{Q}_{k-1}$$
$$Q_k = \bar{U}_k \bar{V}_k \bar{Q}_{k-1} + \bar{U}_k V_k \bar{I}_{k-1} + U_k V_k Q_{k-1} + U_k \bar{V}_k I_{k-1}$$



Формирование оптических сигналов с фазовой модуляцией (DQPSK)

- Формируемые на выходе оптические импульсы в пике имеют одинаковую мощность при любых фазовых состояниях, однако при минимуме мощности переходы 00-10, 00-01 дают снижение до $P/2$ (рис.). Мощность излучения, близкая к «0», формируется в переходах 00-11.



Формирование оптических сигналов с фазовой модуляцией (DQPSK)

Для сравнения различных форматов кодирования оптических сигналов на рис.1 приведены спектральные характеристики, в которых заметно преимущество DQPSK в более узкой полосе частот, где сосредоточена большая часть энергии. При этом спектральная эффективность возрастает до 2 бит/с/Гц. Использование двойной поляризации DP (Dual Polarization) дает увеличение эффективности до 4 бит/с/Гц. Недостатком DP-DQPSK считается сложность электронной схемы прекодера и оптической схемы модулятора. Формат рекомендован к применению в когерентных системах на скорости около 100 Гбит/с. Количество фазовых состояний оптических импульсов после модуляции может быть увеличено с 4-х до 8, 16, 32, 64 и т. д. и применена дополнительно амплитудная двухуровневая модуляция (рис.2). При этом кодируемое состояние фазы требует трех бит. Эти форматы модуляции не нашли широкого применения в оптических системах из-за низкой устойчивости к дисперсионным искажениям, но широко используются в системах с DVB-T.

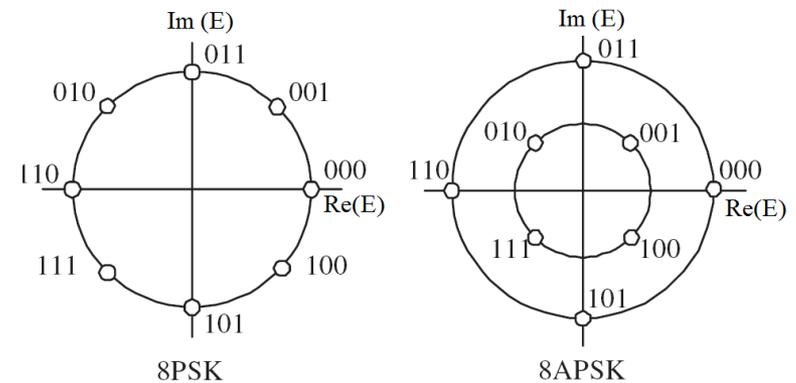
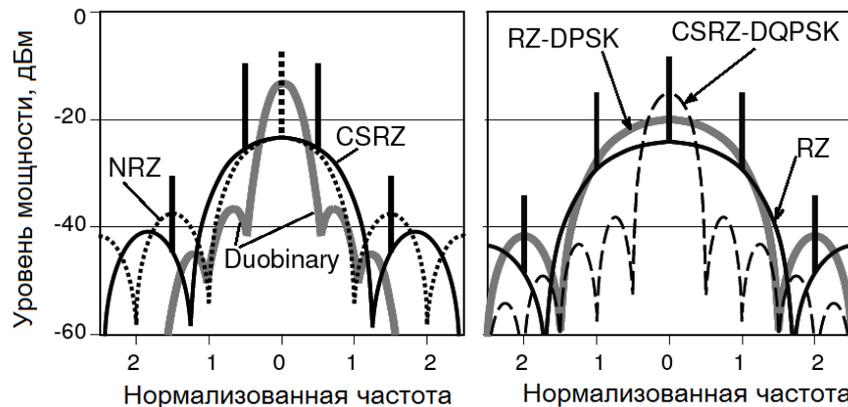


Рис. 1. Спектры оптических сигналов с модуляцией интенсивности (слева) и фазы (справа)

Рис. 2. Круговые диаграммы для представления состояний амплитуды и фазы модулированного оптического сигнала 8PSK и 8APSK с кодовыми группами

Формирование оптических сигналов с многопозиционной квадратурной модуляцией

Оптические сигналы разновидностей квадратурных форматов 8QAM, 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM, 256QAM и 1024QAM применяются также как и nPSK (DnPSK) в радиотехнике и при этом рассматриваются как перспективные для систем с оптическими каналами на скорости до 1 Тбит/с. Примеры конструкций модуляторов mQAM приведены на рис.1. Нетрудно заметить, что увеличение числа квадратурных компонент требует большего числа оптических каналов в модуляторе. Возрастают сложность схемы и требования к точности ее исполнения, возрастает штраф за ухудшение OSNR рис.2, т. е. требуется более высокое соотношение сигнал/помеха в ограниченной полосе частот. При этом возможно использование не только одной оптической частоты, но двух частот на канал и более, и двух поляризаций. Что также имеет свои условные обозначения: две несущих – DC (Dual Carriers), множество несущих – MC (Multiple Carriers), PM (Polarization Multiplexing).

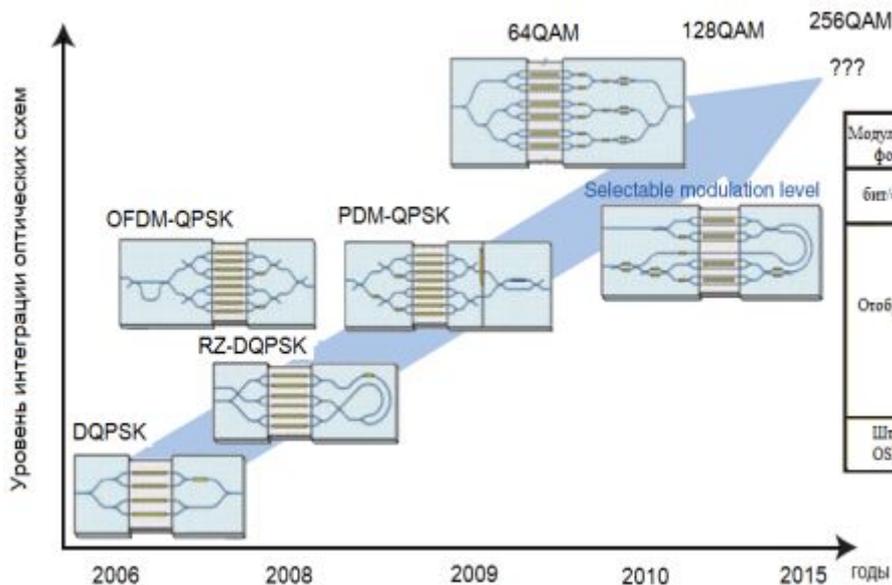
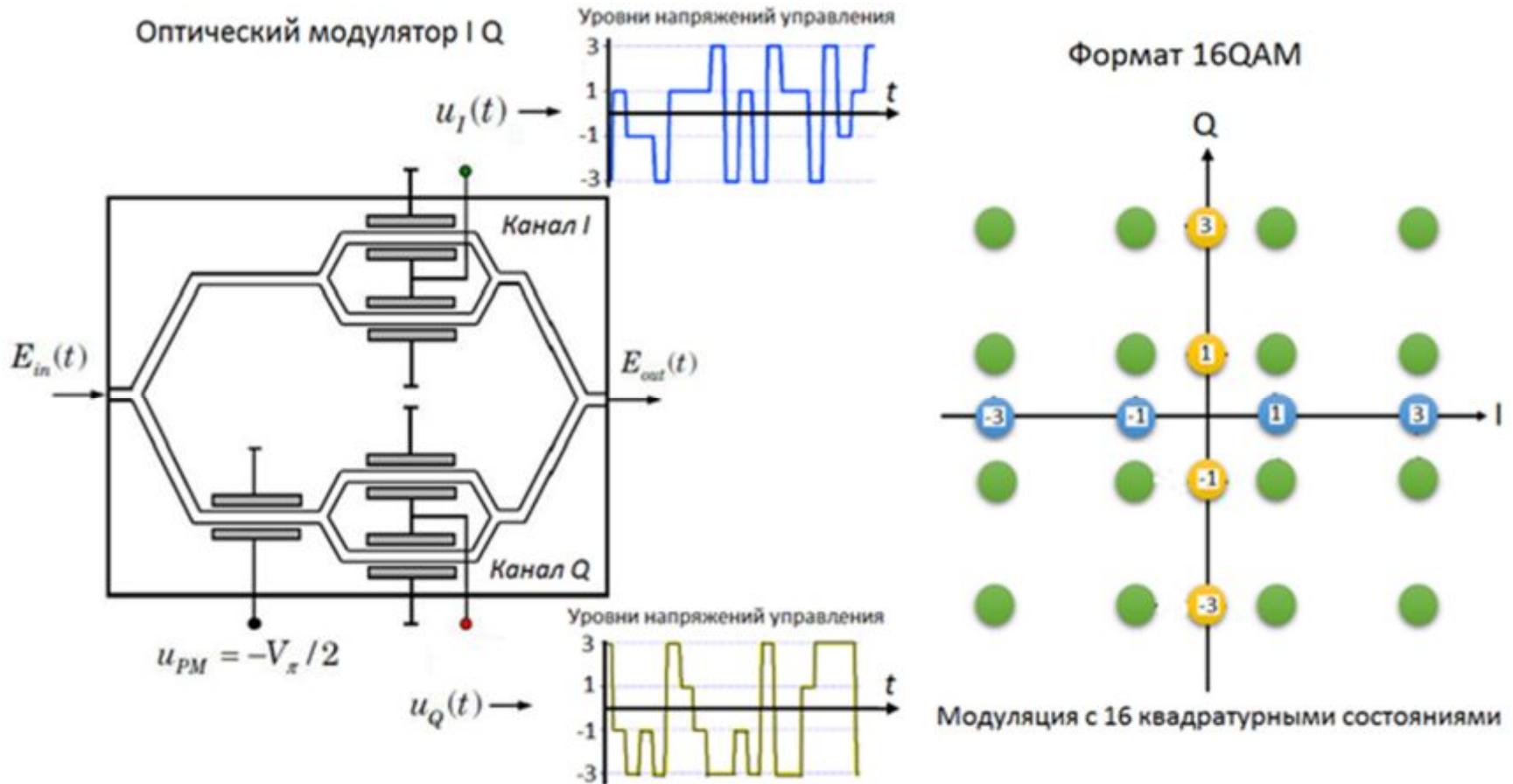


Рис. 1. Развитие схем модуляторов

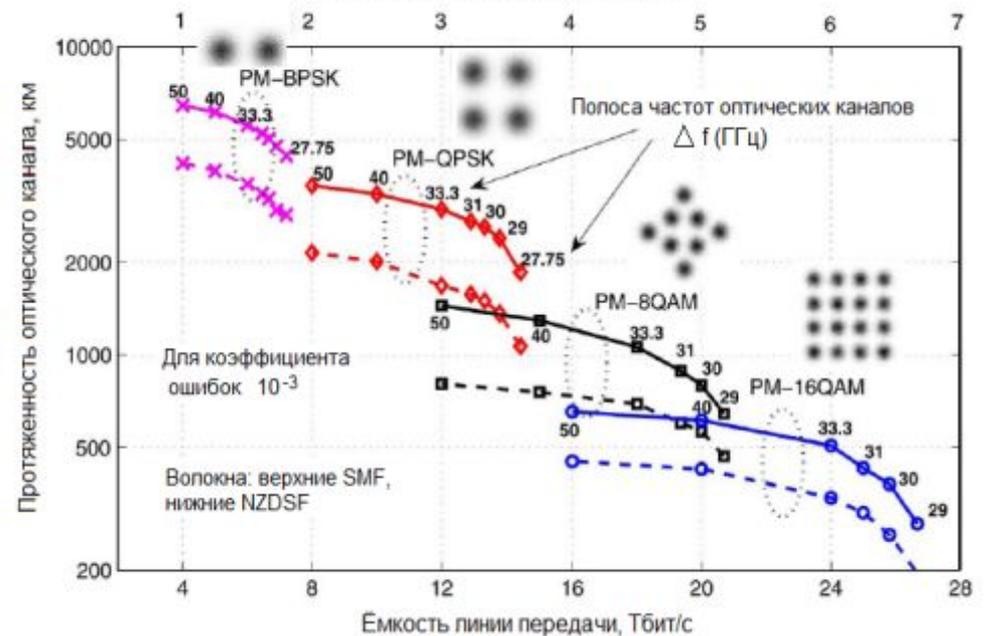
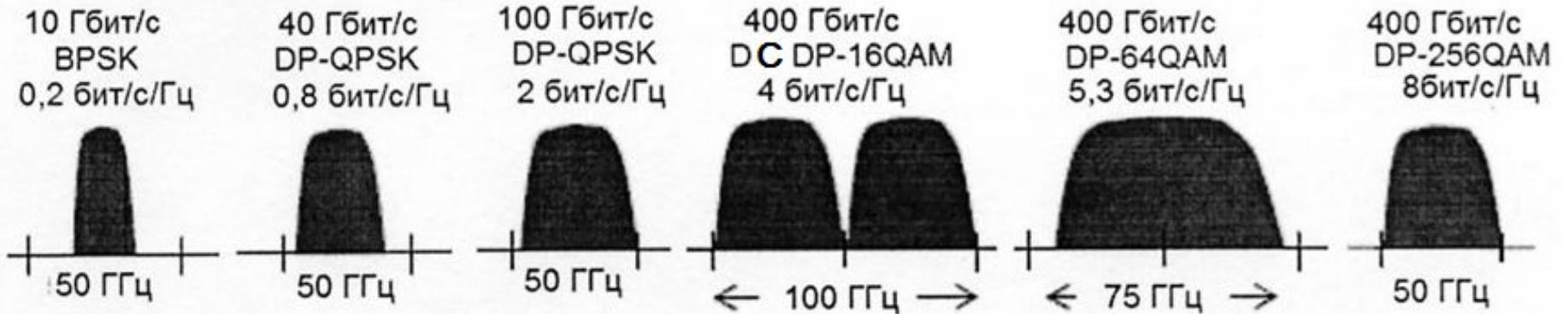
Модуляционный формат	PM-BPSK	PM-QPSK	PM-8QAM	PM-16QAM	PM-32QAM	PM-64QAM
бит/символ	2x1	2x2	2x3	2x4	2x5	2x6
Отображение						
Штраф OSNR, дБ	0	0	2	4	6	8.5

Рис. 2. Формирование фазовых и амплитудно-фазовых форматов модуляции с ортогональной поляризацией и проблема OSNR

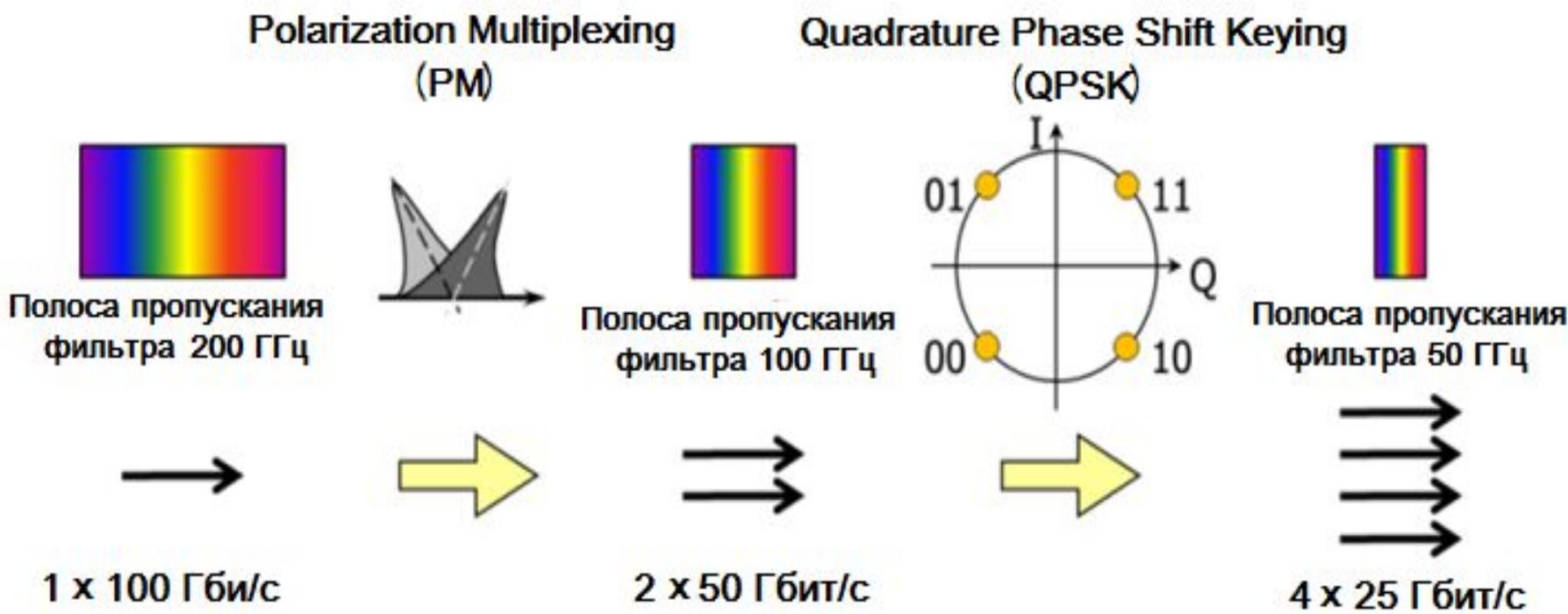
Пример схемы модулятора 16QAM, уровней напряжения после кодирования цифровых блоков и диаграмма состояний амплитудно-фазовых компонент (зелёные круги)



Спектры модулированных оптических сигналов и комплексная сравнительная оценка фазовых (PSK) и амплитудно-фазовых (QAM) форматов оптической модуляции когерентных систем для скорости от 100 Гбит/с до 400 Гбит/с

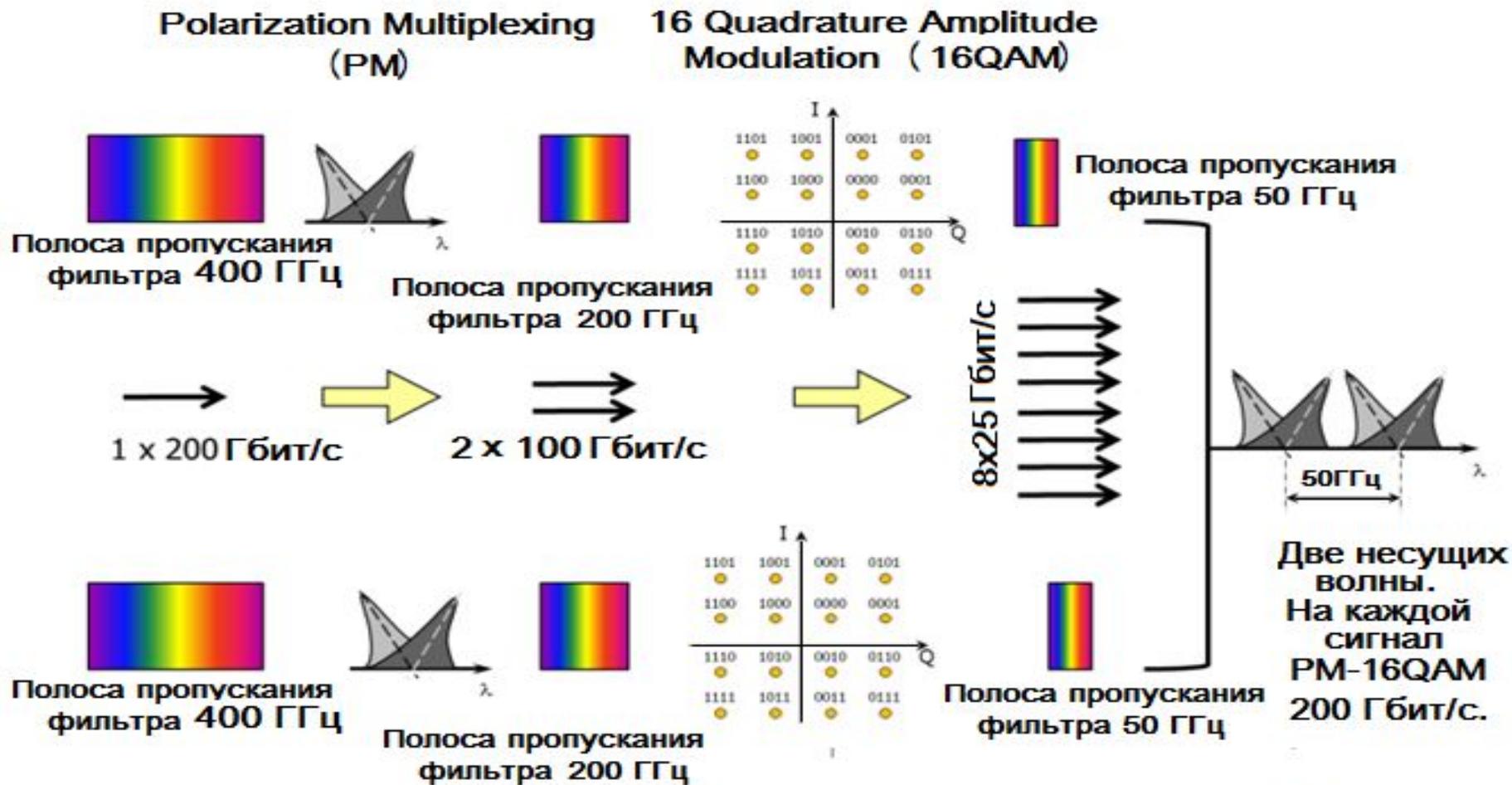


Пример формирования сигнала в формате PM-QPSK



Принцип модуляции в формате PM-QPSK

Пример формирования сигнала в формате PM-16QAM



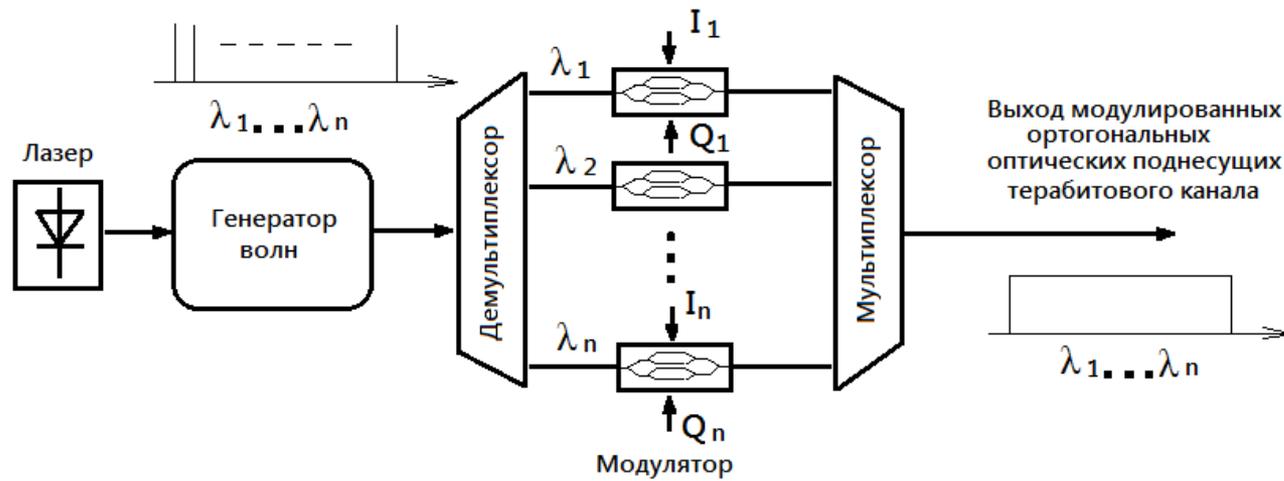
Пример формирования оптического сигнала на скорости до 400 Гбит/с с применением двух оптических несущих частот (DC PM-16QAM)

Выводы:

- В конечном результате переход к большему числу квадратурных компонент позволяет вплотную приблизиться к достижению скорости на спектральный канал в 1 Тбит/с, но за счет уменьшения дистанции передачи, особенно в линиях с волокнами NZDSF. При этом требуется соблюдение интервала разноса оптических частот не менее 50 ГГц между оптическими каналами DWDM.
- Решить проблему сокращения дистанции передачи в форматах QAM предлагается другим форматом, обозначаемым OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex – мультиплексирование ортогонально-разделенных частот), который позволяет реализовать так называемые оптические суперканалы для скорости передачи данных 1 Тбит/с на дистанции от 400–600 км до 2000–3000 км

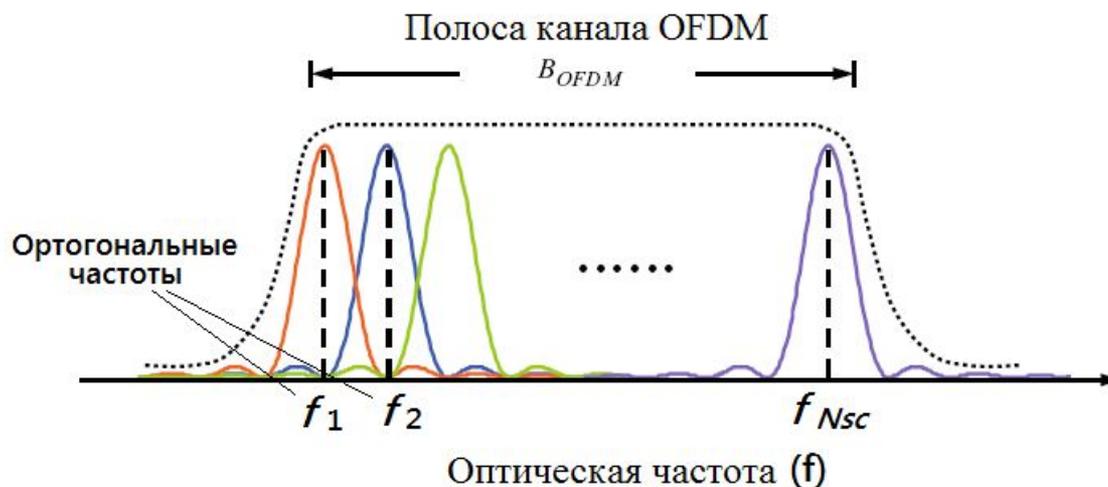
Суперканальные решения

- Использование когерентного формата 100 Гбит/с DP QPSK со сверхплотным расположением каналов (6.5, 12.5, 25, 50 ГГц) позволяет увеличить пропускную способность одного волоконного соединения до 12–16 Тбит/с при использовании стандартного С-диапазона. Использование расширенного С-диапазона или одновременное использование С и L диапазонов позволяют довести суммарную емкость до 20–30 Тбит/с. Однако возрастание числа WDM каналов до нескольких сотен существенно усложняют управление сетью. Увеличение канальной скорости позволит уменьшить число каналов. Кроме того, канальные скорости 400 Гбит/с и 1 Тбит/с могут потребоваться в сетях с новым поколением TerabitEthernet. Увеличение канальной скорости при сохранении одной несущей наталкивается на проблему резкого уменьшения дальности передачи без регенерации. Необходимость строительства дополнительных усилительных пунктов приводит к удорожанию систем связи. Оптимальным решением, позволяющим сохранить дальность передачи и увеличить канальную скорость, является использование множества несущих частот в одном объединенном канале, который принято называть суперканалом, схема формирования которого приведена на рис.



Суперканальные решения

- Несущие частоты, относящиеся к одному каналу, принято называть поднесущими частотами. Они формируются от одного лазерного источника оптической схемой нелинейной генерации. Разделенные демультиплексором поднесущие волны λ_1 - λ_n независимо модулируются. Поскольку наибольшей производительностью обладают системы связи на основе формата DP QPSK (входы модулятора I1-In, Q1-Qn), то именно его целесообразно использовать в сочетании с одной из технологий передачи информации на многих поднесущих OFDM. Соседние поднесущие благодаря поляризации ортогональны, т. е. независимы, несмотря на частичное перекрытие спектров модулированных сигналов.
- Суперканал – это совокупность нескольких (порядка 10) очень плотно расположенных оптических каналов, которые обычно называют оптическими поднесущими (рис.).



Суперканальные решения

- Предполагается, что суперканал при прохождении по оптической сети будет управляться оптическими маршрутизаторами и коммутаторами как единое целое и его суммарная скорость передачи информации будет в терабитном диапазоне. Например, терабитный суперканал может быть образован 10 поднесущими, каждая из которых передает сигнал со скоростью 100 Гбит/с в формате DP-QPSK. Таким образом, эта технология будет способна поддерживать будущий стандарт Terabit Ethernet (рис.1). Использование кодирования OFDM PM-QPSK дает частотный выигрыш около 1,5 раза при построении систем с каналами до 1 Тбит/с из-за исключения защитных интервалов внутри суперканала. Кроме того сокращается объем оборудования благодаря использованию фотонных интегральных схем (рис. 2).
- Применение других форматов кодирования оптических поднесущих частот для канала OFDM (8QAM, 16QAM и т. д.) также позволяет повысить эффективность использования спектра за счет сокращения числа поднесущих и уменьшения требуемого диапазона волн передачи. При этом скорость передачи данных в полосе спектральных диапазонов С и L может измеряться величинами от 20 Тбит/с, а спектральная эффективность быть 8–30 бит/с/Гц и более при когерентном (гомодинном) приеме.

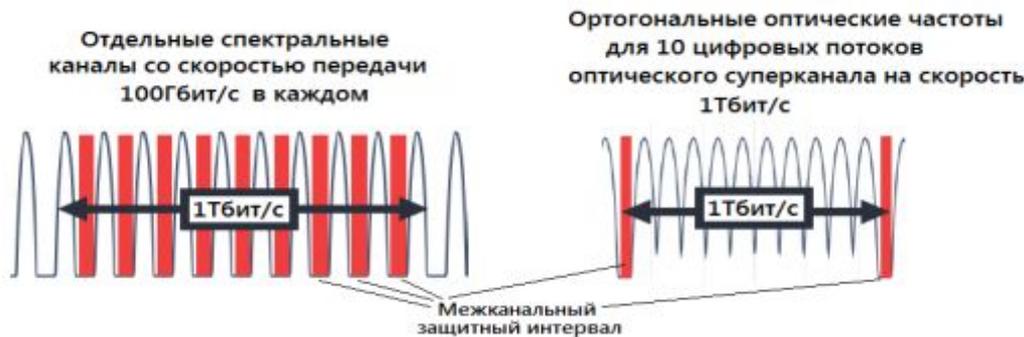


Рис. 1. Частотное преимущество использования OFDM для суперскоростных оптических каналов с кодированием PM-QPSK

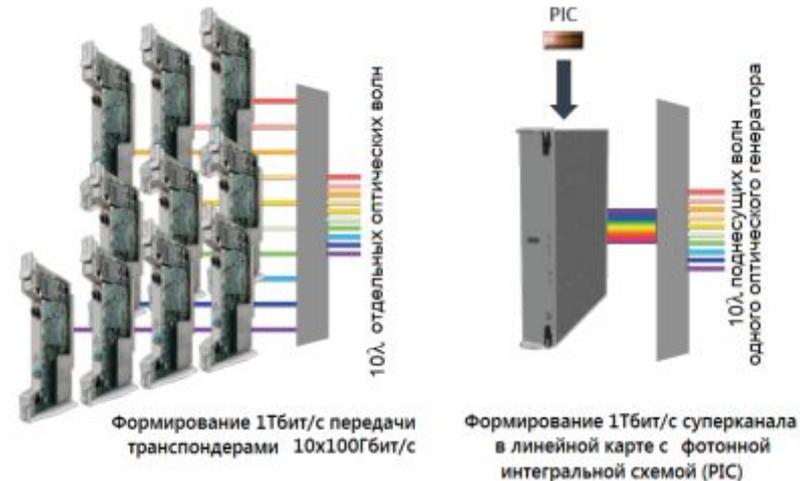


Рис. 2. Преимущества формирования суперканала 1 Тбит/с фотонной интегральной схемой PIC

Оценка спектральной эффективности формирования оптических сигналов и проблемы при передаче сигналов в оптических каналах

- Для оценки спектральной эффективности формирования сигналов для оптических каналов используется теоретический критерий К. Шеннона (теорема Шеннона).
- Рассматривая все возможные многоуровневые и многофазные методы шифрования (кодирования и модуляции), теорема Шеннона утверждает, что пропускная способность канала (оптический спектральный канал таким является), *означающая теоретическую верхнюю границу скорости передачи данных*, которые можно передать с данной средней мощностью сигнала через аналоговый канал связи, подверженный аддитивному белому гауссовскому шуму мощности равна (оптический шум спонтанной эмиссии ASE можно таким считать):

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

- где C – пропускная способность канала, бит/с; B – полоса пропускания канала, Гц; S – полная мощность сигнала над полосой пропускания, Вт; N – полная шумовая мощность над полосой пропускания, Вт; S/N – частное от деления отношения сигнала к его шуму (SNR) на гауссовский шум, выраженное как отношение мощностей. Кроме того, предел Шеннона в технике волоконно-оптической связи должен учитывать нелинейные свойства волокон (эффект Керра) при увеличении совокупной мощности оптических каналов или для одного канала сохранения требуемого OSNR при увеличении оптической мощности.

Проблема спектральной эффективности

- Детальное исследование роли каждого из нелинейных эффектов на ограничение спектральной эффективности показано на рис. 1. Исследование показывает, что наихудшие условия создают эффекты фазовой кросс-модуляции (XPM) и четырехволновое смешивание (FWM). Эти явления ограничивают спектральную эффективность 8 бит/с/Гц при соотношениях сигнал/шум 20–25 дБ и дисперсии 17 пс/нм·км для волокон SMF. Также существует зависимость спектральной эффективности от дисперсии (рис.2.)

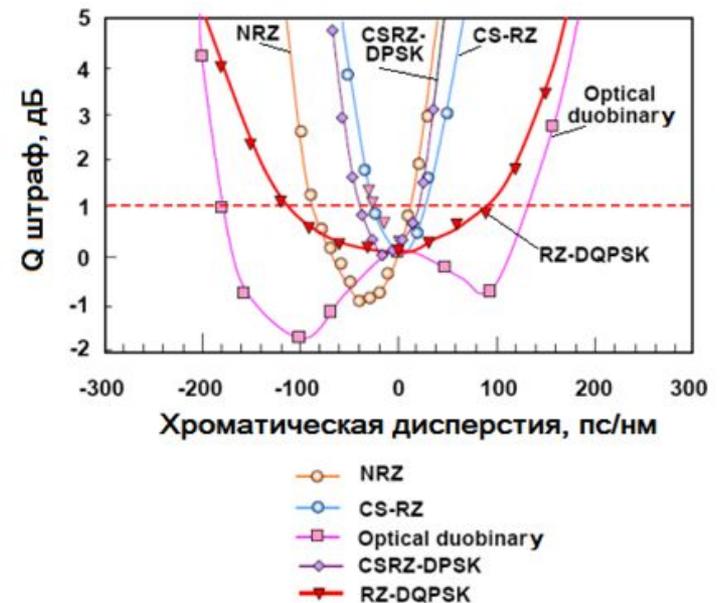
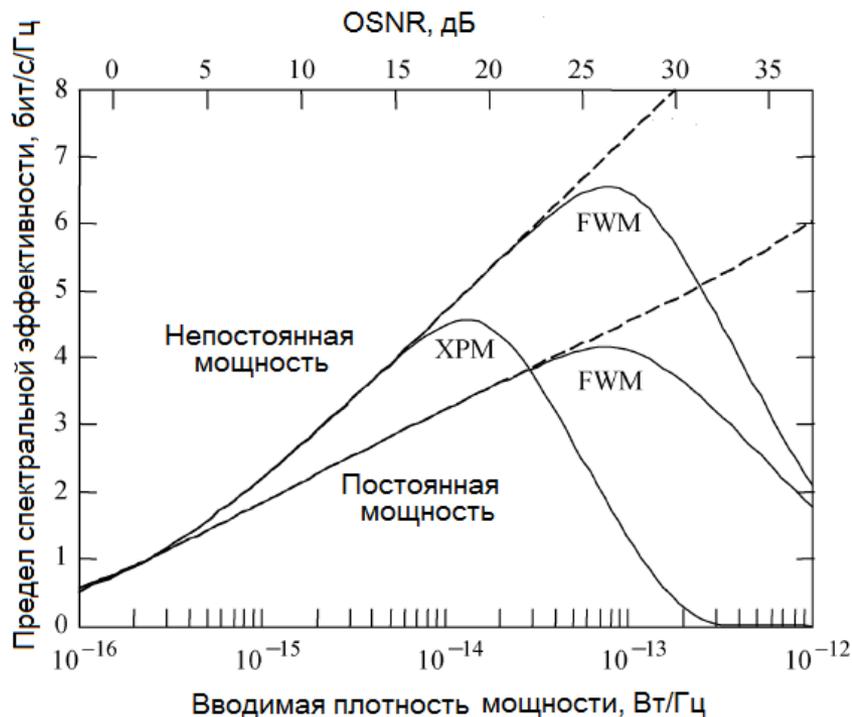
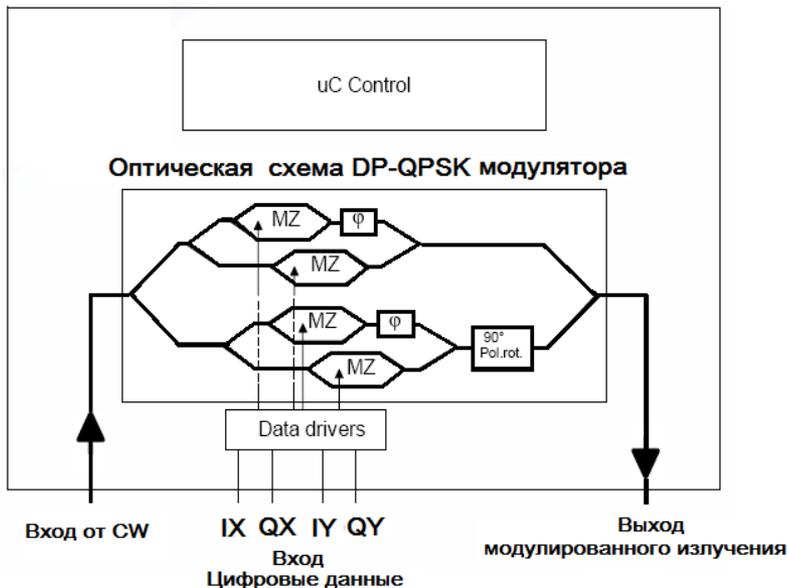


Рис. 1. Пример предела спектральной эффективности оптического канала с учетом нелинейности волокна

Рис. 2. Пример характеристик устойчивости сигналов (штраф) различных форматов передачи к хроматической дисперсии на скорости 40 Гбит

Пример: оптический передатчик Communication Technologies AG Optical DP-QAM Transmitter SHF 46215 B с кодированием DP-QPSK

- Оптический передатчик SHF 46215 B представляет собой блок формирования сигналов QAM с двумя плоскостями поляризации (X- и Y-поляризация) скоростных режимов до 32 Гсимвол/с оптических данных и с общей скоростью до 256 Гбит/с. На выходе блока формируется модулированное излучение в двух ортогональных плоскостях с битовой синхронизацией во времени. Основу блока составляют оптические модуляторы Маха-Зендера (рис.), совмещенные с фазовращателями, электронная схема управления модуляторами (Data drivers) и система автоматического мониторинга работоспособности блока (uC Control).



Контрольные вопросы 1

- 1. Какие требования предъявляются к оптическим сигналам, передаваемым в когерентных системах?
- 2. Какие параметры оптического излучения одномодовых лазеров являются предметом внимания с точки зрения построения схем модуляторов?
- 3. Какие виды оптической модуляции и мультиплексирования могут комплексно сочетаться при построении когерентной системы передачи?
- 4. Какие варианты построения схем оптических передатчиков когерентных систем являются предметом рассмотрения?
- 5. Какие форматы оптических импульсов можно формировать модулятором MZ?
- 6. Чем отличаются оптические сигналы в форматах RZ и CSRZ?
- 7. Что обозначают аббревиатуры ASK и PSK?
- 8. Чем ограничено использование прямой модуляции оптического излучения в каналах со скоростями от 10 Гбит/с до 1 Тбит/с?
- 9. Сколько ступеней преобразования оптического сигнала в формирователе CSRZ?
- 10. Объяснить, как формируются оптические сигналы формата DB?
- 11. Чем отличаются спектры сигналов в форматах модуляции NRZ, RZ, CSRZ, DB?
- 12. Какие проблемы проявляются в системах передачи при увеличении скорости передачи данных в оптических каналах с фиксированным межканальным интервалом?
- 13. В чем преимущества фазовой модуляции nPSK в оптических каналах?
- 14. Объяснить, как формируются сигналы в форматах BPSK и DPSK?

Контрольные вопросы 2

- 15. Чем отличаются спектры сигналов DPSK с различными формами импульсов (NRZ, RZ, CSRZ)?
- 16. Какие устройства (электрические и оптические) используются для построения схем формирователей оптических канальных сигналов в форматах D(Q)PSK, DP-D(Q)PSK?
- 17. Какие особенности имеют сигналы, формируемые с двойной поляризацией излучения?
- 18. Что такое спектральная эффективность оптического сигнала?
- 19. Как влияет на спектральную эффективность использование большого числа фазовых и амплитудных состояний модулированного оптического сигнала?
- 20. Составить рекомендации по применению форматов модуляции PM-BPSK, PM-QPSK, PM-16QAM при построении оптических каналов для магистральных, региональных и местных (метро) оптических транспортных сетей?
- 21. В чем преимущества формата передачи оптических каналов OFDM, при организации оптических каналов на скоростях 100 Гбит/с до 1 Тбит/с?
- 22. Чем определяется верхняя граничная скорость передачи данных в оптических каналах?
- 23. Что представляют собой пределы Шеннона (линейный и нелинейный) в технике оптических каналов связи? Чем они обусловлены?
- 24. Как влияют пределы Шеннона на уровни передачи сигналов в оптических каналах?
- 25. Какие проблемы по наращиванию скорости передачи в оптических каналах существуют при различных форматах сигналов?
- 26. Какие модули и блоки предусматривают производители техники оптической связи в передатчиках и транспондерах оптических каналов?

Задача

- Составить таблицы двоичных кодовых состояний компонент для PM-8QAM, 32QAM и 64QAM используя примеры на слайдах 28, 29, 31, 33, 34 и отобразить их на рисунках. (Примеры ниже)

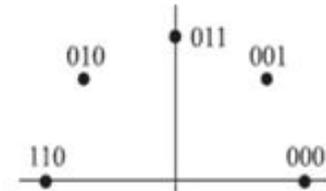
Состояние	Двоичный код
0	0000xxxx
1	0001xxxx
n	1111xxxxxx



BPSK



QPSK



8PSK