

**ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ  
КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

**Методические указания  
к лабораторным работам**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

**2020**

# Лабораторная работа №1

## Изучение архитектуры и функциональных блоков оптоэлектронного комплекса

### Цель работы

Ознакомится с функциональными элементами оптоэлектронного комплекса волоконно-оптической системы связи.

### Теоретические сведения

Цифровая обработка сигналов в оптоэлектронных комплексах систем оптической связи.

Далее приведены функциональные блок-схемы типичного когерентного передатчика (рисунок 1) и приемника (рисунок 2) с поддержкой DSP.

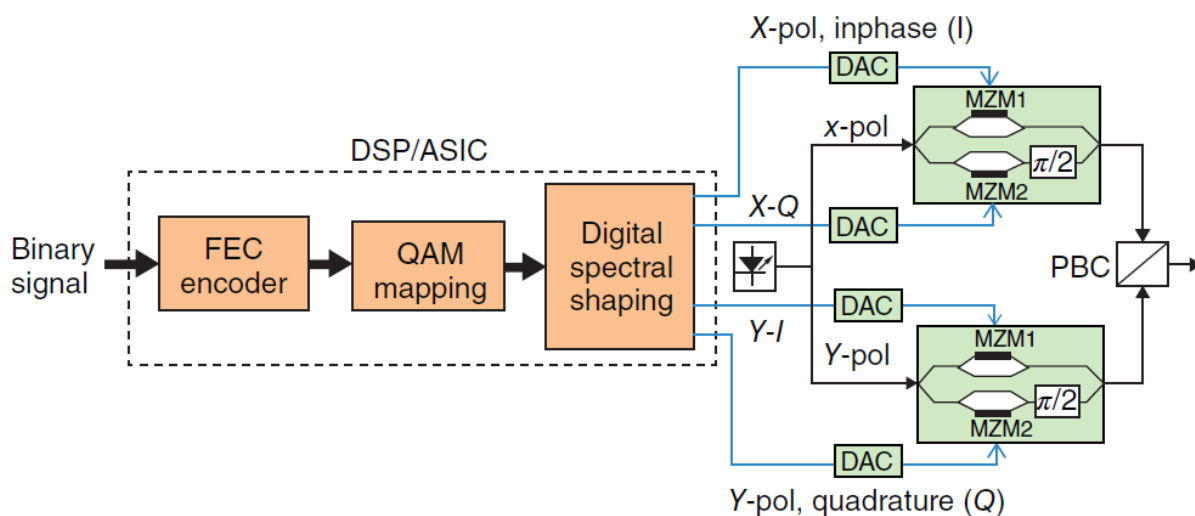


Рисунок 1. Когерентный передатчик с поддержкой DSP

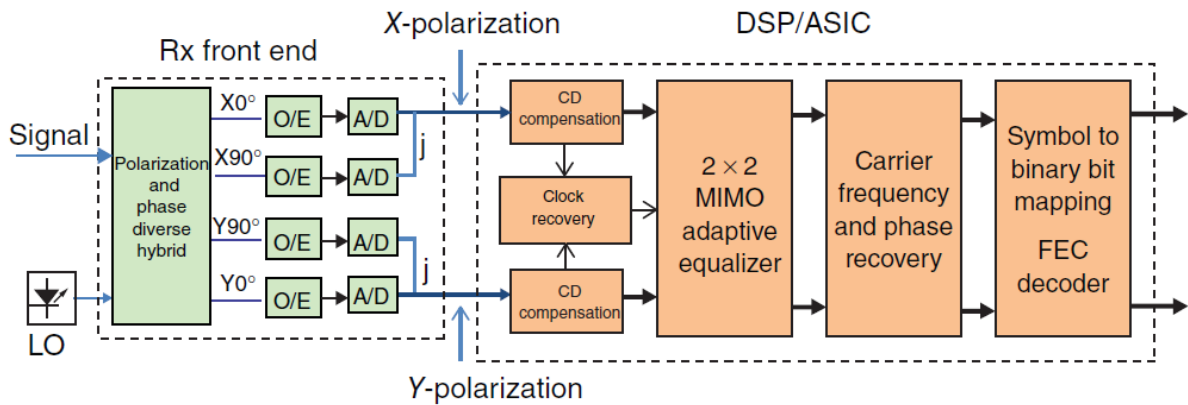


Рисунок 2. Когерентный приемник с поддержкой DSP

На рисунках 1 и 2 обозначены: CD, chromatic dispersion – хроматическая дисперсия, ASIC: application-specific integrated circuit – специализированная интегральная схема.

В принципе, когерентный приемопередатчик, показанный на рисунках 12 и 13, можно использовать для генерации и приема любых четырехмерных кодовых форматов модуляции.

Для передатчика с поддержкой DSP, показанного на рисунке 12, двоичный клиентский сигнал сначала проходит через кодер FEC, а затем двоичные сигналы с кодированием FEC преобразуются в желаемые многоуровневые модулированные символы, такие как символы обычной квадратурной амплитудной модуляции (QAM). После этого к сигналам, преобразованным в QAM, могут применяться различные методы цифрового спектрального формирования, чтобы повысить эффективность или уменьшить искажения передачи. Например, метод формирования импульсов Найквиста, может быть эффективным способом повышения спектральной эффективности WDM, не прибегая к использованию форматов модуляции более высокого порядка.

После цифрового спектрального формирования синфазные и квадратурные компоненты цифрового QAM-сигнала преобразуются в два аналоговых сигнала, которые используются для управления I/Q-модулятором для преобразования электрического сигнала основной полосы частот с повышением частоты в оптический сигнал для передачи. Для такого передатчика с поддержкой DSP один I/Q-модулятор может использоваться для генерации различных форматов QAM.

На рисунке 13 показан типичный цифровой когерентный приемник. Входящее оптическое поле когерентно смешивается с гетеродином через 90-градусный гибрид с поляризацией и разнесением фаз. Этот гибрид разделяет синфазные и квадратурные компоненты принимаемого оптического поля как в X-, так и в Y-поляризациях, которые затем регистрируются четырьмя сбалансированными фотодетекторами. Зарегистрированные аналоговые электрические сигналы оцифровываются четырьмя аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), а затем оцифрованные сигналы отправляются в блок DSP. Для такого цифрового когерентного приемника входной каскад может использоваться для приема любого квадратурно-амплитудно-модулированного сигнала, поскольку зависящая от формата модуляции специфичная обработка, демодуляция и декодирование выполняются в блоке DSP.

DSP приемника состоит из пяти основных функциональных блоков:

- (1) компенсация хроматической дисперсии (CD) оптического волокна,
- (2) восстановление тактовой частоты,
- (3) адаптивная коррекция ( $2 \times 2$  MIMO – с множеством входов и выходов),
- (4) восстановление несущей частоты и фазы,
- (5) декодирование QAM и FEC.

Хроматическая дисперсия оптического волокна обычно компенсируется с помощью цифровых методов формирования фазы в частотной области. Эту функцию можно переместить на сторону передатчика или разделить между передатчиком и приемником. Например, в случае сверхдальних передач, где требуются значительные вычислительные ресурсы, и нагрузка может оказаться слишком большой для одного DSP-чипа передатчика или приемника.

Адаптивная коррекция  $2 \times 2$  выполняет автоматическое отслеживание поляризации, поляризационной модовой дисперсии и компенсацию остаточной хроматической дисперсии. Эта адаптивная коррекция также помогает смягчить искажения из-за эффектов узкополосной фильтрации от реконфигурируемых оптических мультиплексоров ввода-вывода (ROADM), которые широко используются в современных оптических сетях с маршрутизацией по длине волны.

Блоки DSP передатчика и приемника обычно реализуются в специализированных интегральных схемах (ASIC) для обеспечения наилучшей общей производительности (т. е. занимаемой площади, энергопотребления, задержки и т. д.). Поскольку вычислительные требования являются существенными для FEC с мягким решением с высоким коэффициентом кодирования, в системах когерентной передачи со скоростью 100 Гбит/с на длину волны в первом поколении использовалась независимая ASIC, предназначенная для FEC.

Влияние хроматической дисперсии может быть компенсировано двумя цифровыми КИХ-фильтрами (КИХ, конечной импульсной характеристикой, FIR finite impulse response), которые обеспечивают дифференциальные задержки оцифрованных электрических сигналов, которые линейно пропорциональны действительной и мнимой частям оптического поля сигнала. Коэффициенты КИХ-фильтров для

компенсации дисперсии могут быть оптимизированы на основе фактического значения дисперсии оптоволоконного канала, которое обычно детерминировано. Поскольку DGD, вносимый оптоволоконным PMD, также является линейным процессом, его также можно компенсировать цифровыми КИХ-фильтрами в приемнике. Из-за случайного по времени характера PMD его компенсация должна быть адаптивной, при этом коэффициенты КИХ-фильтра часто обновляются посредством оптимизации обратной связи на основе алгоритмов DSP.

### **Выполнение работы**

Используя программу моделирования ознакомиться со структурной схемой и функциями приведенного оптоэлектронного комплекса. Зарисовать в отчете схему и формы сигналов на входе и выходе функциональных блоков.

### **Вопросы**

1. Какие функции выполняют элементы комплекса?
2. Какие требования предъявляются к функциональным элементам?
3. Назовите характеристики обрабатываемых оптических и электрических сигналов.
4. Какие искажения испытывают оптические сигналы при распространении по оптическим трактам?
5. Какова структура КИХ и БИХ фильтров?

## Лабораторная работа 2

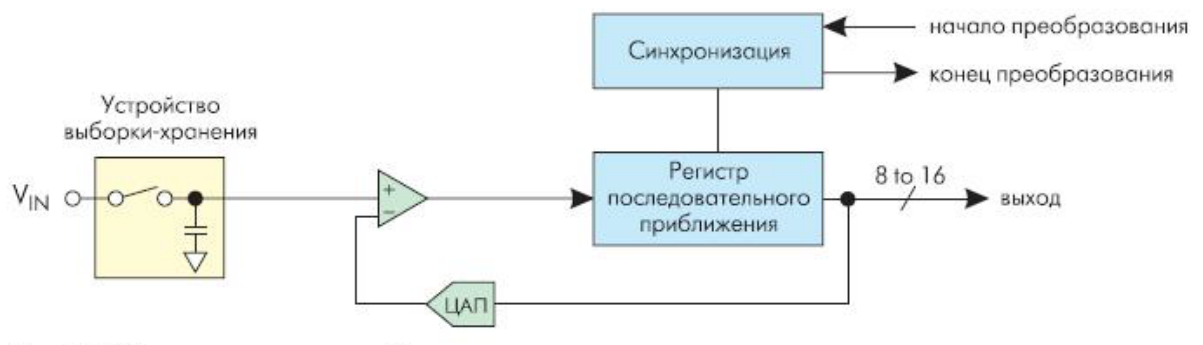
### Аналоговое и цифровое представление оптических сигналов

#### Цель работы

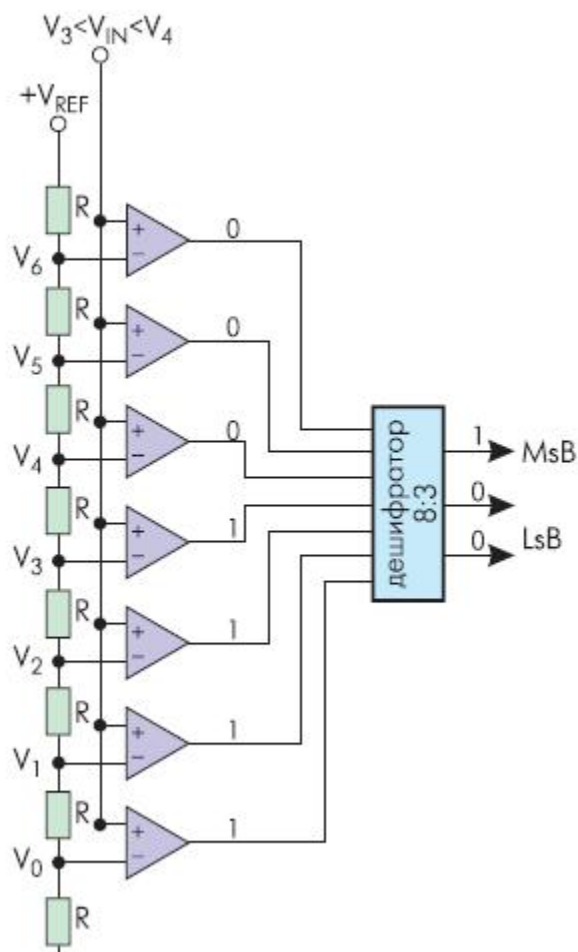
Ознакомиться с различными типами аналого-цифровых преобразователей

#### Выполнение работы

Провести компьютерное моделирование (расчет) работы аналого-цифровых преобразователей с различными характеристиками (структура, разрядность и т.д.). Занести в отчет структурные схемы и формы сигналов на различных этапах преобразования. Сформулировать выводы о требованиях к характеристикам АЦП.



#### 1. АЦП последовательного приближения



## 2. АЦП параллельного преобразования

Теоретические сведения к работе

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП, англ. Analog-to-digital converter, ADC) — устройство, преобразующее входной аналоговый сигнал в дискретный код (цифровой сигнал).

Обратное преобразование осуществляется при помощи цифро-аналогового преобразователя (ЦАП, DAC).

Как правило, АЦП — электронное устройство, преобразующее напряжение в двоичный цифровой код. Тем не менее, некоторые неэлектронные устройства с цифровым выходом следует также относить к



АЦП, например, некоторые типы преобразователей угол-код. Простейшим одноразрядным двоичным АЦП является компаратор.

Разрешение АЦП — минимальное изменение величины аналогового сигнала, которое может быть преобразовано данным АЦП — связано с его разрядностью. В случае единичного измерения без учёта шумов разрешение напрямую определяется разрядностью АЦП.

На практике разрешение АЦП ограничено отношением сигнал/шум входного сигнала. При большой интенсивности шумов на входе АЦП различение соседних уровней входного сигнала становится невозможным, то есть ухудшается разрешение. При этом реально достижимое разрешение описывается эффективной разрядностью (англ. effective number of bits, ENOB), которая меньше, чем реальная разрядность АЦП. При преобразовании сильно зашумлённого сигнала младшие разряды выходного кода практически бесполезны, так как содержат шум. Для достижения заявленной разрядности отношение сигнал/шум входного сигнала должно быть примерно 6 дБ на каждый бит разрядности (6 дБ соответствует двукратному изменению уровня сигнала).

По способу применяемых алгоритмов АЦП делят на:

Последовательные прямого преобразования

Последовательного приближения

Последовательные с сигма-дельта-модуляцией

Параллельные одноступенчатые

Параллельные двух- и более ступенчатые (конвейерные)

АЦП первых двух типов подразумевают обязательное применение в своем составе устройства выборки и хранения (УВХ). Это устройство служит для запоминания аналогового значения сигнала на время, необходимое для выполнения преобразования. Без него результат

преобразования АЦП последовательного типа будет недостоверным. Выпускаются интегральные АЦП последовательного приближения, как содержащие в своем составе УВХ, так и требующие внешнее УВХ.

Передаточная характеристика АЦП — зависимость числового эквивалента выходного двоичного кода от величины входного аналогового сигнала. Говорят о линейных и нелинейных АЦП. Такое деление условное. Обе передаточные характеристики — ступенчатые. Но для «линейных» АЦП всегда возможно провести такую прямую линию, чтобы все точки передаточной характеристики, соответствующие входным значениям  $\delta \cdot 2^k$  — шаг дискретизации,  $k$  лежит в диапазоне  $0..N$ , где  $N$  — разрядность АЦП), были от неё равноудалены.

Имеется несколько источников погрешности АЦП. Ошибки квантования и (считая, что АЦП должен быть линейным) нелинейности присущи любому аналого-цифровому преобразованию. Кроме того, существуют так называемые апертурные ошибки, которые являются следствием джиттера (англ. jitter) тактового генератора, они проявляются при преобразовании сигнала в целом (а не одного отсчёта).

Эти ошибки измеряются в единицах, называемых МЗР — младший значащий разряд (англ.). В приведённом выше примере 8-битного двоичного АЦП ошибка в 1 МЗР составляет  $1/256$  от полного диапазона сигнала, то есть 0,4 %, в 5-тринном троичном АЦП ошибка в 1 МЗР составляет  $1/243$  от полного диапазона сигнала, то есть 0,412 %, в 8-тринном троичном АЦП ошибка в 1 МЗР составляет  $1/6561$ , то есть 0,015 %.

Ошибки квантования являются следствием ограниченного разрешения АЦП. Этот недостаток не может быть устранён ни при каком типе аналого-цифрового преобразования. Абсолютная величина ошибки

квантования при каждом отсчёте находится в пределах от нуля до половины МЗР.

Как правило, амплитуда входного сигнала много больше, чем МЗР. В этом случае ошибка квантования не коррелирована с сигналом и имеет равномерное распределение.

Всем АЦП присущи ошибки, связанные с нелинейностью, которые являются следствием физического несовершенства АЦП. Это приводит к тому, что передаточная характеристика (в указанном выше смысле) отличается от линейной (точнее от желаемой функции, так как она не обязательно линейна). Ошибки могут быть уменьшены путём калибровки.

Аналоговый сигнал является непрерывной функцией времени, в АЦП он преобразуется в последовательность цифровых значений. Следовательно, необходимо определить частоту выборки цифровых значений из аналогового сигнала. Частота, с которой производятся цифровые значения, получила название частота дискретизации АЦП.

Непрерывно меняющийся сигнал с ограниченной спектральной полосой подвергается оцифровке (то есть значения сигнала измеряются через интервал времени  $T$  — период дискретизации), и исходный сигнал может быть точно восстановлен из дискретных во времени значений путём интерполяции. Точность восстановления ограничена ошибкой квантования. Однако в соответствии с теоремой Котельникова — Шеннона точное восстановление амплитуды возможно, только если частота дискретизации выше, чем удвоенная максимальная частота в спектре сигнала.

Поскольку реальные АЦП не могут произвести аналого-цифровое преобразование мгновенно, входное аналоговое значение должно удерживаться постоянным, по крайней мере, от начала до конца процесса

преобразования (этот интервал времени называют время преобразования). Эта задача решается путём использования специальной схемы на входе АЦП — устройства выборки-хранения (УВХ). УВХ, как правило, хранит входное напряжение на конденсаторе, который соединён со входом через аналоговый ключ: при замыкании ключа происходит выборка входного сигнала (конденсатор заряжается до входного напряжения), при размыкании — хранение. Многие АЦП, выполненные в виде интегральных микросхем, содержат встроенное УВХ.

### **Вопросы**

1. Какие функции выполняет АЦП?
2. Какие характеристики важны при выборе АЦП?
3. Приведите классификацию АЦП?
4. Нарисуйте формы сигналов на различных этапах преобразования.
5. Какие требования предъявляются к разрядности и быстродействию?

## **Лабораторная работа №3**

### **Формирование оптического сигнала со сложным форматом модуляции**

#### **Цель работы**

Ознакомиться с методами формирования сложных форматов модуляции.

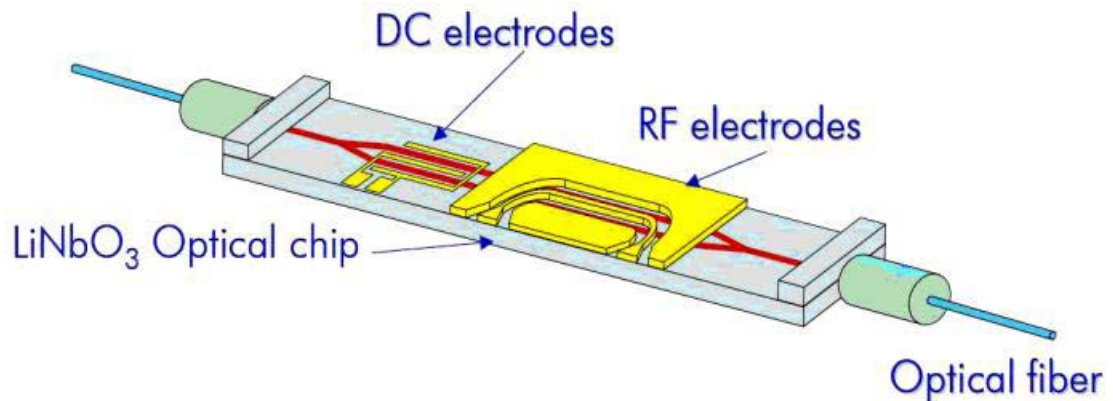
#### **Выполнение работы**

Провести компьютерное моделирование работы передатчика с внешним форматом модуляции

#### **Теоретические сведения о модуляторах.**

Наиболее распространенным вариантом внешнего модулятора в аналоговых и в цифровых волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) можно считать амплитудный электрооптический модулятор по схеме интерферометра Маха–Цандера. К преимуществам данного устройства относятся: высокая частота модуляции; компактность; надежность. Электрооптические модуляторы Маха–Цандера (MMZ) – модуляторы интенсивности интерферометрического типа. Модулятор представляет собой интегрально-оптическую схему, состоящую из системы канальных оптических волноводов и параллельной им системы электродов, рисунок 5. Лазерное излучение входного световода разделяется на два пути, которые соединяются в выходном световоде (составляющие складываются когерентно). Эти два пути образуют два плеча интерферометра. Около световодов напыляют две пары электродов: RF – электроды модуляции и DC – электроды смещения рабочей точки. Для формирования электродов используется золото, в качестве адгезионного слоя используется хром. При

подаче на электроды напряжения происходит изменение показателя преломления в световодах. Лазерное излучение в плечах распространяется с разными скоростями и приобретает разность фаз.



LiNbO<sub>3</sub> Optical chip – кристаллическая подложка (электрооптический кристалл);

DC electrodes – DC-электроды смещения;

RF electrodes – СВЧ-электроды

Optical fiber – оптическое волокно

Рисунок 5. Интегрально-оптический СВЧ-модулятор Маха–Цендера Пермской научно-производственной приборостроительной компании.

Основные параметры модуляторов Маха–Цендера: рабочий диапазон длин волн, полоса модуляции, вносимые потери, полуволновое напряжение, коэффициент экстинкции. Коэффициент экстинкции (Extinction ratio) – отношение максимального коэффициента пропускания оптического модулятора к минимальному.

## **Лабораторная работа № 4**

### **Изучение работы когерентного приемника оптических сигналов**

#### **Цель работы**

Ознакомиться с работой когерентного приемника оптических сигналов.

#### **Выполнение работы**

Провести компьютерное моделирование работы когерентного оптического приемника. Зафиксировать в отчете структурную схему приемника и формы сигналов.

#### **Принцип работы цифрового когерентного оптического приемника (одна поляризация)**

Главная задача когерентного оптического приемника – преобразование информации, переносимой оптическим сигналом, в электрическую форму. Трудность этой задачи связана с жесткими требованиями к взаимной синхронизации частот источника опорного излучения и несущей оптического сигнала. Совмещение цифровой обработки сигналов с когерентным приемником облегчает решение этой задачи. На рисунке 6 приведена оптическая схема детектора и блок-схема цифрового оптического приемника (внизу рисунка). На рисунке 6 обозначены: ОИ – опорное излучение; ФД – фотодиод; АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

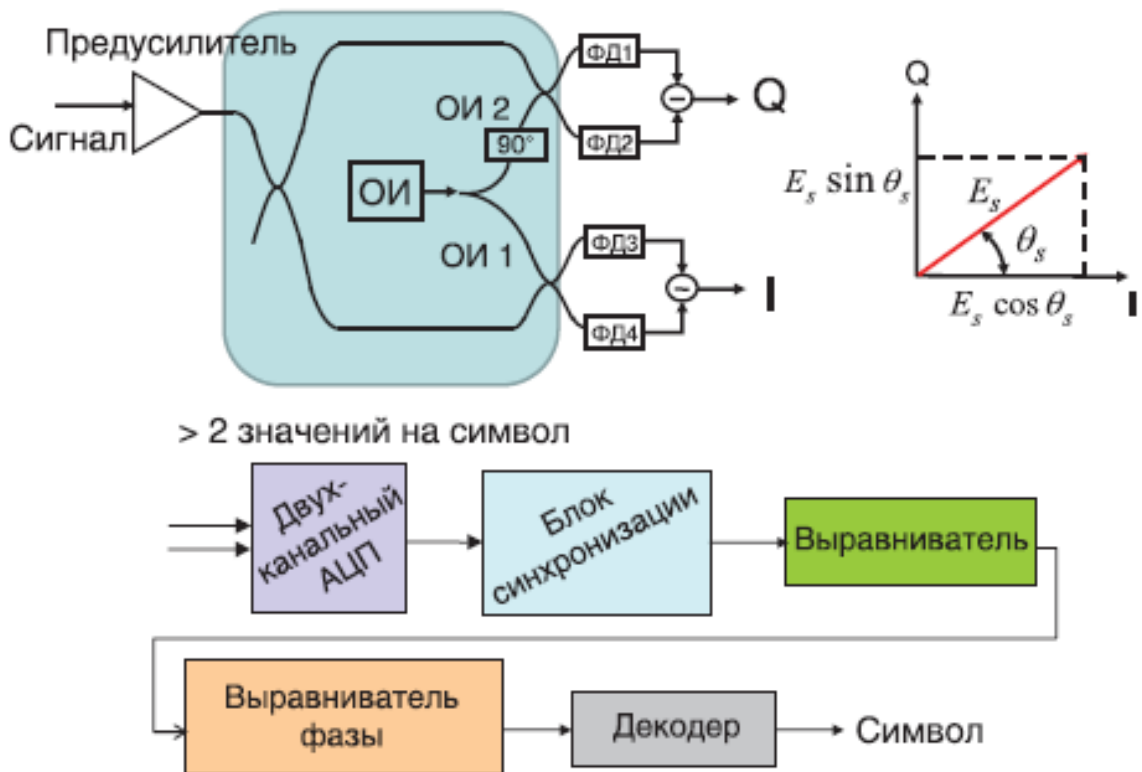


Рисунок 3. Принцип работы цифрового когерентного приемника с одной поляризацией

Важнейший функциональный элемент такого приемника – устройство цифровой обработки сигналов. Именно оно выполняет функции синхронизации и фазовой диверсификации, а также декодирования цифровой информации. Из-за внешних воздействий фаза несущей оптического сигнала испытывает флуктуации (фазовый шум). Влияние фазового шума проиллюстрировано на рисунке 7, где слева показана комплексная диаграмма передаваемого сигнала, в центре – принимаемого сигнала с фазовым шумом, а справа сигналы после цифровой обработки.



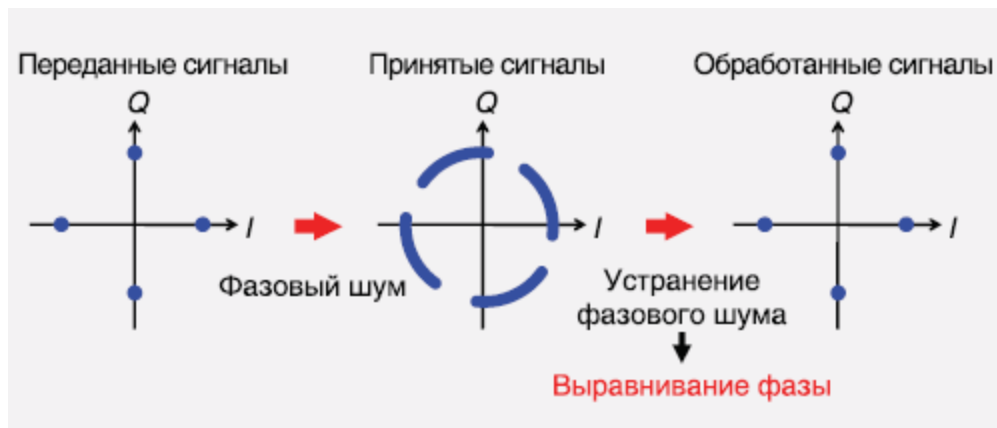


Рисунок 4. Комплексные фазовые диаграммы QPSK сигнала

Создание оптических систем обратной связи для синхронизации источника опорного излучения с несущей оптического сигнала (см. рисунок 2) по-прежнему остается трудной задачей. Быстрый рост скорости работы цифровых устройств обработки сигналов предоставил разработчикам новый способ устранения фазового дрейфа несущей оптического сигнала. Цифровые когерентные приемники выполняют эту задачу в электрической форме. В результате после цифровой обработки принятый сигнал принимает вид, показанный на рисунке 7 справа.

Таким образом, высокоскоростная цифровая обработка электрического сигнала позволяет точно выделить действительную и мнимую компоненты (I и Q соответственно) комплексной амплитуды электрического сигнала. Используя гомодинный когерентный приемник с фазовой диверсификацией. Когерентные приемники обеспечивают возможность внедрения различных типов многоуровневых форматов модуляции включая фазовые и квадратурные форматы. Комплексные диаграммы некоторых форматов, реализованных в когерентных системах, показаны на рисунке 8.

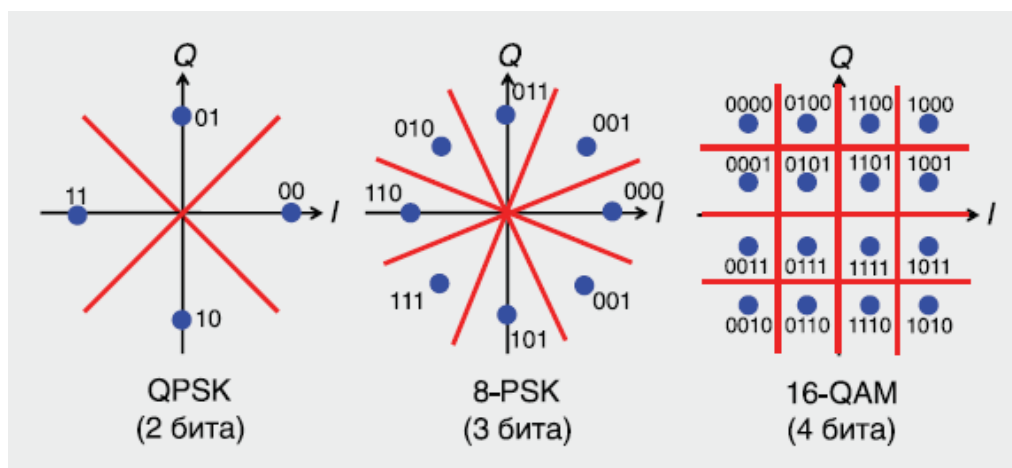


Рисунок 5. Комплексные фазовые диаграммы многоуровневых форматов модуляции, реализованных в когерентных оптических системах связи

На рисунке 7 приведены (слева направо): четырехуровневый фазовый формат (QPSK) емкостью 2 бит/символ; восьмиуровневый фазовый формат (8-PSK) емкостью 3 бит/символ и 16-уровневый квадратурный формат (16-QAM) емкостью 4 бит/символ.

Многоуровневые форматы модуляции позволяют увеличить скорость передачи информации в несколько раз в зависимости от параметра  $M$ , который можно назвать емкостью формата. Величина  $M$  связана с числом уровней  $N$  выражением  $M = \log_2 N$ . Поэтому использование 16-уровневого формата модуляции позволяет увеличить скорость передачи информации в четыре раза по сравнению с обычным бинарным форматом при сохранении символьной скорости передачи. Современные устройства цифровой обработки сигналов обеспечивают быстродействие до 10 Гбод/с, что при использовании 16-уровневого квадратурного формата (16-QAM) обеспечивает скорость передачи информации 40 Гбит/с. Важное достоинство многоуровневых форматов – более высокая по сравнению с двухуровневыми форматами спектральная эффективность. Для бинарных

форматов она ограничена значением  $1(\text{бит/с})/\text{Гц}$ , для многоуровневого формата – величиной  $M(\text{бит/с})/\text{Гц}$ .

Например, при использовании формата модуляции 64-QAM с символьной скоростью  $1 \text{ Гбод/с}$  продемонстрирована спектральная эффективность  $8,6(\text{бит/с})/\text{Гц}$ . Поскольку полная информация о комплексной огибающей оптического поля сохраняется в электрическом сигнале, то в электрической форме в цифровом виде может быть решена задача компенсации хроматической дисперсии. Действие хроматической дисперсии может быть описано передаточной функцией линии связи  $H(w)$ , преобразующей спектр Фурье огибающей входного сигнала  $X(w)$  в спектр Фурье выходного сигнала  $Y(w) = H(w)X(w)$ . Для компенсации хроматической дисперсии необходимо пропустить сигнал с выхода линии связи  $Y(w)$  через компенсирующую систему с передаточной функцией  $H^{-1}(w)$ , обратной передаточной функции линии связи. В результате на выходе компенсирующей системы формируется сигнал, совпадающий с исходным сигналом:  $Z(w) = H^{-1}(w)Y(w) = X(w)$ .

Сохранение фазовой информации при когерентном приеме позволяет компенсировать хроматическую дисперсию при цифровой обработке сигнала в приемнике, рисунок 9.

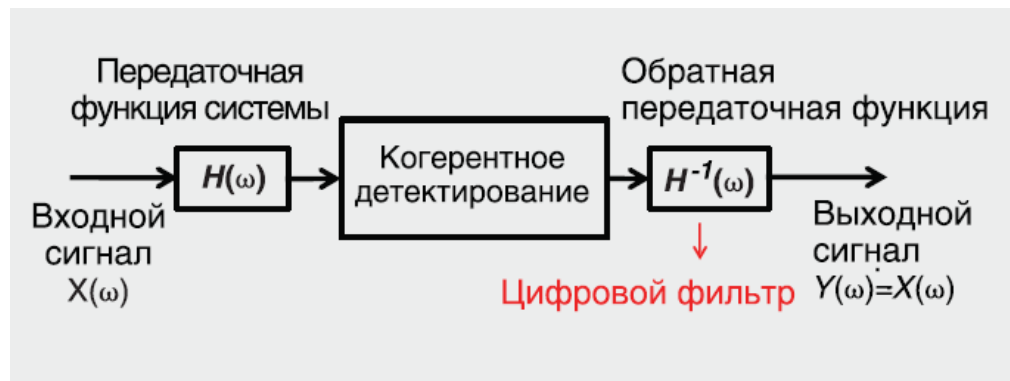


Рисунок 6. Схема компенсации хроматической дисперсии в цифровом когерентном приемнике.

Цифровые когерентные оптические приемники с двумя поляризациями.

Поскольку полная информация может содержаться в комплексной огибающей оптического поля каждой поляризации, то для ее полного преобразования в электрическую форму требуются два электрических сигнала для обеих поляризаций. То есть всего требуются четыре электрических сигнала. Принцип работы приемника с поляризационной диверсификацией показан на рисунке 11.

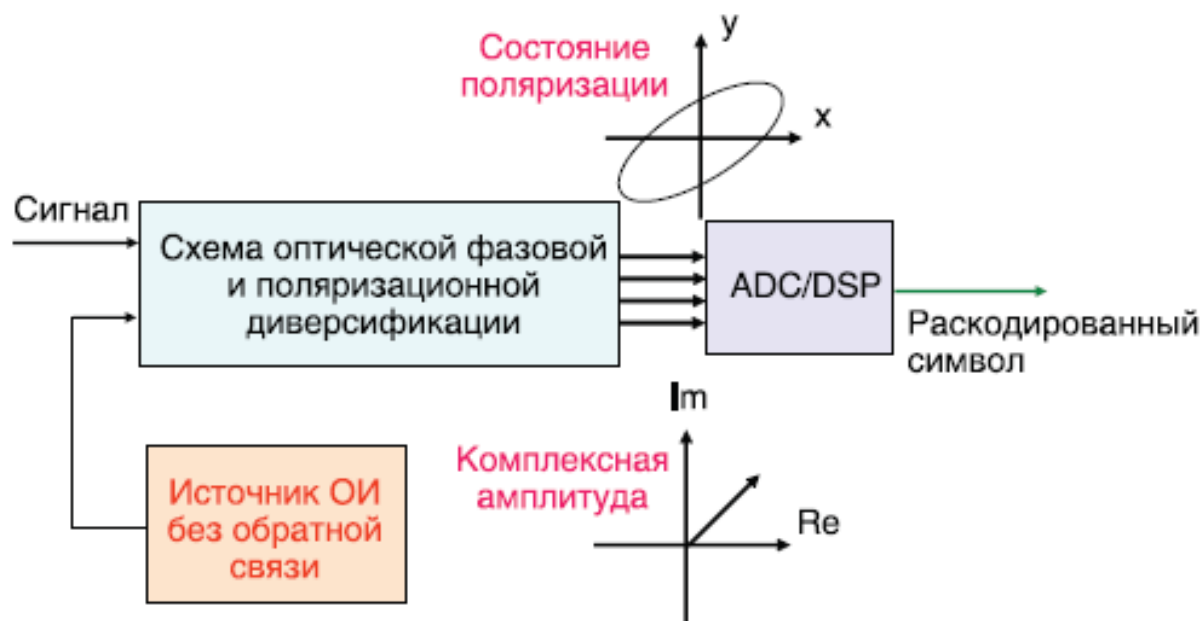


Рисунок 7. Принцип работы цифрового когерентного приемника с поляризационной и фазовой диверсификацией

Для поляризационной диверсификации опорное излучение делится на две ортогонально поляризованные компоненты, каждая из которых смешивается с сигнальным излучением. ADC/DSP – блок аналого-цифрового преобразования и цифровой обработки сигналов.

По сравнению с приемником одной поляризации в нем решается задача выравнивания поляризаций сигнала и опорного излучения. Она решается также в электрической форме при помощи цифровой обработки четырех электрических сигналов благодаря специальной оптической схеме, изображенной на рисунке 11.

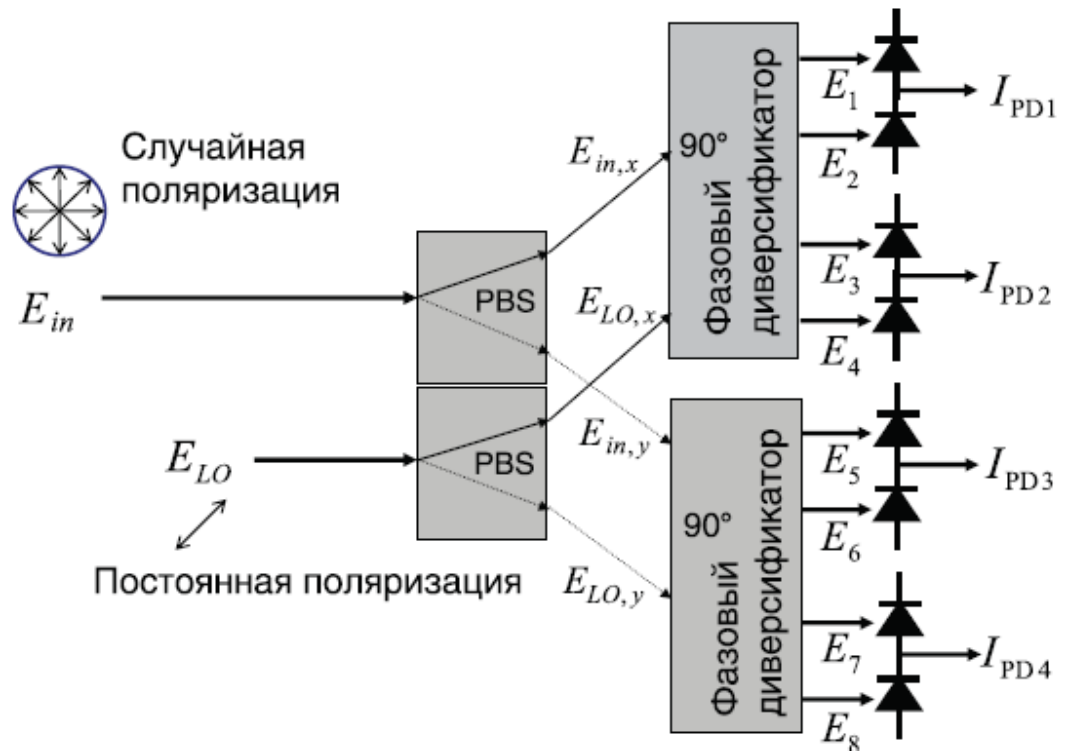


Рисунок 8. Оптическая схема смесителя цифрового когерентного приемника с поляризационной и фазовой диверсификацией

## **Лабораторная работа № 5**

### **Изучение методов коррекции ошибок**

#### **Цель работы**

Познакомиться с методами коррекции ошибок, выполнить программного моделирование работы обнаружителя ошибок.

#### **Теоретические сведения к работе**

Контроль ошибок состоит в обнаружении и исправлении ошибок в данных при их записи и воспроизведении или передаче по линиям связи.

Контроль целостности данных и исправление ошибок — важные задачи на многих уровнях работы с информацией (в частности, физическом, канальном, транспортном уровнях сетевой модели OSI) в связи с тем, что в процессе хранения данных и передачи информации по сетям связи неизбежно возникают ошибки. Различные области применения контроля ошибок диктуют различные требования к используемым стратегиям и кодам.

В системах связи возможны несколько стратегий борьбы с ошибками:

обнаружение ошибок в блоках данных и автоматический запрос повторной передачи[⇒] повреждённых блоков — этот подход применяется, в основном, на канальном и транспортном уровнях;

обнаружение ошибок в блоках данных и отбрасывание повреждённых блоков — такой подход иногда применяется в системах потокового мультимедиа, где важна задержка передачи и нет времени на повторную передачу;

упреждающая коррекция ошибок добавляет к передаваемой информации такие дополнительные данные, которые позволяют исправить ошибки без дополнительного запроса.

В контроле ошибок, как правило, используется помехоустойчивое кодирование — кодирование данных при записи или передаче и декодирование при считывании или получении при помощи корректирующих кодов, которые и позволяют обнаружить и, возможно, исправить ошибки в данных. Алгоритмы помехоустойчивого кодирования в различных приложениях могут быть реализованы как программно, так и аппаратно.

Упреждающая коррекция ошибок (также прямая коррекция ошибок, англ. Forward Error Correction, FEC) — техника помехоустойчивого кодирования и декодирования, позволяющая исправлять ошибки методом упреждения. Применяется для исправления сбоев и ошибок при передаче данных путём передачи избыточной служебной информации, на основе которой может быть восстановлено первоначальное содержание. На практике широко используется в сетях передачи данных, телекоммуникационных технологиях. Коды, обеспечивающие прямую коррекцию ошибок, требуют введения большей избыточности в передаваемые данные, чем коды, которые только обнаруживают ошибки.

Техника прямой коррекции ошибок широко применяется в различных устройствах хранения данных — жестких дисках, флеш-памяти, оперативной памяти. В частности, в серверных приложениях применяется ЕСС-память — оперативная память, способная распознавать и исправлять спонтанно возникшие ошибки.

Прямая коррекция ошибок (FEC) - это метод цифровой обработки сигналов, используемый для повышения надежности данных. Это делается путем введения избыточных данных, называемых кодом с исправлением



ошибок, перед передачей или хранением данных. FEC предоставляет приемнику возможность исправления ошибок без обратного канала для запроса повторной передачи данных. Как мы знаем, иногда оптические сигналы могут ухудшаться из-за некоторых факторов во время передачи, что может привести к неправильной оценке на стороне приемника, возможно, принятию сигнала «1» за сигнал «0» или сигнала «0» за сигнал «1». Если количество ошибок при передаче находится в пределах корректирующей способности (прерывистые ошибки), канальный декодер обнаружит и исправит ложные “0” или “1” для улучшения качества сигнала.

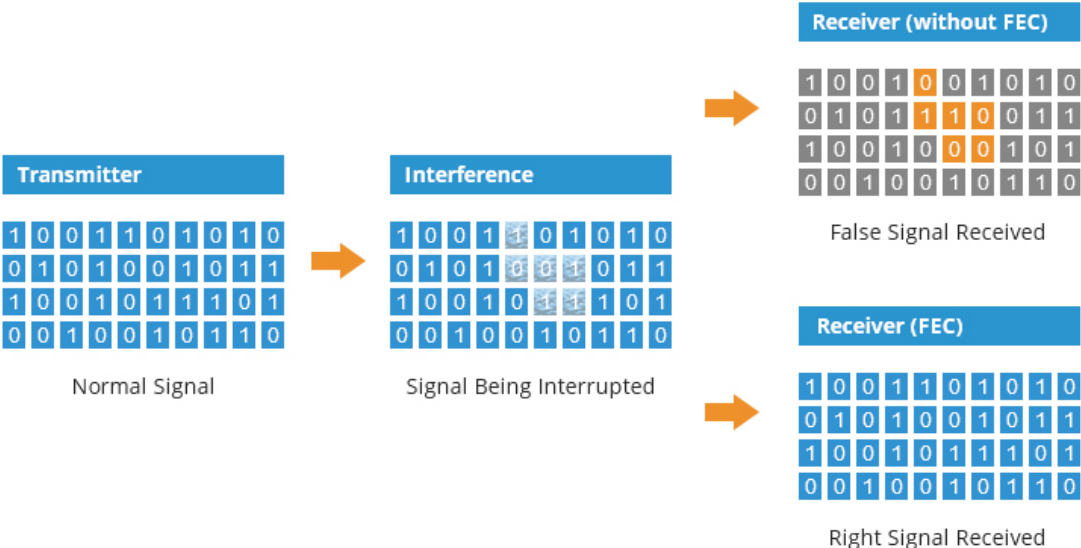


Рисунок 1. Принцип работы FEC

Развитие прямого исправления ошибок в оптической связи можно разделить на три поколения. FEC первого поколения представляет собой первое, которое будет успешно использоваться в подводных системах и наземных системах. По мере развития систем WDM в коммерческих системах был установлен более мощный FEC второго поколения. Появление FEC третьего поколения открыло новые перспективы для следующего поколения систем оптической связи.

Каковы типы и особенности FEC?

Типы

В настоящее время практические технологии FEC для SDH (синхронная цифровая иерархия) и DWDM (плотное мультиплексирование с разделением по длине волны) в основном следующие:

In-band FEC. In-band FEC поддерживается стандартом ITU-T G.707. Контролируемые символы кода FEC загружаются с использованием части служебных байтов в кадре SDH. Усиление кодирования невелико (3-4 дБ). Внеполосный FEC. Внеполосный FEC поддерживается стандартом ITU-T G.975/709.

Out-of-band FEC обладает большой избыточностью кодирования, возможностью исправления ошибок, высокой гибкостью и высоким коэффициентом усиления кодирования (5-6 дБ).

Enhanced FEC (EFEC). Enhanced FEC в основном используется в системах оптической связи, где требования к задержке не являются строгими, а требования по усилению кодирования особенно высоки. Хотя процесс кодирования и декодирования EFEC является более сложным и менее применимым в настоящее время, благодаря его преимуществам в производительности, он превратится в практическую технологию и станет основным направлением следующего поколения out-of-band FEC.

Характеристики

FEC уменьшает количество ошибок передачи, расширяет рабочий диапазон и снижает требования к питанию для систем связи. FEC также увеличивает эффективную пропускную способность системы, даже с дополнительными контрольными битами, добавленными к битам данных, устраняя необходимость повторной передачи данных, искаженных случайным шумом.

FEC самостоятельно повышает достоверность данных на приемнике. В рамках системного контекста FEC становится технологией, которую разработчик системы может использовать несколькими способами. Наиболее очевидным преимуществом использования FEC является использование систем с ограниченной мощностью. Однако посредством использования сигнализации более высокого порядка ограничения полосы пропускания также могут быть устранены. Во многих беспроводных системах допустимая мощность передатчика ограничена. Эти ограничения могут быть вызваны соблюдением стандарта или практическими соображениями. FEC позволяет передавать с гораздо более высокими скоростями передачи данных, если доступна дополнительная полоса пропускания.

#### Применение FEC в 100G сетях

В контексте оптоволоконных сетей FEC используется для определения оптического SNR (OSNR) - одного из ключевых параметров, определяющих, как далеко может пройти длина волны, прежде чем она нуждается в регенерации. FEC особенно важен при скоростях высокоскоростной передачи данных, где требуются усовершенствованные схемы модуляции, чтобы минимизировать дисперсию и соответствие сигнала с частотной сеткой. Без включения FEC транспорт 100G был бы ограничен чрезвычайно короткими расстояниями. Для реализации передачи на большие расстояния (> 2500 км) усиление системы должно быть дополнительно улучшено примерно на 2 дБ. Переход FEC с жесткого решения на мягкое решение восполняет этот пробел в производительности.

Поскольку стремление к все более высоким скоростям передачи продолжается, схемы прямого исправления ошибок (SD-FEC) становятся все более популярными. Хотя для этого может потребоваться около 20% байтов - почти в три раза больше, чем в исходной схеме кодирования RS -

выгоды, которые они получают в контексте высокоскоростных сетей, значительны. Например, FEC, который приводит к усилению от 1 до 2 дБ в сети 100G, означает увеличение охвата на 20-40%.

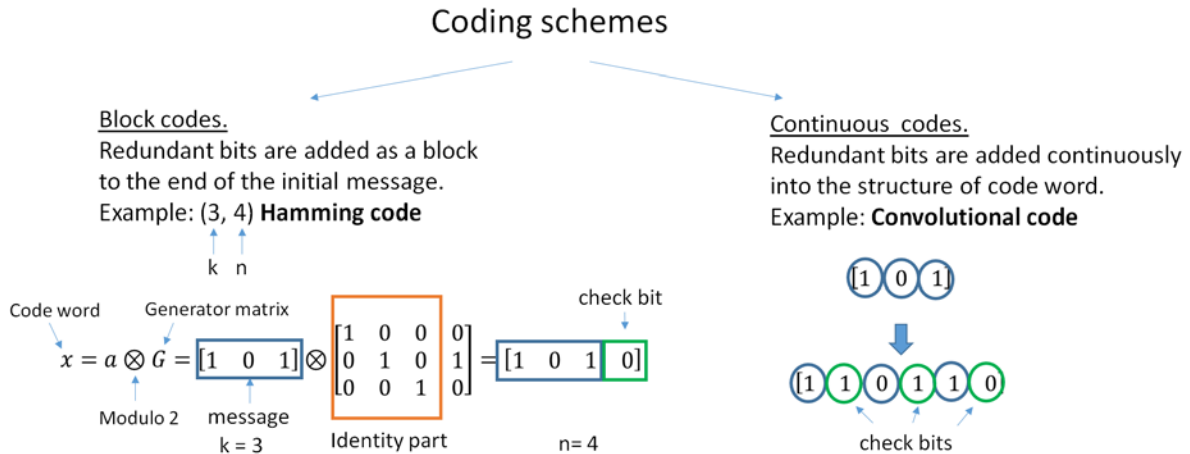
Замечания для FEC в сетях 100G

Что следует учитывать при настройке FEC в 100G сетях? Предлагается обратить внимание на следующие советы.

Метод реализации

Некоторые специальные модули имеют свои собственные функции FEC, такие как FS 100G CFP конвертеры интерфейсов. В то время как 100G QSFP28 оптический модуль в основном полагается на конфигурацию функции FEC на устройстве для реализации исправления ошибок, таких как 100G коммутаторы.

Двумя основными категориями кодов ЕСС являются блочные коды и сверточные коды.



Блочные коды работают с блоками (пакетами) фиксированного размера, состоящими из битов или символов заранее определенного размера. Практические блочные коды обычно могут быть жестко декодированы за полиномиальное время до их длины блока.

Сверточные коды работают с битовыми или символьными потоками произвольной длины. Чаще всего они программно декодируются с помощью алгоритма Витерби, хотя иногда используются и другие алгоритмы. Декодирование Витерби обеспечивает асимптотически оптимальную эффективность декодирования с увеличением длины ограничения сверточного кода, но за счет экспоненциально возрастающей сложности. Завершенный сверточный код также является «блочным кодом» в том смысле, что он кодирует блок входных данных, но размер блока сверточного кода, как правило, произвольный, в то время как блочные коды имеют фиксированный размер, определяемый их алгебраическими характеристиками. Типы завершения для сверточных кодов включают «концевую передачу» и «сброс битов».

## **Перечень основной и дополнительной литературы**

### **Основная литература:**

1. Фокин, В. Г. Когерентные оптические сети [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. Г. Фокин. - Санкт-Петербург : Лань, 2016. - 440 с. - ISBN 978-5-8114-2105-3 : Б. ц. Книга из коллекции Лань - Инженерно-технические науки.  
Рекомендовано УМО по образованию в области инфокоммуникационных технологий и систем связи в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» квалификации (степени) «бакалавр» и «магистр»
2. Гуров, В. В. Архитектура микропроцессоров [Электронный ресурс] : учебное пособие / В. В. Гуров. - 2-е изд. - Москва : ИНТУИТ, 2016. - 327 с. - ISBN 978-5-9963-0267-3 : Б. ц. Книга из коллекции ИНТУИТ - Информатика

### **Дополнительная литература:**

1. Основы цифровой обработки сигналов [Текст] : курс лекций : учебное пособие для вузов / А. И. Солонина [и др.]. - 2-е изд., испр. и перераб. - СПб. : БХВ-Петербург, 2012. - 768 с. : ил. - Библиогр. : с. 741-746. - ISBN 978-5-94157-604-3 : 199.00 р.  
Прил. : с. 677-740
2. Гадзиковский, В. И. Методы проектирования цифровых фильтров [Электронный ресурс] / В. И. Гадзиковский. - Москва : Горячая Линия–Телеком, 2012. - 416 с. : ил. - ISBN 978-5-9912-7003-8 : Б. ц.