



Многоуровневые форматы модуляции для когерентных оптических систем связи

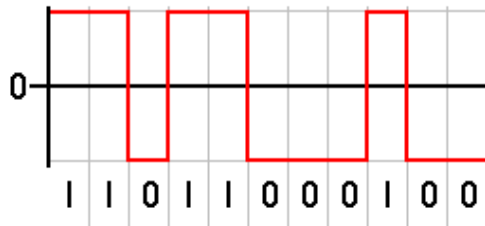
Наний О.Е.
Профессор МГУ
Заместитель директора
компании Т8 НТЦ
г. Москва

Содержание

1. Оптические системы связи: история и современное состояние
2. Эра когерентной связи
3. Пропускная способность ВОЛС
4. Многоуровневые форматы с неравными вероятностями реализации значений символов
5. Форматы с малой нелинейностью

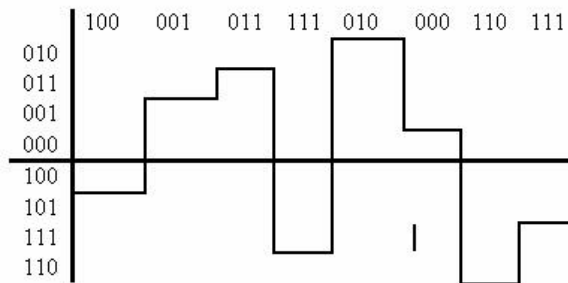
1. Оптические системы связи: история и современное состояние

Низкочастотный информационный сигнал (сообщение)



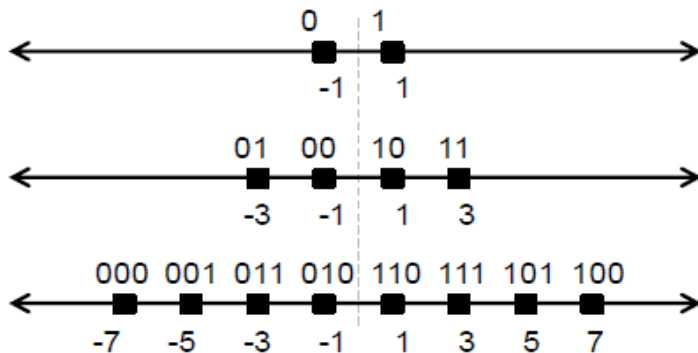
Бинарный сигнал: временная форма и значения символов.

Символ может принимать 2 значения и переносит 1 бит информации.



8 – уровневый сигнал: (временная форма и значения символов (PAM)).

Символы принимать 8 значений. Каждый символ переносит 3 бита информации.



Символьное представление (диаграммы) бинарного, 4-х уровневого и 8-уровневого сигнала.

Представлены значения символов в кодировке Грэя, используемой для минимизации ошибок.

Оптические сигналы

В информатике и технике связи сигналом называется физический процесс, несущий информацию. Среди параметров процесса выбирается один или несколько параметров, которые используются для передачи информации.

Оптические сигналы - это модулированное световое излучение. Метод детектирования, тип источника света и метод модуляции определяют допустимый формат модуляции.

Мы будем рассматривать **цифровые системы связи**, в которых информация передается дискретно с некоторой **символьной скоростью** и символ принимает конечное число значений.

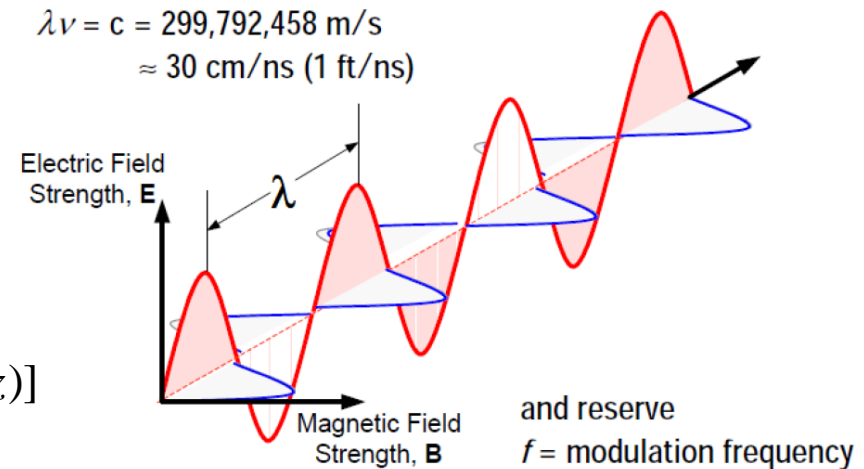
В зависимости от числа значений, принимаемых символом, среднее количество информации, переносимой символом, может быть различным.

Плоская монохроматическая гармоническая волна.

Describe light with

λ = wavelength, ν = frequency
 ≈ 1500 nm ≈ 200 THz

$\lambda \nu = c = 299,792,458$ m/s
 ≈ 30 cm/ns (1 ft/ns)



$$\vec{E}(z,t) = \vec{e}_x [a_1 \cos(\omega t - kz) + a_2 \cos(\omega t + \pi/2 - kz)] + \vec{e}_y [a_3 \cos(\omega t - kz) + a_4 \cos(\omega t + \pi/2 - kz)]$$

Электрическое поле плоской монохроматической волны, распространяющейся вдоль оси z в положительном направлении, полностью описывается 5 числами: четырьмя действительными амплитудами и частотой

Четверка чисел – евклидовы координаты точки, изображающей волну в четырехмерном фазовом пространстве.

Линейно поляризованная волна описывается парой чисел (амплитуд) – координатами в 2D евклидовом пространстве.

Можно использовать амплитуду и фазу.

Методы описания плоской монохроматической волны

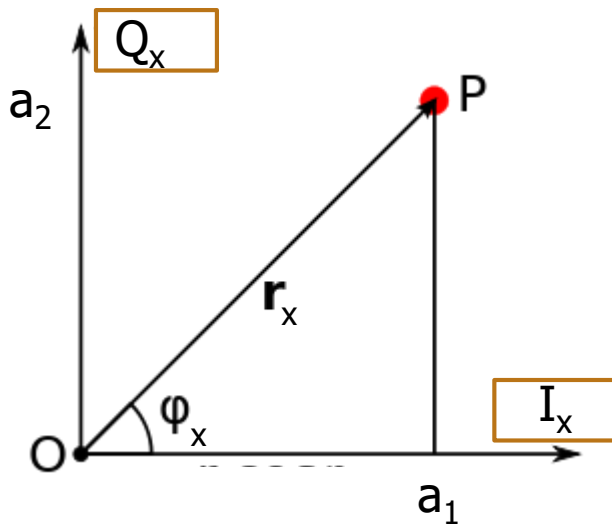
Фазовое представление: точка в 4-мерном (4D) фазовом пространстве.

В **декартовой** (картезианской) системе координат волна представляется точкой с координатами (a_1, a_2, a_3, a_4) .

Ввиду сложности восприятия 4-мерного пространства волну раскладывают на две ортогональные поляризационные компоненты (обычно они соответствуют колебаниям поля E вдоль двух ортогональных z и друг другу направлений x, y).

В этом случае волна представляется двумя проекциями 4D точки на две плоскости, соответствующие двум поляризациям.

Каждая поляризационная компонента описывается точкой в 2-мерном фазовом пространстве. Колебания вдоль оси x описывают координаты (a_1, a_2) , вдоль y – (a_3, a_4) .



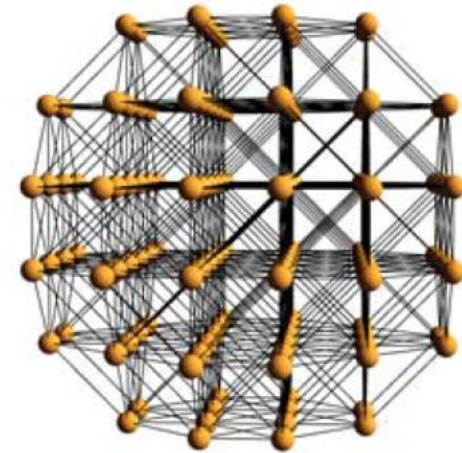
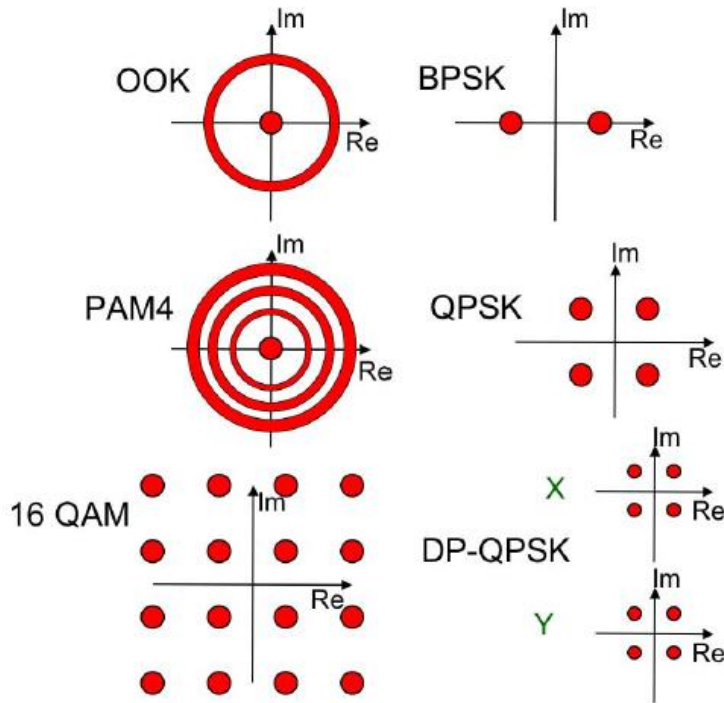
Каждая поляризационная компонента описывается точкой в 2-мерном фазовом пространстве.

Колебания вдоль оси x описывают **декартовы координаты** (a_1, a_2) , вдоль y – (a_3, a_4) . Оси в декартовых координатах называют синфазной (I_x) и квадратурной (Q_x).

Колебания вдоль оси x в полярных координатах описываются полярными координатами (r_x, φ_x)

Колебания вдоль оси y в полярных координатах описываются полярными координатами (r_y, φ_y)

Диаграммы современных форматов модуляции



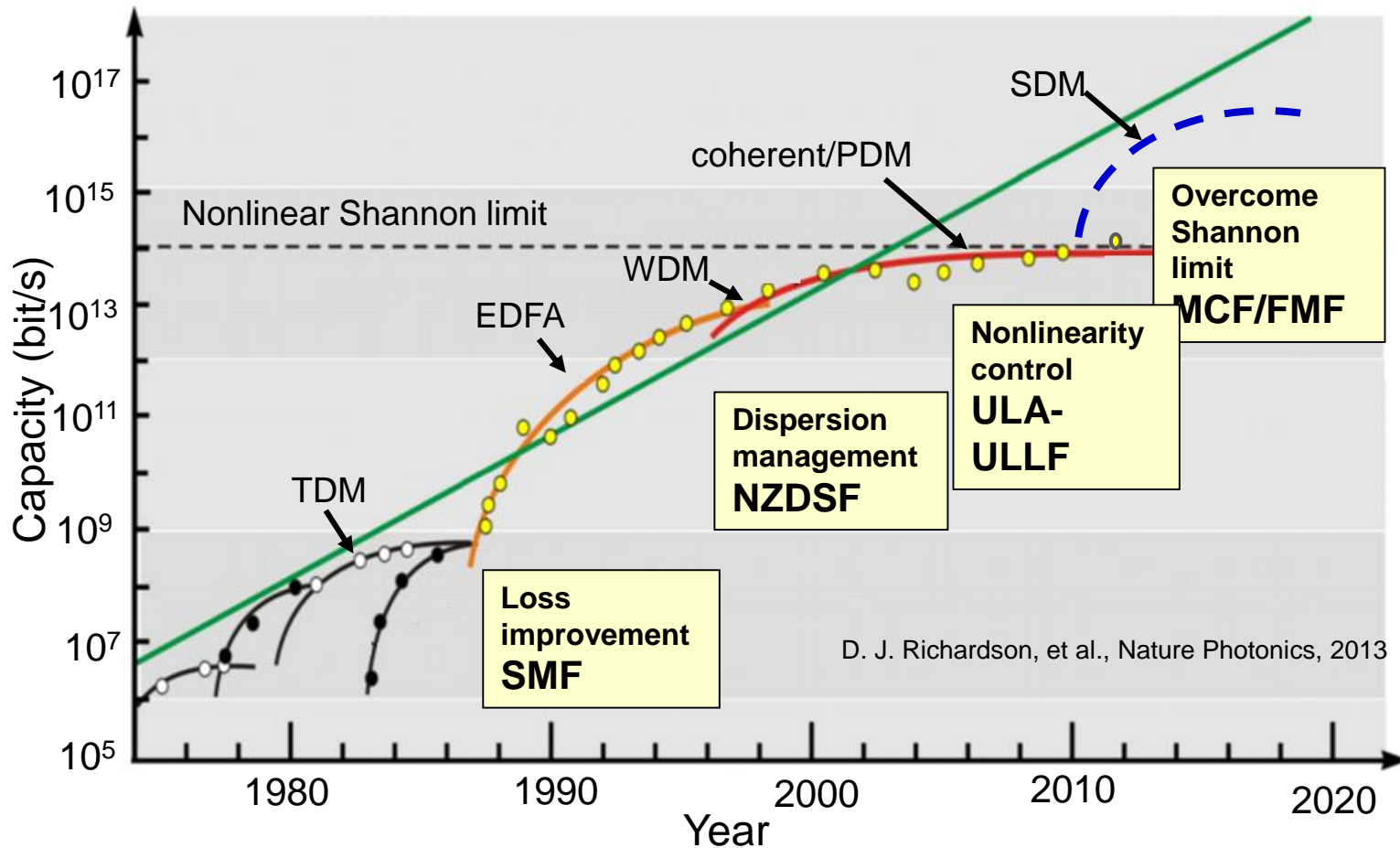
256-QAM формат 4 – мерный формат когерентных систем связи

Форматы некогерентных систем связи: OOK, PAM4

Форматы когерентных систем связи: BPSK, QPSK, DP-QPSK, 16-QAM

Цифровой оптический сигнал. Когерентное детектирование: символы принимают значения, характеризуемые точками в 4-мерном пространстве. Прямое детектирование: символы характеризуются 1-м параметром – амплитудой (мощностью).

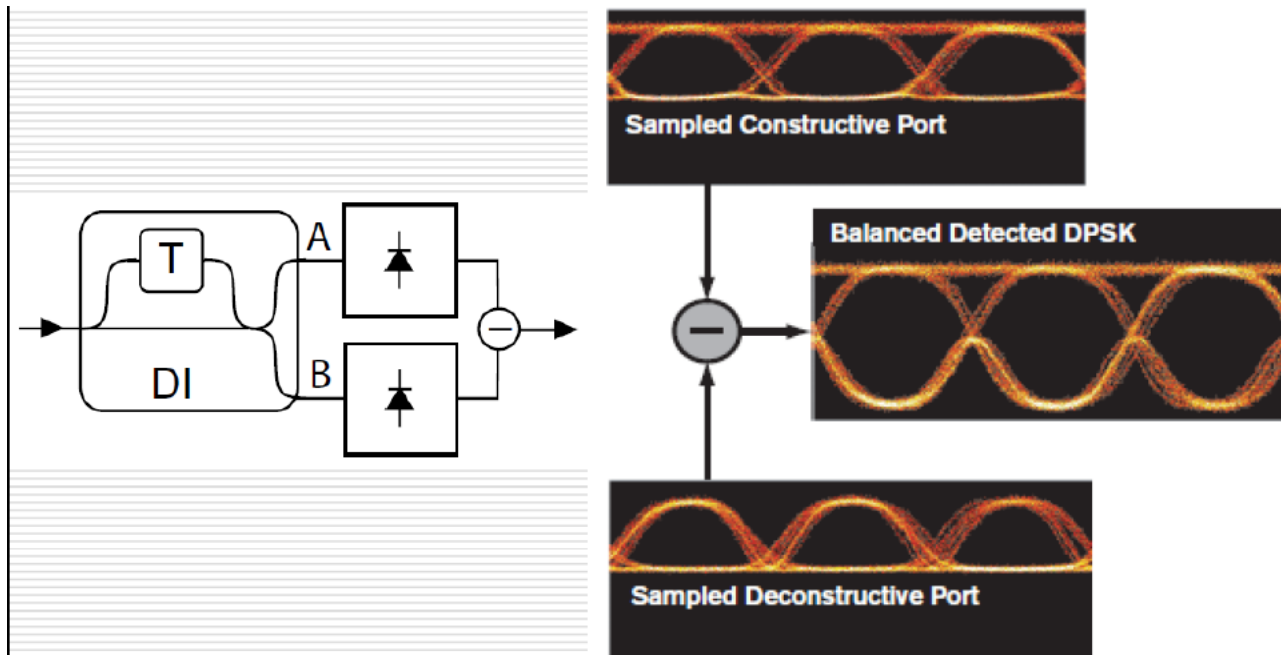
Эволюция технологий передачи



NZDSF: Non-zero-dispersion-shifted fiber
 ULA-ULLF: ultra-large-area ultra-low-loss fiber
 MCF/FMF: multicore fiber /few-mode fiber

PDM: polarization-division-multiplexed
 SDM: space-division-multiplexed

Дифференциальное детектирование бинарного фазового формата



В принципе детектирование возможно с использованием одного фотоприемника, однако эффективнее использовать балансный приемник. Используется как приемник DBPSK форматов.

Многоуровневые форматы в системах связи с прямым детектированием

- Символьная скорость $R_S = 1/T_S$
- Битовая скорость $R_B = R_S \log_2 M$

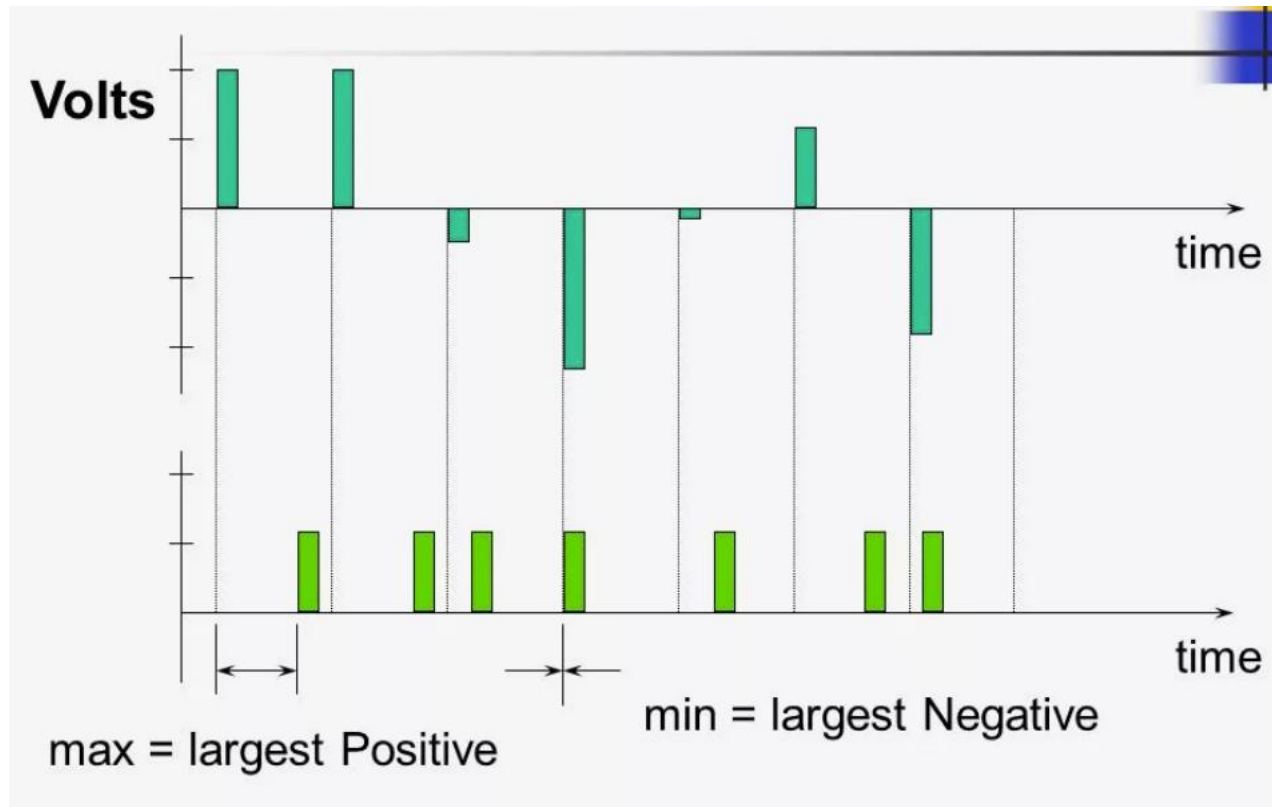
Символьная эффективность $\log_2 M$ (бит)/(символ).

Символьную скорость можно уменьшить при заданной битовой скорости.

nPAM - мощность сигнала принимает n значений. С увеличением n растет битовая скорость, полоса модуляции не меняется, падает дальность

nPPM - положение импульса принимает n значений. С увеличением n растет битовая скорость и полоса модуляции, дальность при счете фотонов уменьшается значительно медленнее, чем при nPPM

PPM



Кодирование информации положением передаваемого импульса.

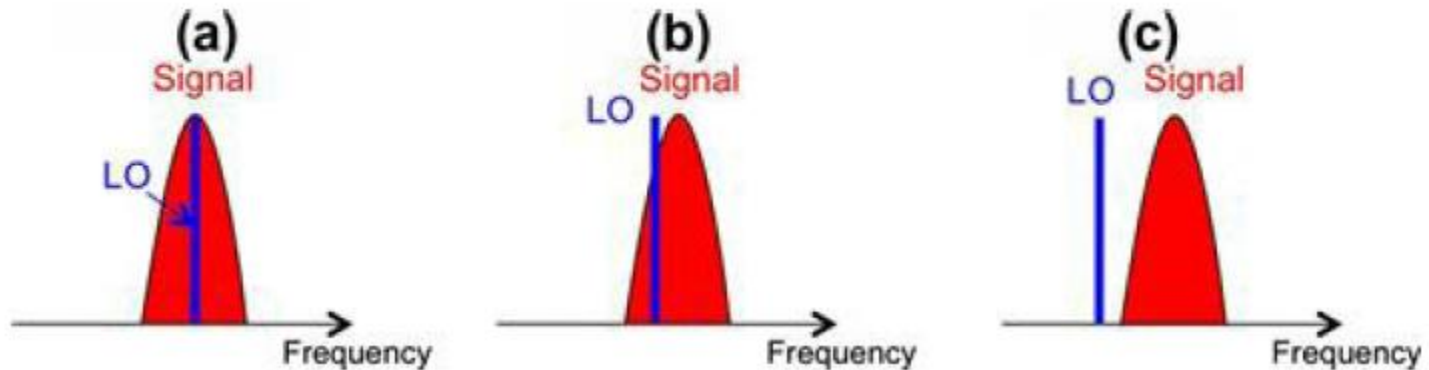
PPM – pulse position modulation.

Вверху – электрический PAM сигнал

Внизу – электрический PPM сигнал

2. Эра когерентной связи

Виды когерентных приемников



Гомодинные

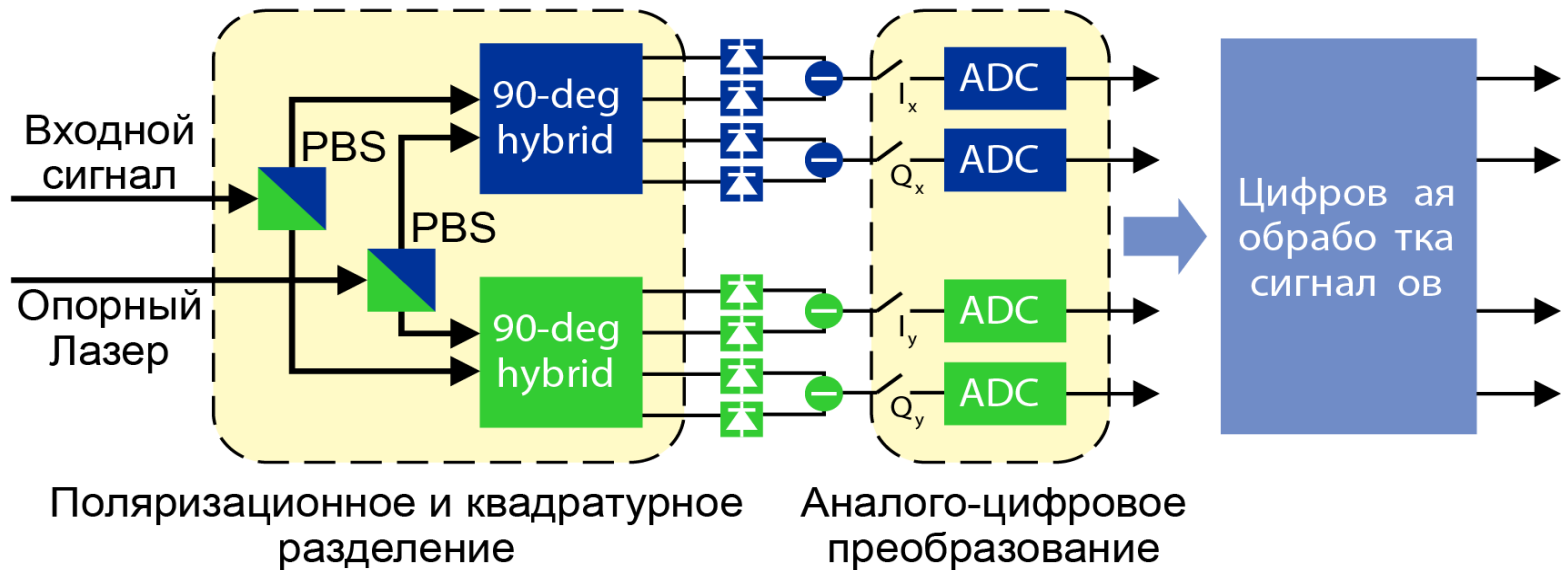
Интрадинные

Гетеродинные

Гетеродинный приемник – по сути это устройство, осуществляющее уменьшения несущей частоты – из оптического диапазона частота несущая частота переводится в радиодиапазон. Достаточно двух детекторов для двух поляризаций.

Гомодинные и интрадинные приемники – необходимы 4 приемника.

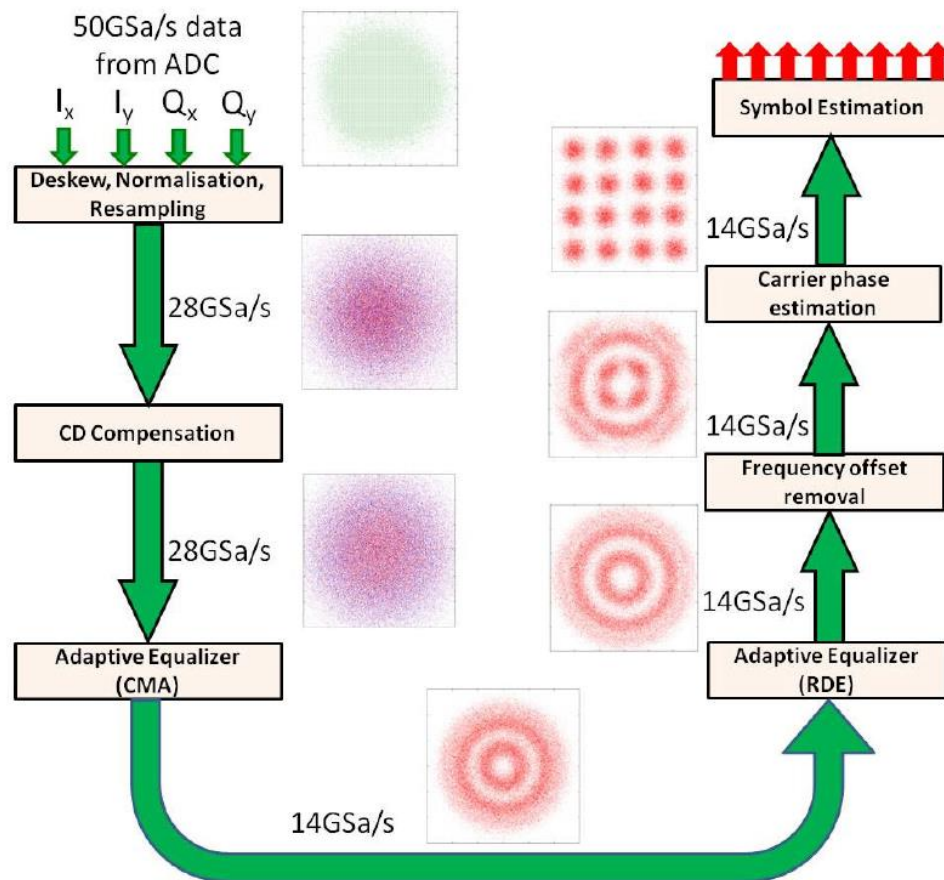
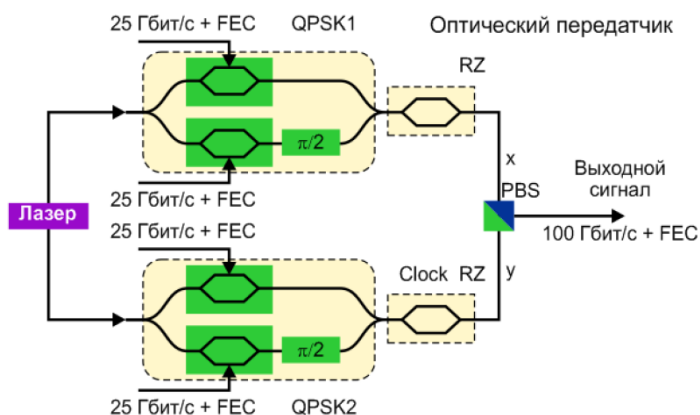
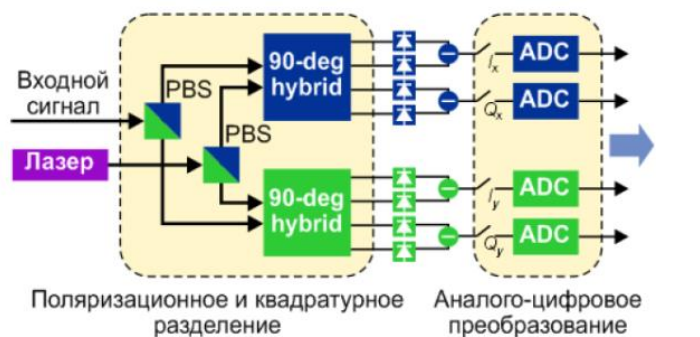
Структура когерентного гомодинного или интрадинного приемника



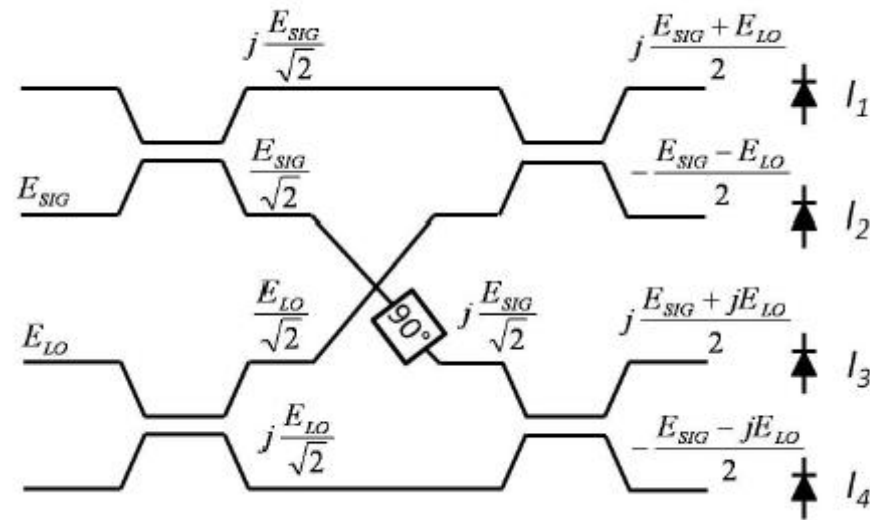
Восстанавливается комплексная амплитуда оптического электромагнитного поля в 2-х поляризациях

Линейное преобразование 4-х амплитудных компонент сигнала в электрический ток

Цифровая обработка сигналов в когерентном приемнике. DP 16QAM



Структура волоконно-оптического 90° гибрида (1 поляризация)



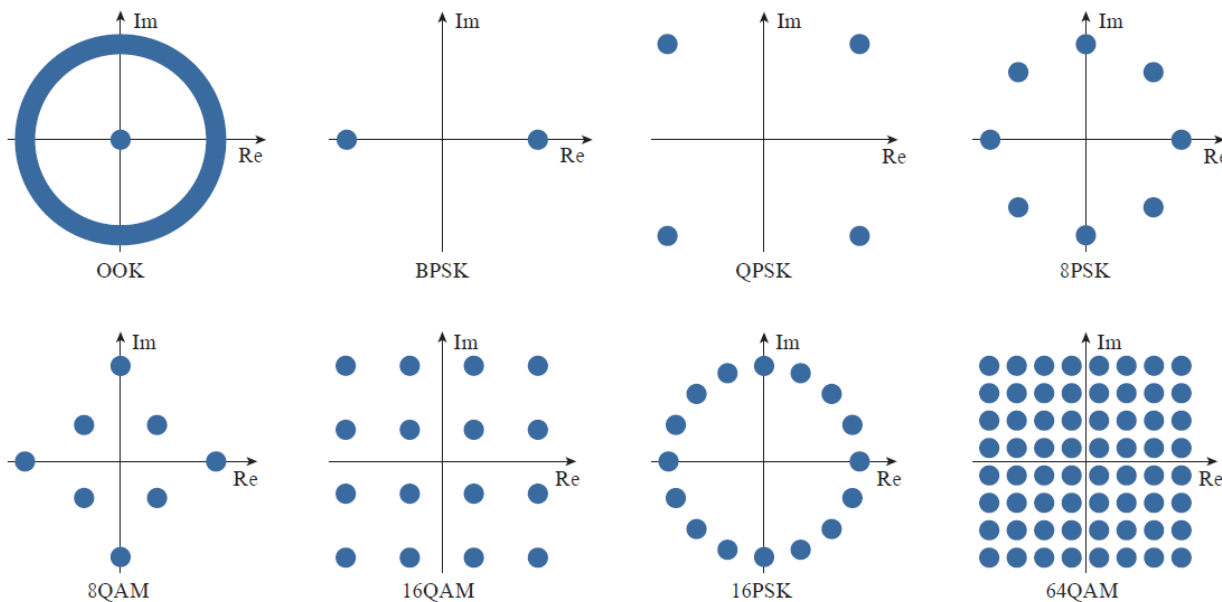
$$I_1 \sim |E_{SIG}|^2 + |E_{LO}|^2 + 2\text{Re}\{E_{SIG}E_{LO}^*\}$$

$$I_2 \sim |E_{SIG}|^2 + |E_{LO}|^2 - 2\text{Re}\{E_{SIG}E_{LO}^*\}$$

$$I_3 \sim |E_{SIG}|^2 + |E_{LO}|^2 + 2\text{Im}\{E_{SIG}E_{LO}^*\}$$

$$I_4 \sim |E_{SIG}|^2 + |E_{LO}|^2 - 2\text{Im}\{E_{SIG}E_{LO}^*\}$$

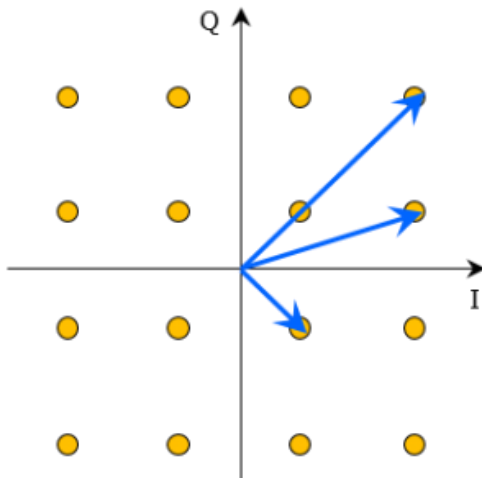
Многоуровневые форматы модуляции



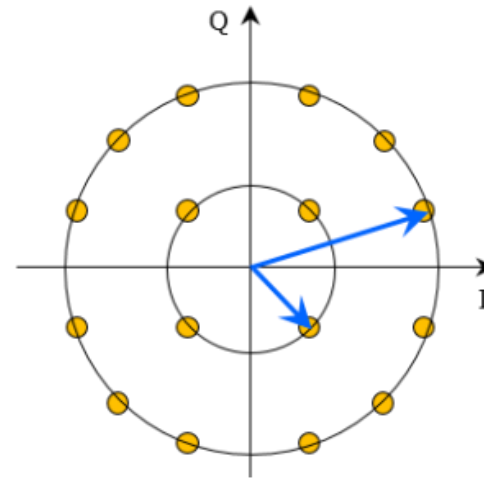
Расположение значений символов (диаграммы созвездий) в двумерном фазовом пространстве для различных форматов модуляции оптического сигнала одной поляризации [Конышев 2014]. Диаграммы созвездий (Constellation Diagram, Constellation) показывают совокупность номинальных значений символов на комплексной плоскости.

Многоуровневые форматы модуляции

16QAM Constellation: 3 Amplitude Levels

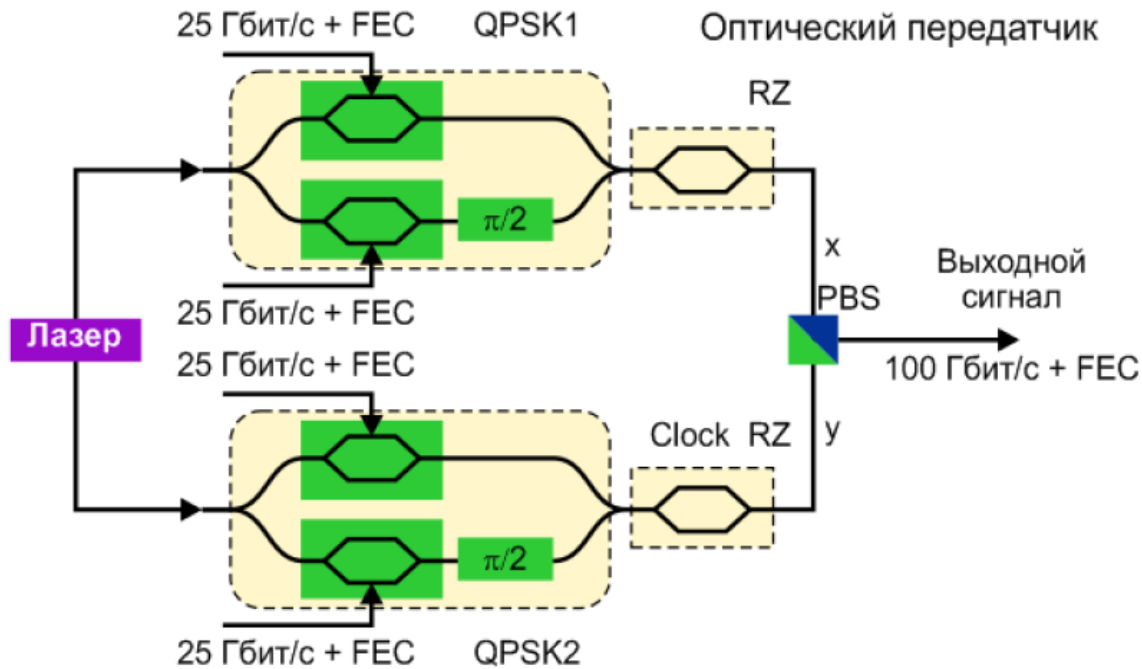


16APSK Constellation: 2 Amplitude Levels



Расположение значений символов на амплитудно-фазовой диаграмме (созвездие точек) может быть произвольным. Наиболее часто используются квадратурные (QAM) форматы с расположением точек созвездия в узлах квадратной решетки. Реже используются амплитудно-фазовые форматы (APSK)

Передатчик с поляризационным мультиплексированием для многоуровневых форматов



Передатчик формирует 4 независимых ортогональных оптических канала. Для примера показана схема формирования DP QPSK сигнала. Пунктиром показано устройство для преобразования NRZ в RZ. Можно формировать сигнал DP mQAM
 ! Если входные сигналы взаимосвязаны, то можно реализовать любой формат модуляции.

3. Пропускная способность ВОЛС

Многоуровневые форматы. Скорость передачи информации

- Символьная скорость $R_S = 1/T_S$
- Битовая скорость $R_B = R_S \log_2 M$

Символьная эффективность $\log_2 M$ (бит)/(символ).

Символьную скорость можно уменьшить при заданной битовой скорости.

**При равной вероятности всех значений.*

Что ограничивает увеличение числа значений (уровней), принимаемых сигналом?

Ответ: рост числа ошибок

Количество информации в сообщении без ошибок Неравновероятное распределение значений

Количество информации в знаке зависит от вероятности его появления:

$$h_i = \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right) = -\log_2 p_i$$

Среднее количество информации на знак в системе знаков

$$H = \sum p_i \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right) \leq \log_2 n \quad H = -\sum_i p_i \log_2 p_i \leq \log_2 M$$

При безошибочной передаче информации наибольшее количество информации можно передать, **если использовать все знаки с равной вероятностью.**

В реальных условиях может быть целесообразно использовать не равновероятные системы кодирования.

Количество информации в сообщении без ошибок при вероятностном шейпинге (значения не равновероятны)

Количество (объем) информации V в сообщении без ошибок равно произведению количества K символов на среднюю информацию I , переносимую символом:

$$V = K \cdot I$$

Величина I называется также символьной эффективностью формата модуляции.

*Символьная эффективность I (средняя информация на символ):

$$I = -\sum_i p_i \log_2 p_i \quad \sum_i p_i = 1$$

*При равновероятном распределении значений, которые может принимать символ, символьная эффективность I максимальна:

$$I = -\log_2 \frac{1}{M} = \log_2 M \quad M - \text{число значений (уровней), принимаемых символом}$$

Формула Шеннона, модель AWGN

Емкость (пропускная способность) канала зависит от мощности и ширины полосы.

$$R_{\max} = W \log_2 \left(1 + \frac{P}{WN_0} \right)$$

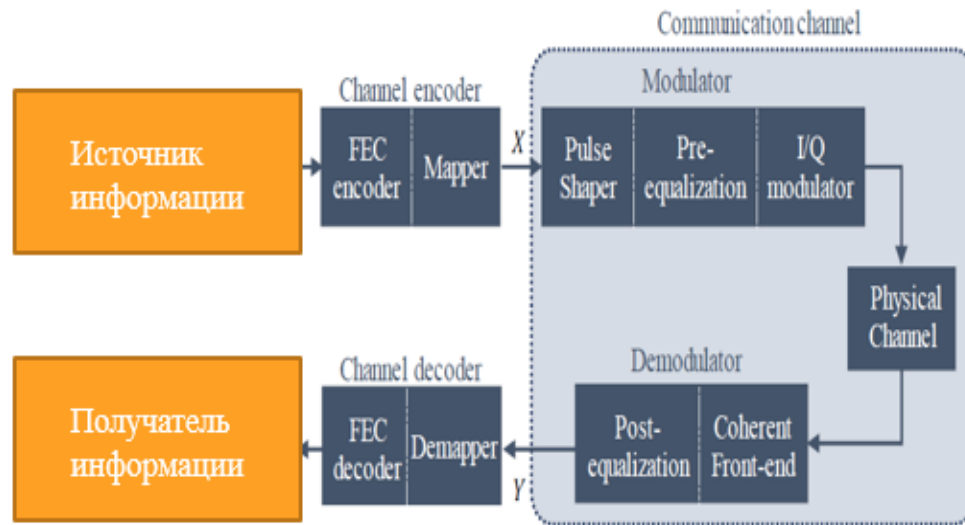
При неограниченном увеличении мощности сигнала в линейном режиме скорость передачи информации растет неограниченно.

$$\frac{P}{WN_0} \equiv SNR \sim OSNR$$

В нелинейном режиме необходимо учитывать нелинейные искажения, которые приближенно можно рассматривать как нелинейный шум

$$P_{\text{NLI}} = \eta \cdot P_{\text{ch}}^3 \quad \Rightarrow \quad OSNR = \frac{P_{\text{ch}}}{P_{\text{ASE}} + \eta \cdot P_{\text{ch}}^3}$$

Кодовая модуляция: сочетание FEC и многоуровневых форматов



Структура цифровой когерентной оптической системы связи, использующей многоуровневые форматы модуляции.

Важный компонент передатчика – **Mapper**: устройство, осуществляющее отображение бинарной информационной последовательности источника в символы передатчика. В приемнике **Demapper** осуществляет обратное отображение распознанных символов в бинарную последовательность.

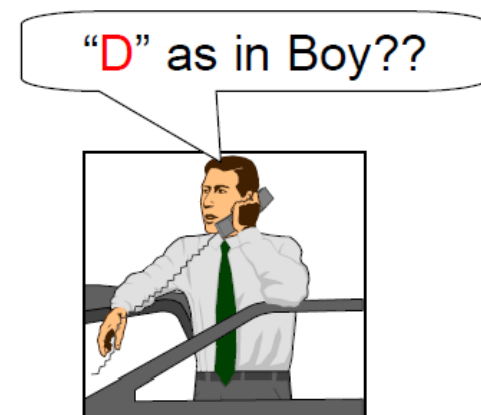
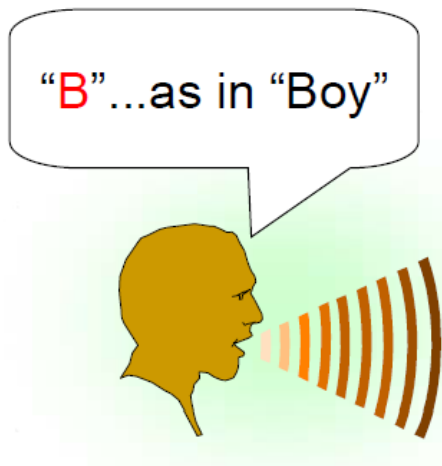
Коэффициент ошибок (BER)

Причина ошибок (BER) – шум.

Для уменьшения BER необходимо увеличивать SNR

Чем больше значений принимает символ, тем больше SNR, необходимый для обеспечения требуемого качества сигнала (величины BER)

Кодирование (FEC) с доп. информацией позволяет уменьшить количество ошибок (BER) при декодировании



SNR – отношение мощности сигнала к мощности шума

ФЕС с жестким и мягким принятием решений

ФЕС с жестким принятием решений – работает с приемником, который детектирует каждый бит и принимает однозначное решение о его значении. ФЕС работает уже с последовательностью значений, часть из которых ошибочна.

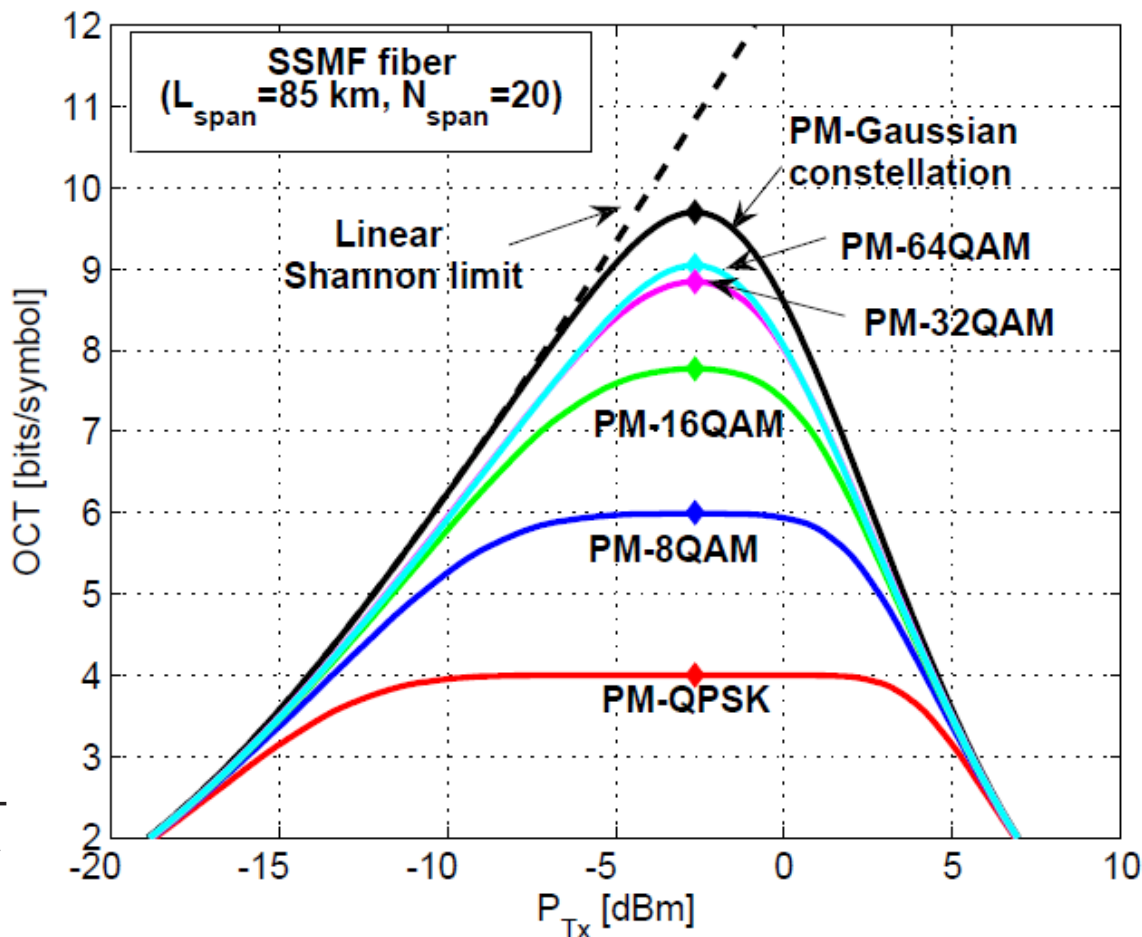
ФЕС с мягким принятием решений – работает с приемником, который детектирует одиночные биты (или целые слова), но не принимает однозначного (жесткого) решения о его значении, скорее он определяет вероятность того, что переданный символ имеет то или иное значение. Решение принимается после работы ФЕС

Максимальная емкость линии

Зависимости максимальной символьной эффективности от мощности P_{Tx} сигнала на канал.

Компенсация нелинейных искажений отсутствует

$$P_{NLI} = \eta \cdot P_{ch}^3 \quad \Rightarrow \quad OSNR = \frac{P_{ch}}{P_{ASE} + \eta \cdot P_{ch}^3}$$

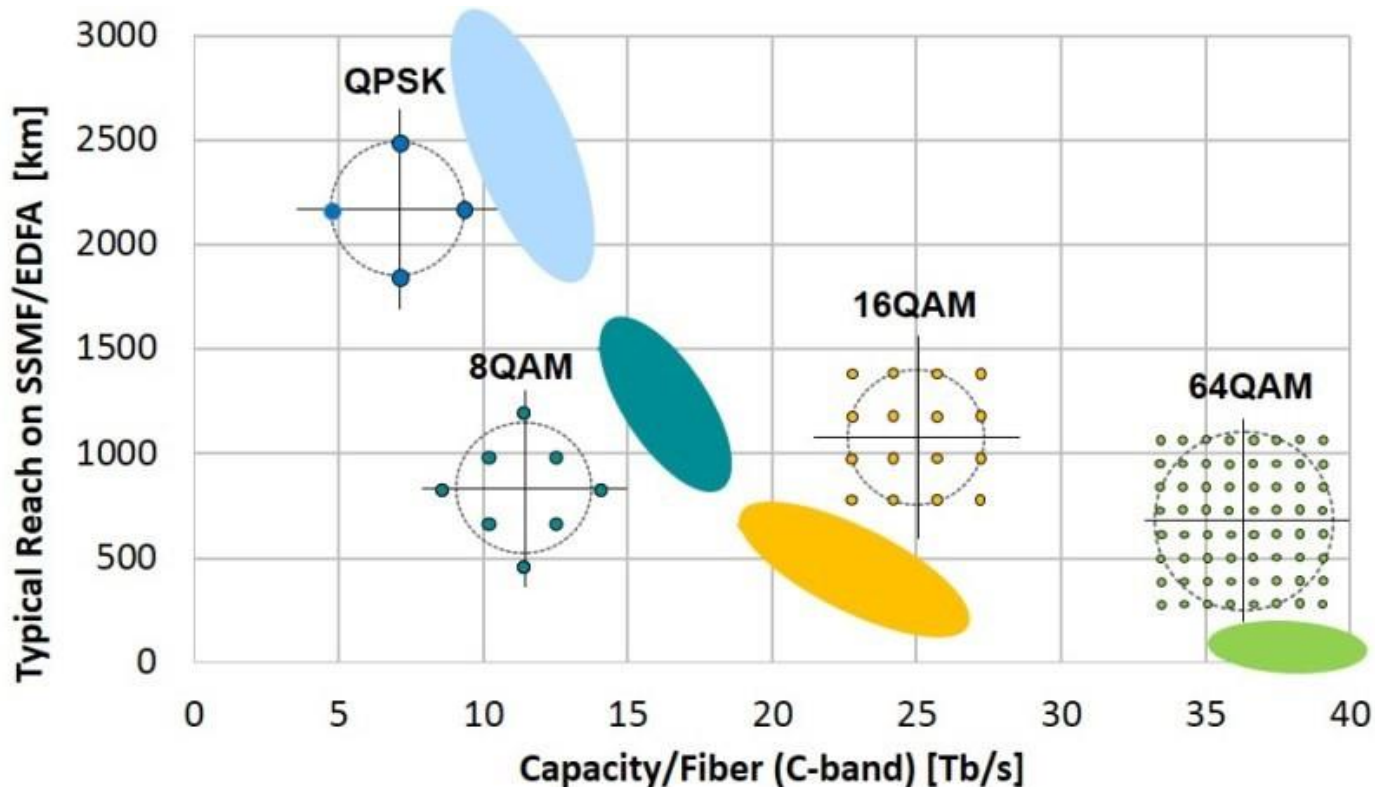


Линия из 20 пролетов SMF ($L_s = 85$ км), различные форматы модуляции, DSP компенсирует только линейные эффекты. Черная пунктирная линия – «линейный» предел Шеннона. Черная сплошная – «нелинейный» предел Шеннона.

Результаты далеки от жизни, т.к. предполагаются неограниченные возможности кодирования с исправлением ошибок!

Например: избыточность сигнала 64QAM = 12/9, т.е. больше 35% (Близко к пределу для современных цифровых процессоров).

Многоуровневые форматы модуляции



Рост скорости за счет усложнения формата модуляции ведет к значительному снижению дальности передачи

4. Многоуровневые форматы с неравными вероятностями реализации значений символов

Структурирование сигнала (Шейпинг)

Наиболее распространенные многоуровневые форматы nQAM – **форматы с равной вероятностью** реализации значений символов.

Теоретически показано (Шеннон), что **оптимальным является сигнал с двумерным гауссовым распределением плотности вероятности синфазных и квадратурных символов.**

Эффективнее чаще использовать символы с низкой амплитудой и реже – с большой амплитудой.

Структурированием сигнала называется такое его представление, при котором получают плавную зависимость вероятности от мощности.

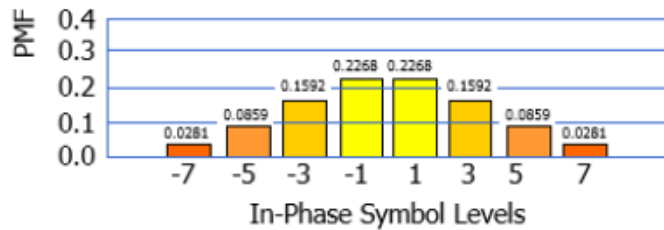
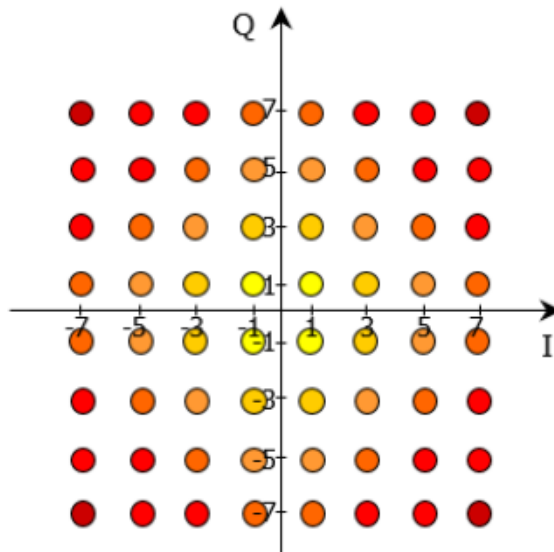
Известно 2 метода:

вероятностное структурирование (probabilistic shaping, PS)

геометрическое структурирование (geometrical shaping, GS).

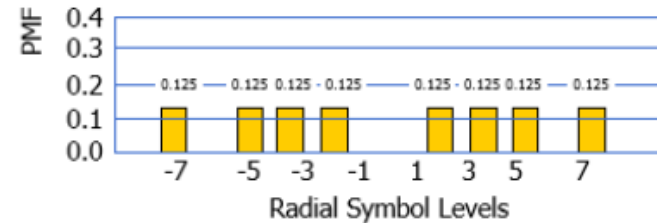
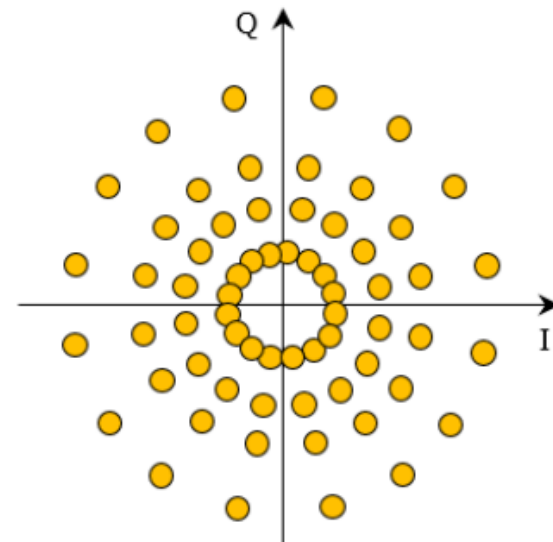
Структурирование сигнала (Шейпинг)

PS-64QAM Constellation



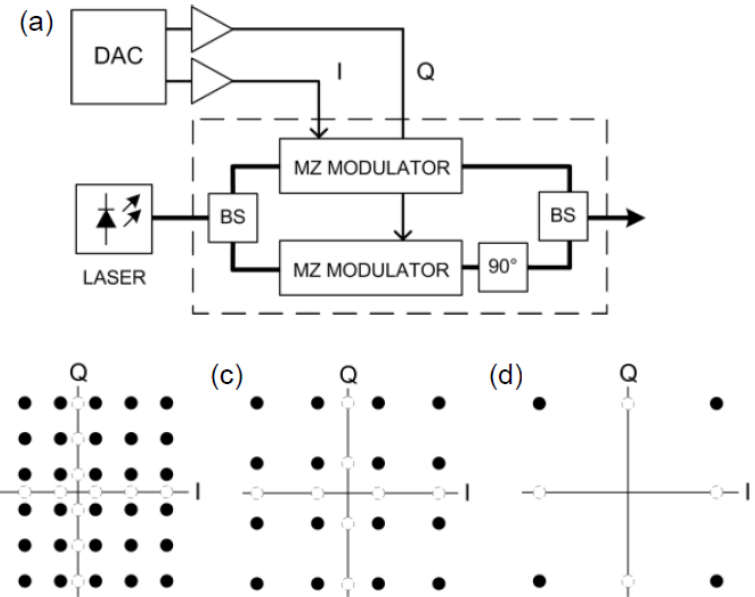
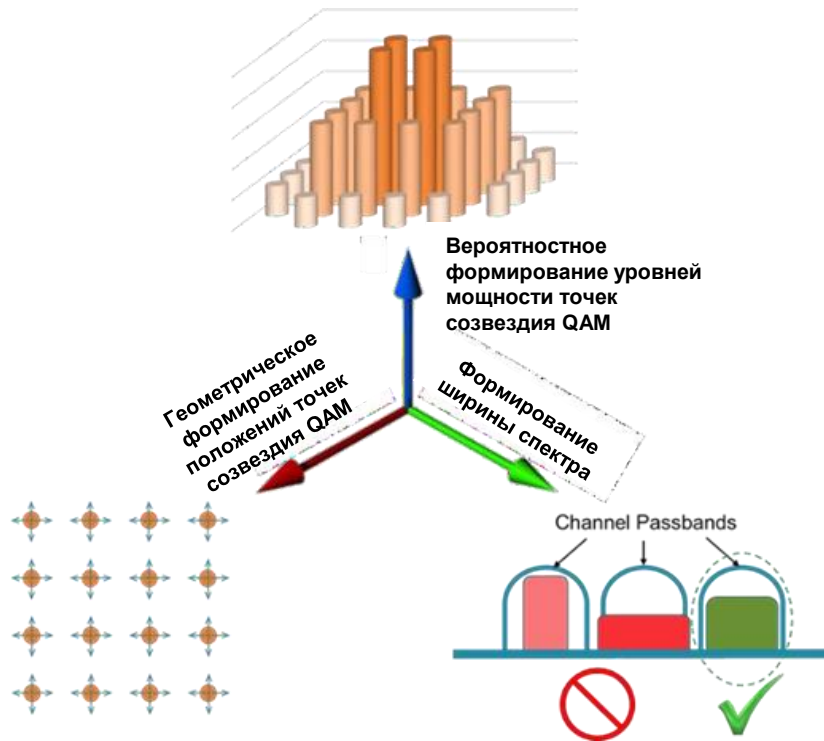
Вероятностный шейпинг

GS-64APSK Constellation



Геометрический шейпинг

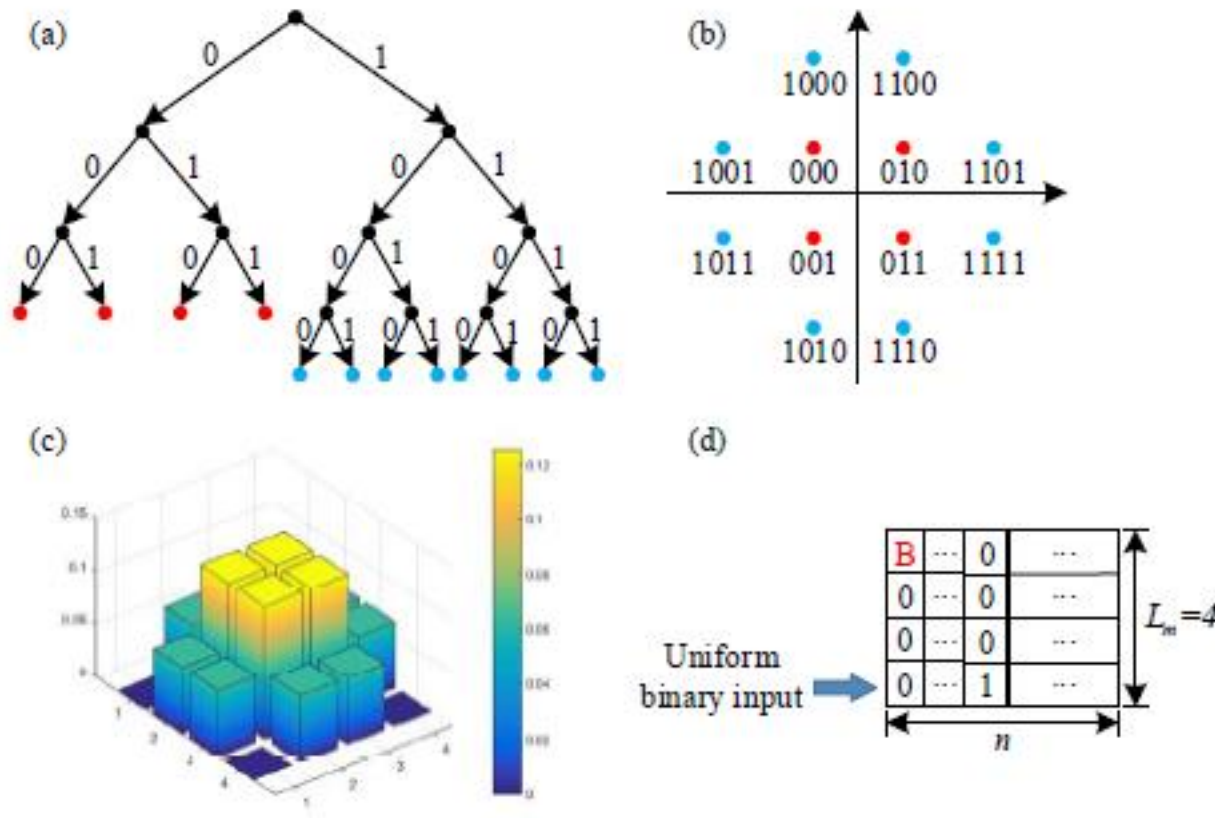
Структурирование сигнала (Шейпинг)



Вероятностный шейпинг. Для реализации используется обычный квадратурный модулятор Маха-Цендера (справа вверху).

Вероятность реализации разных значений не одинакова: значения с меньшей энергией реализуются чаще.

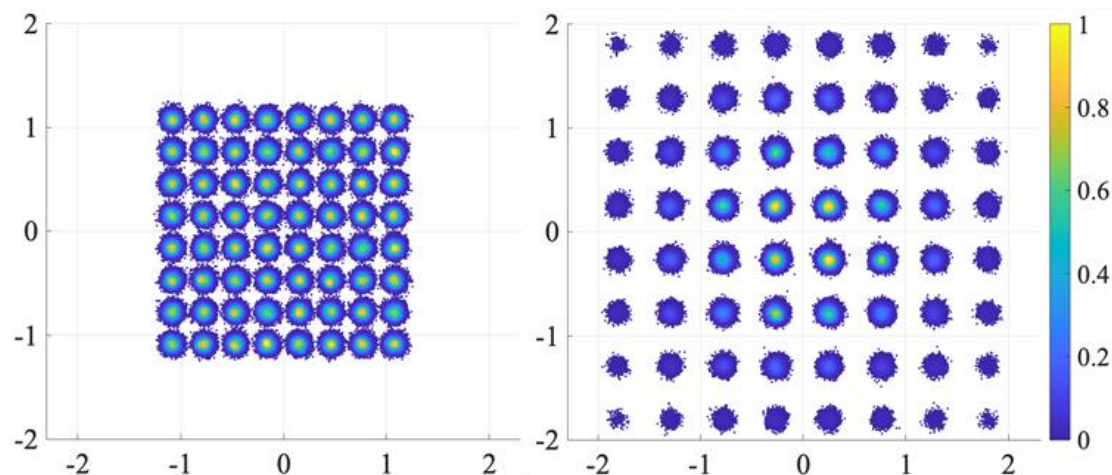
Формирование распределений с неравными вероятностями



Формат 12-QAM с неравными вероятностями

(a) Принцип формирования (схема кодирования); (b) диаграмма созвездия; (c) распределение вероятности; (d) interleaver structure.

Формат с изменяющимися вероятностями



Форматы 64-QAM с одинаковой средней мощностью.

Слева – формат с равными вероятностями реализации всех значений, символьная эффективность **6 бит/символ**.

Справа – формат, в котором вероятности символов с малыми значениями мощности встречаются чаще. Символьная эффективность **5 бит/символ, но расстояние между точками созвездия существенно увеличилось!** Цветовая шкала показывает нормализованную вероятность реализации.

5. Форматы с малой нелинейностью

4-мерные форматы

8PolSK-QPSK

Формат модуляции с постоянной мощностью.
Символьная эффективность 5 бит/символ

Мощность сигнала постоянна и равна (a^2+b^2) .

Когда в одной поляризации амплитуда a , в другой поляризации амплитуда b .

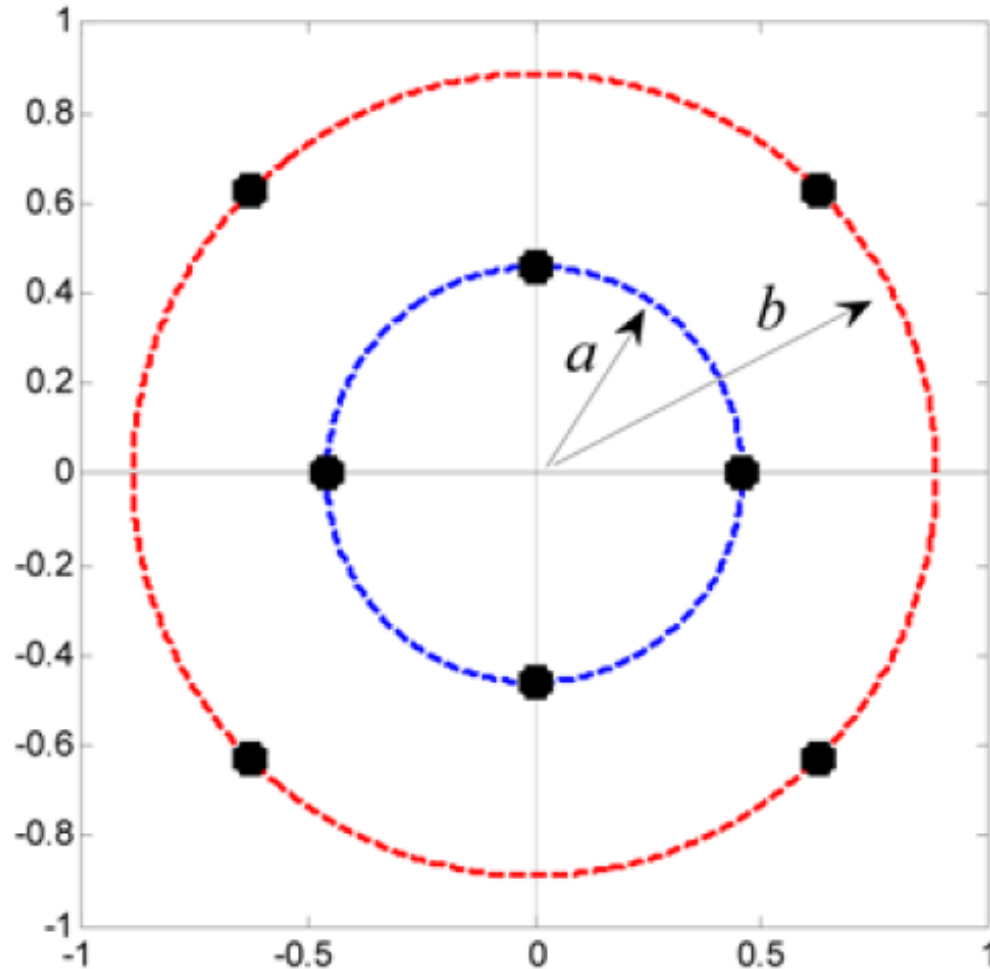
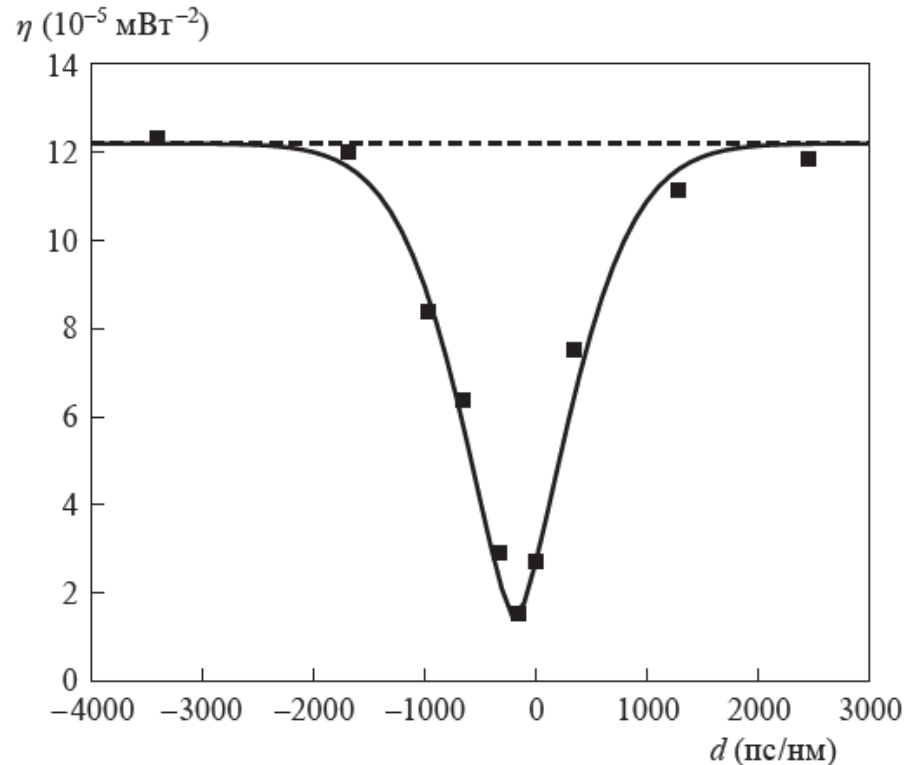


Fig. 1. Star-8QAM format. In DP-8QAM, the 2 polarizations can both independently be at amplitude a or b . For 8PolSK-QPSK format, that independence is removed.

Зависимость от дисперсии в 1 пролёте



В 1-пролетной линии (100 км SSMF, канал 100G), коэффициент нелинейности достигает минимального значения при входной дисперсии около -180 пс/нм. При увеличении или уменьшении входной дисперсии, коэффициент нелинейности выходит на постоянное значение.



Заключение



- Форматы для систем связи на короткие расстояния
- Форматы для программно-перестраиваемых гибких оптических сетей
- Форматы с высокой спектральной эффективностью
- Форматы модуляции с высокой энергетической эффективностью
- Использование форматов с переменной СЭ

Спасибо за внимание!