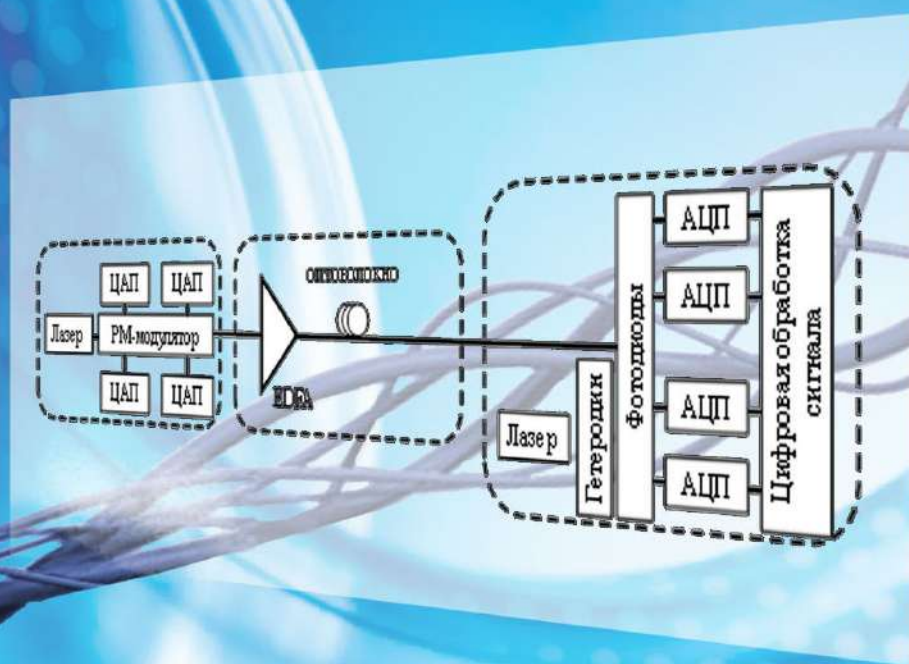


А.С. Перин

# ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ:

## ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ И СИНХРОНИЗАЦИИ



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

А.С. Перин

ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ:  
ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ  
И СИНХРОНИЗАЦИИ

Учебное пособие для студентов,  
обучающихся по направлению подготовки  
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии  
и системы связи», профиль «Оптические системы  
и сети связи»

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2021

УДК [004.665+621.396.6](075.8)  
ББК 32.88-01я73  
П274

**Рецензенты:**

**Горлов Н.И.**, д-р техн. наук, профессор;  
**Коханенко А.П.**, д-р физ.-мат. наук, профессор

Печатается по решению научно-методического совета ТУСУРа  
(протокол № 5 от 24.06.2021 г.).

**Перин, Антон Сергеевич**

П274 **Оптические цифровые телекоммуникационные системы: технологии мультиплексирования и синхронизации: учеб. пособие / А. С. Перин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – 118 с.**

ISBN 978-5-86889-928-7

Приведены основные сведения о современных оптических цифровых телекоммуникационных системах, технологиях мультиплексирования, синхронизации в цифровых волоконно-оптических линиях связи и цифровые иерархии. Даны тестовые задания и вопросы для самоконтроля.

Для студентов всех форм обучения направления подготовки бакалавров 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль «Оптические системы и сети связи». Может быть полезно как разработчикам, так и специалистам по эксплуатации оборудования и систем оптической связи.

УДК [004.665+621.396.6](075.8)  
ББК 32.88-01я73

ISBN 978-5-86889-928-7

© Перин А. С., 2021  
© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2021

# Оглавление

Введение .....	4
<b>1 ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ</b>	
1.1 Волоконно-оптические системы передачи .....	7
1.2 Обобщенная структурная схема цифровых оптических систем передачи .....	16
Вопросы для самоконтроля .....	24
Тесты .....	25
<b>2 ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ КАНАЛОВ</b>	
2.1 TDM и синхронное мультиплексирование .....	31
2.2 Асинхронное мультиплексирование .....	46
2.3 WDM-мультиплексирование .....	52
2.4 OTDM-мультиплексирование .....	54
2.5 SDM-мультиплексирование .....	57
Вопросы для самоконтроля .....	60
Тесты .....	62
<b>3 ПЛЕЗИОХРОННЫЕ И СИНХРОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ИЕРАРХИИ</b>	
3.1 Плезиохронная цифровая иерархия .....	67
3.2 Синхронная цифровая иерархия .....	79
Вопросы для самоконтроля .....	88
Тесты .....	88
<b>4 СИНХРОНИЗАЦИЯ В ЦВОСП</b>	
4.1 Виды синхронизации в ЦВОСП .....	94
4.2 Тактовая синхронизация .....	97
4.3 Оптимальная синхронизация фаз .....	98
4.4 Синхронизация тактовой частоты .....	100
Вопросы для самоконтроля .....	104
Тесты .....	104
Список обозначений и сокращений .....	107
Литература .....	111

## Введение

Быстрый переход от аналоговых систем к цифровым за последние приблизительно 50 лет сделал возможным универсальную обработку всех видов информации в основном без потери качества. Прорыв в цифровых полупроводниковых технологиях и их огромная возможность масштабирования позволили рентабельное массовое производство многофункциональных, высоконадежных и энергоэффективных микрочипов, которые сегодня можно найти практически в любом электронном устройстве, от высокопроизводительных интернет-маршрутизаторов до недорогой бытовой электроники. С генерацией, обработкой и хранением цифровой информации тесно связана потребность в транспортировке данных, начиная от коротких шин данных на кристалле и на уровне платы до магистральных транспортных сетей, охватывающих земной шар, к зондам дальнего космоса, собирающим научные данные. Каждое из этих очень разных приложений сопряжено со своим набором технических проблем, которые можно решить с помощью электронных, радиочастотных (РЧ) или оптических систем связи. Среди различных технологий связи оптическая связь обычно имеет преимущество перед электронными или РЧ-системами передачи в основной полосе частот, когда задействованы высокие совокупные скорости передачи данных и/или большие расстояния передачи. Оба преимущества имеют глубокие корни в физике: во-первых, высокие оптические несущие частоты позволяют создавать системы с высокой пропускной способностью при небольшой относительной полосе пропускания. Например, всего 2,5 % полосы пропускания на несущей частоте 193 ТГц (длина волны 1,55 мкм) позволяет использовать около 5 ТГц непрерывного диапазона частот. Такие «узкополосные» системы намного проще спроектировать, чем системы с большой относительной полосой пропускания. Во-вторых, потери при передаче на оптических частотах обычно очень малы по сравнению с электронными или радиочастотными технологиями основной полосы частот. Сегодняшние оптические телекоммуникационные волокна демонстрируют потери менее 0,2 дБ/км; потери в типичных коаксиальных кабелях, поддерживающих полосу пропускания около 1 ТГц, на 2–3 порядка выше. В системах со свободным

пространством оптические лучи имеют гораздо меньшие углы расходимости, чем в микроволновом режиме, однако за счет значительно более жестких требований к наведению антенны. Узкая ширина луча благоприятно сказывается на бюджете линии связи системы, особенно в космических системах, где атмосферное поглощение представляет меньшую проблему. Помимо двух вышеупомянутых основных преимуществ, иногда играют роль и другие соображения, такие как нерегулируемый спектр в оптическом режиме или отсутствие электромагнитных помех.

Современные системы связи обеспечивают передачу данных из одного места в другое независимо от того, разделены ли они несколькими километрами или заокеанскими расстояниями. Информация часто переносится электромагнитной несущей волной, частота которой может варьироваться от нескольких мегагерц до нескольких сотен терагерц. Системы оптической связи используют высокие несущие частоты (порядка 100 ТГц) в видимой или ближней инфракрасной области электромагнитного спектра. Иногда их называют световолновыми системами, чтобы отличить от микроволновых систем, несущая частота которых обычно на пять порядков меньше (около 1 ГГц). **Оптические цифровые телекоммуникационные системы** – это световолновые системы, использующие для передачи информации оптические волокна. Такие системы были развернуты по всему миру с 1980 г. и действительно произвели революцию в технологиях, лежащих в основе телекоммуникаций. Считается, что световолновая технология вместе с микроэлектроникой станет основным фактором наступления «информационной эпохи».

С момента изобретения в начале 1970-х годов оптического волокна использование и спрос на него значительно выросли. Сегодня оптическое волокно применяется довольно часто. В условиях стремительного роста информационного трафика (Интернет, электронная коммерция, компьютерные сети, мультимедиа и прочее) потребность в среде передачи с пропускной способностью для обработки таких огромных объемов информации становится первоочередной. Волоконная оптика с ее относительно неограниченной пропускной способностью оказалась решением.

Первостепенная цель этого пособия – изложить основные сведения о современных технологиях мультиплексирования и синхронизации, применяемых в оптических цифровых телекоммуникационных системах, знание и глубокое понимание которых необходимо как специалистам-разработчикам, так и специалистам по эксплуатации оборудования и систем оптической связи.

Материал пособия разбит на четыре тематических раздела, относящихся к областям оптических цифровых систем связи. Это «Оптические цифровые телекоммуникационные системы», «Технологии мультиплексирования», «Плездохронные и синхронные цифровые иерархии», «Синхронизация в цифровых волоконно-оптических линиях связи».

В каждом разделе содержится не только теоретический материал, но и вопросы для самоконтроля, тестовые задания, приведен список литературы – все это позволяет использовать пособие для самостоятельного изучения дисциплины.



# 1 ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

## 1.1 Волоконно-оптические системы передачи

### История развития оптической связи

Использование света в целях коммуникации восходит к древности, если рассматривать оптическую связь в широком смысле [1]. Многие цивилизации использовали зеркала, огонь, маяки или дымовые сигналы для передачи информации. Та же самая идея использовалась вплоть до конца XVIII века через лампы, флаги и другие сигнальные устройства. Идея оптической связи была модернизирована в 1792 г. благодаря Клоду Шаппу. Его идея заключалась в передаче информации с использованием промежуточных ретрансляционных станций [2]. Первый такой оптический телеграф был введен в эксплуатацию между Парижем и Лиллем (примерно 200 км), а к 1830 г. сеть распространилась по всей Европе. Конечно, такая система была крайне медленной. Переводя на современную терминологию скорость передачи данных в таких системах была менее 1 бит/с [3].

Появление телеграфии в 1830-х годах заменило свет на электричество и началась эпоха электрических коммуникаций [4]. Скорость передачи данных была увеличена до 10 бит/с при помощи использования новых методов кодирования (например, азбука Морзе). Можно сказать, что ранняя телеграфия использовала цифровые сигналы – электрические импульсы разной длительности (точки и тире азбуки Морзе). Изобретения же телефона в 1876 г. привело к переходу к аналоговой связи, так как электрические сигналы передавались в аналоговой форме через переменный электрический ток [5].

В дальнейшем использование коаксиального кабеля значительно увеличило емкость канала связи. Первый коаксиальный кабель был введен в эксплуатацию в 1940 г., такой канал связи работал на частоте 3 МГц и был способен одновременно передавать до 300 голосовых или один телевизионный канал. Пропускная способность такой системы была ограничена потерями в кабеле, которые



зависят от частоты и резко увеличиваются при частоте выше 10 МГц.

Это ограничение было снято благодаря переходу к СВЧ. Первая микроволновая система была введена в эксплуатацию в 1948 г. и работала на частоте 4 ГГц.

Принято, что показателем качества связи является показатель ВL. Этот показатель представляет из себя произведение скорости передачи информации В (бит/с) на длину ретрансляции L (км). На рисунке 1 представлено увеличение параметра ВL за период с 1840 до 2020 г. [6].

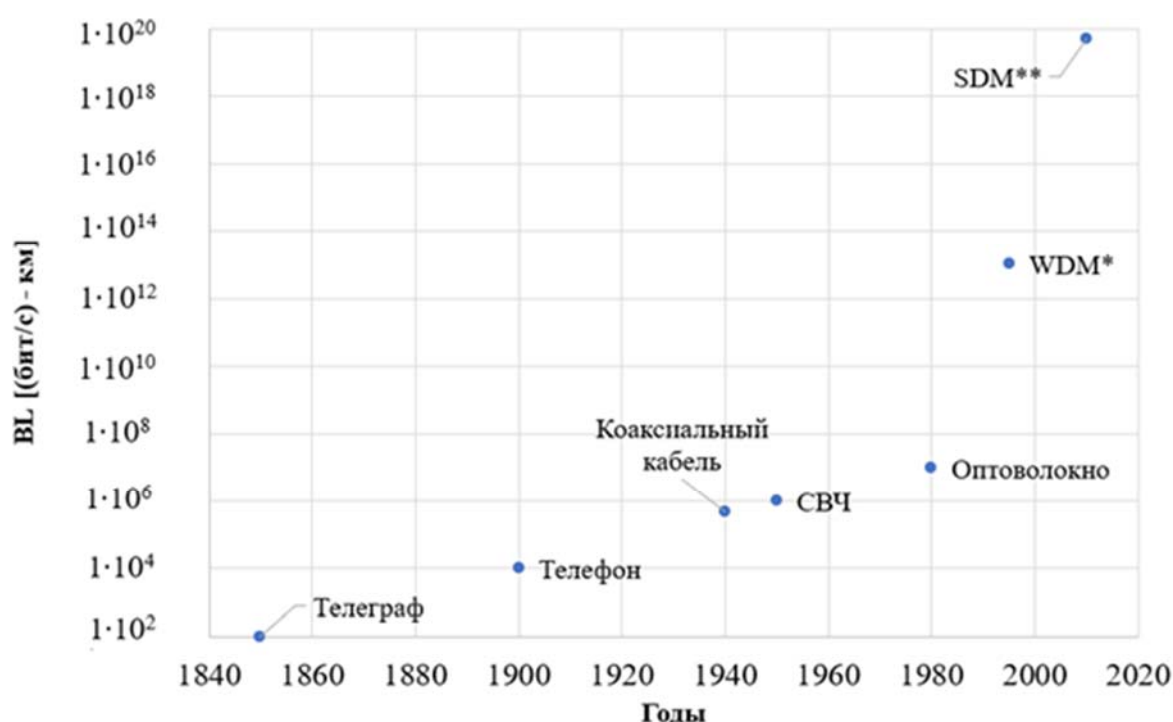


Рисунок 1 – Рост ВL за период с 1840 до 2020 г.:

\*WDM – Wavelength Division Multiplexing (технология спектрального уплотнения каналов или мультиплексирование с разделением по длине волны); \*\*SDM – Space Division Multiplexing (уплотнение каналов с пространственным разделением)

В 1954 г. советскими учеными Н. Г. Басовым и А. М. Прохоровым и независимо от них американским ученым Ч. Таунсом был изобретен лазер (акроним от англ. *light amplification by stimulated emission of radiation*). Изобретение лазера привело к революции в сфере телекоммуникаций. Лазер является источником когерентного излучения, а такое излучение позволило передавать огромные по

меркам того времени объемы информации по сравнению с используемыми ранее радиоволнами [7].

После интенсивных исследований в 1970-х годах появилась первая коммерческая волоконно-оптическая система передачи. Под *волоконно-оптической системой передачи* (ВОСП) подразумевается комплекс технических средств, обеспечивающий формирование типовых каналов и трактов передачи с использованием в качестве направляющей среды оптического кабеля и передач по нему оптических сигналов (модулированное оптическое излучение определенной длины волны). Первая ВОСП была представлена в 1982 г., она работала на длине волны 850 нм и *битрейт* (количество бит, используемых для передачи/обработки данных в единицу времени) такой системы составлял 34 Мбит/с [8].

Затем в 1988 г. была представлена ВОСП, соединяющая Европу и Северную Америку, эта система получила название трансатлантического телефонного оптического кабеля восьмого поколения (ТАТ-8). Такая ВОСП работала на длине волны 1300 нм, а ее битрейт достигал 280 Мбит/с. Через 3 года появилась система ТАТ-9, битрейт которой достигал 560 Мбит/с [9].

С тех пор оптоволокно находит применение в основном в качестве среды для передачи информации в сетях различного уровня: от межконтинентальных магистралей до местных компьютерных сетей.

### **Оптическое волокно**

Простейшая оптическая система передачи состоит из передатчика (источника света, в качестве которого зачастую выступает инфракрасный лазерный диод), канала передачи (оптического волокна) и приемника (фотодетектора).

На рисунке 2 показана структура оптоволокна [14]. Оптическое волокно представляет из себя нить из оптически прозрачного материала (например, легированный диоксид кремния), окруженного материалом с другим показателем преломления (например, чистый диоксид кремния). Свет в таком волокне распространяется за счет полного внутреннего отражения, для обеспечения которого необходимо, чтобы показатель преломления сердцевины был чуть выше показателя преломления оболочки. Размер волокна обозначается

двумя числами: диаметр сердечника и диаметр оболочки, например в рекомендации сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (ITU – *International Telecommunication Union*) G.651 указан стандартный размер волокна 50/125 мкм.

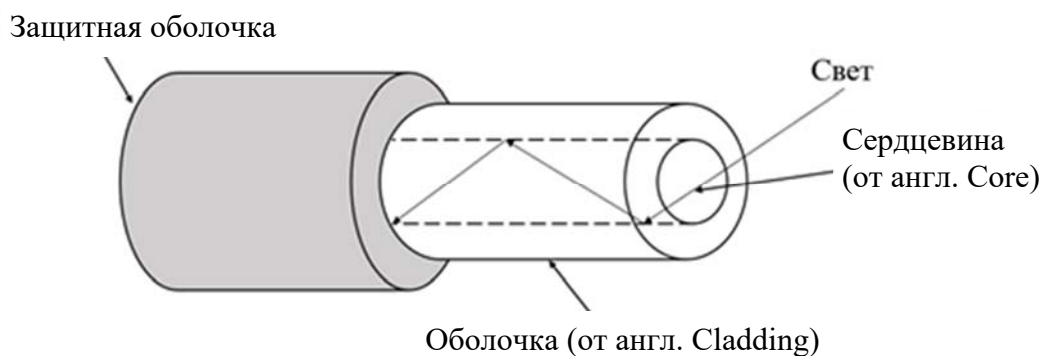


Рисунок 2 – Структура оптоволокна

Оптические волокна проектируются на основе закона Снеллиуса:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (1)$$

где  $n_1$  – показатель преломления среды, из которой свет падает на границу раздела (в случае оптоволокна  $n_{\text{cor}}$ );  $\theta_1$  – угол между падающим на поверхность лучом и нормалью к поверхности;  $n_2$  – показатель преломления среды, в которую свет попадает, пройдя границу раздела (в случае оптоволокна  $n_{\text{cl}}$ );  $\theta_2$  – угол между прошедшим через поверхность лучом и нормалью к поверхности.

При выполнении условия  $n_1 > n_2$  существует критический угол  $\theta_C$ , при котором падающий луч полностью отражается от границы раздела без потерь на преломление.

Максимальный угол, под которым луч может проникнуть в волокно и отражаться от его стенок без потерь, является функцией показателя преломления сердечника  $n_{\text{cor}}$ , оболочки  $n_{\text{cl}}$  и воздуха ( $n_0 = 1$ ). На рисунке 3 [14] отражена схема хода лучей в оптоволокне при выполнении закона полного внутреннего отражения. Синус максимального угла между оптической осью и лучом  $\theta_m$  называется числовой апертурой оптического волокна:

$$NA = \sin \theta_m = \sqrt{n_{\text{кор}}^2 - n_{\text{кл}}^2}. \quad (2)$$

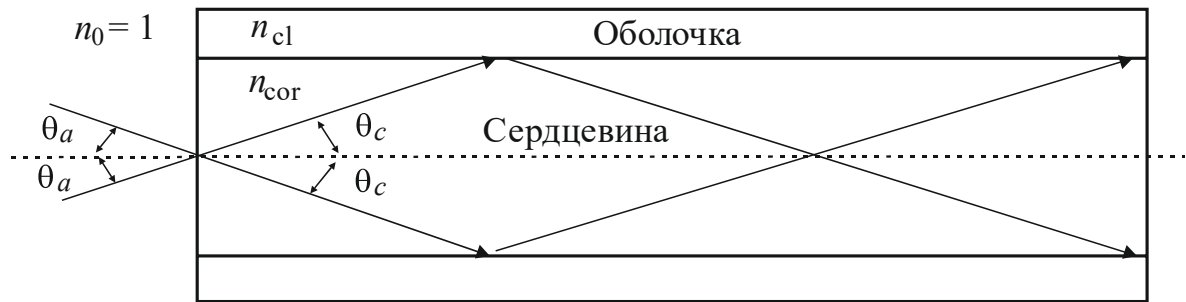


Рисунок 3 – Схема хода лучей в оптоволокне при выполнении закона полного внутреннего отражения

Различные «разрешенные» углы входа лучей  $\theta_a \leq \theta_m$  приводят к возникновению нескольких мод, общее число которых определяется размером сердечника, длиной волны и числовой апертурой [14].

Оптоволокна, используемые в ВОСП, делятся на два базовых типа (рисунок 4):

- одномодовое волокно – стандартное (SMF – *Single Mode Fiber*), применяется в большинстве оптических систем связи;
- многомодовое волокно, применяется для передачи информации на небольшие расстояния;

SMF характеризуется малой числовой апертурой и более трудным соединением с другими частями ВОСП, однако в таком волокне отсутствует межмодовая дисперсия, за счет чего обеспечивается большая скорость передачи данных на большие расстояния.

Многомодовое волокно, наоборот, обладает большей числовой апертурой, соединение с другими частями ВОСП в таком волокне проще, однако за счет межмодовой дисперсии скорость передачи данных невысока и такой тип волокна используют для передачи информации на небольшие расстояния [13].

Со времен его изобретения спрос на использование оптического волокна значительно возрос. С развитием Интернета и последующим появлением электронной торговли, началом передачи не только голосовой, но и видеoinформации возникла потребность в среде передачи с высокой пропускной способностью, которую могла обеспечить волоконная оптика. Первые оптоволоконные

системы передачи данных могли передавать информацию со скоростью 100 Мб/с. Затем развитие таких систем позволило в начале 2000-х добиться скорости 10 Гб/с [10], в 2010-х – более 100 Гб/с [3], в 2018 г. исследователи из института NICT Network System и компании Fujikura Ltd добились скорости в 159 Тб/с на расстоянии 1045 км, а в 2020 г. удалось практически удвоить расстояние передачи данных (2040 км) и добиться скорости 172 Тб/с [11].

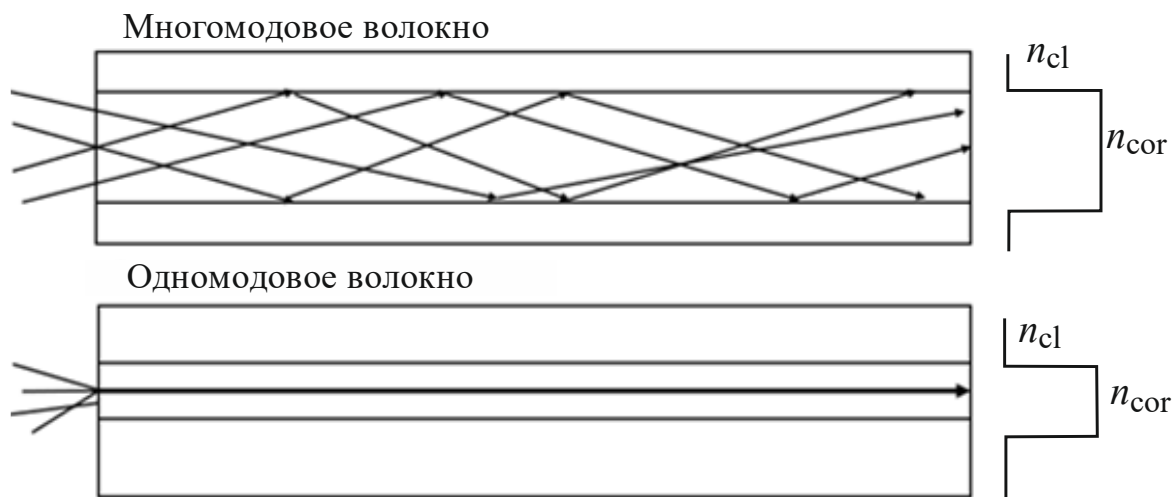


Рисунок 4 – Разновидности оптоволокон

Такие компании, как AT&T и MCI используют оптоволоконный кабель для передачи обычной телефонной связи (POTS – *plain old telephone service*) через свои общенациональные сети. Оптоволокно также широко используется для передачи данных. Крупные банки и корпорации имеют свои собственные частные сети. Таким организациям нужны безопасные надежные системы для передачи различной информации. Безопасность, присущая оптоволоконным системам, является ее основным преимуществом. Рассмотрим другие преимущества оптоволоконна.

**Передача сигнала на большие расстояния.** В массовом производстве на 2017 г. на оптоволоконне с сердцевиной из кварцевого стекла были реализованы рекордные значения потерь в 0,142 дБ/км на длине волны 1560 нм [12].

**Большая пропускная способность, малые габариты.** Постоянный рост трафика нередко требует прокладки новых кабелей в уже существующих системах воздуховодов и кабелепроводов.

Относительно небольшой диаметр и малый вес оптоволокна позволяют упростить процесс прокладки оптических кабелей и экономно использовать имеющееся пространство.

**Отсутствие проводимости.** Одним из преимуществ оптических волокон является их диэлектрическая природа. Поскольку оптическое волокно не имеет металлических компонентов, его можно устанавливать в зонах с электромагнитными помехами, включая радиочастотные помехи. К областям с высоким уровнем электромагнитных помех относят линии электропередач и железнодорожные пути.

**Безопасность.** В отличие от металлических систем, диэлектрическая природа оптического волокна делает невозможным удаленное обнаружение сигнала, передаваемого по кабелю. Единственный способ сделать это – получить доступ к оптоволокну. Для доступа к оптоволокну требуется вмешательство, которое легко обнаружить с помощью системы защиты. Эти обстоятельства делают оптоволокно привлекательным для правительственных органов, банков и других организаций, где чрезвычайно важна безопасность.

**Перспективность.** Поскольку потребности в полосе пропускания быстро растут с развитием технологий, оптоволокно будет продолжать играть жизненно важную роль в долгосрочной перспективе [13].

### **Преобразование аналогового сигнала.**

#### **Импульсно-кодовая модуляция**

Во многих системах связи доминируют аналоговые сигналы (звук, музыка, видео). В связи с этим остро встает вопрос в способе аналого-цифрового преобразования (АЦП). Одним из способов АЦП является импульсно-кодовая модуляция (PCM – *pulse-code modulation*). PCM происходит за счет трех отдельных процессов: дискретизации по времени, квантования по уровню и кодирования. Частота дискретизации определяется по теореме Котельникова – Найквиста – Шеннона. Затем мгновенное измеренное значение амплитуды округляется до ближайшего целого значения (квантуется). Число уровней квантования должно быть равно или кратно целой степени двойки, после чего происходит процесс кодирования,

в результате которого формируются группы закодированных импульсов в последовательном коде [14]. На рисунке 5 приведена структурная схема процесса РСМ [15].

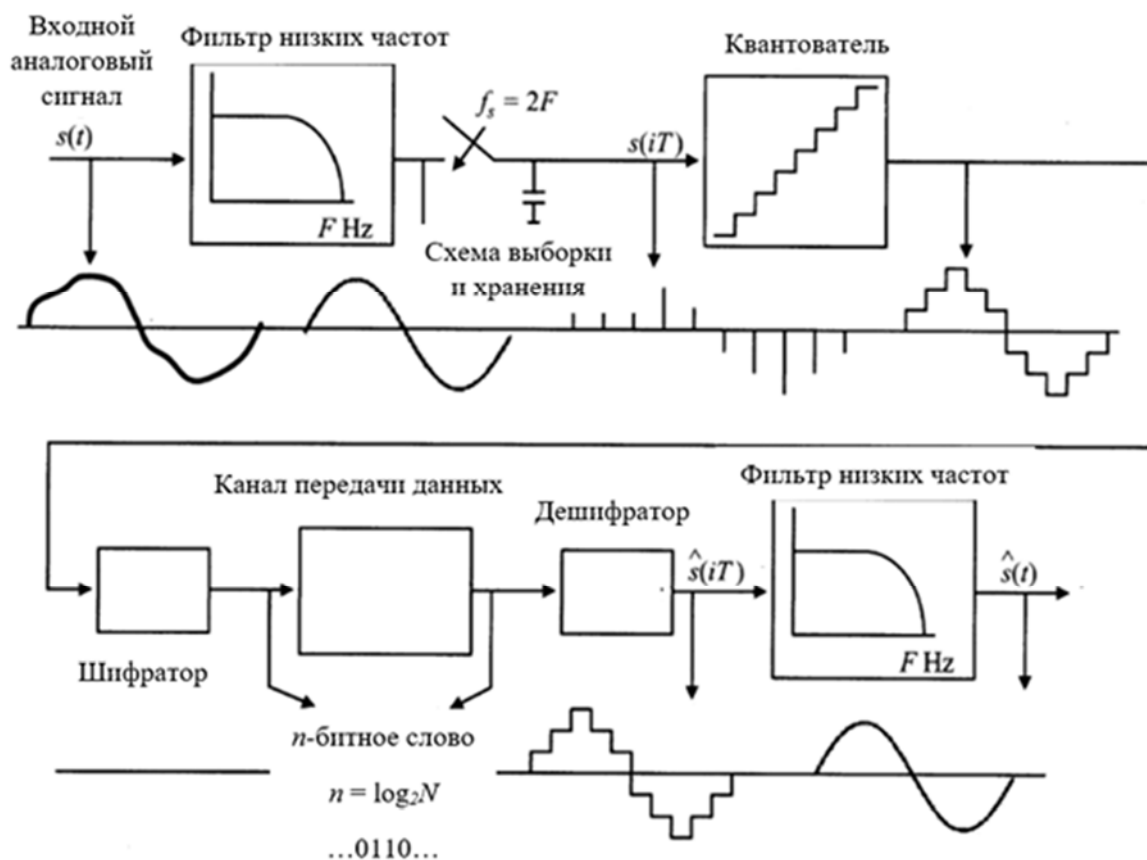


Рисунок 5 – Структурная схема процесса РСМ

Описание рисунка 5:

- 1) аналоговый входной сигнал  $s(t)$  ограничен полосой с помощью фильтра низких частот до частоты  $F$ ;
- 2) «обрезанный» низкочастотный сигнал дискретизируется с частотой, которая должна быть равна или превышать частоту, полученную из теоремы Котельникова – Найквиста – Шеннона ( $f_s = 2F$ );
- 3) дискретизированный сигнал удерживается схемой выборки и хранения между двумя периодами дискретизации;
- 4) в течение этого временного интервала сигнал квантуется на один из  $N$  уровней. Таким образом происходит преобразование мгновенного значения амплитуды аналогового сигнала в набор дискретных величин. В результате квантования появляется ошибка за



счет округления до одного из  $N$  уровней. Чем больше уровней квантования, тем меньшая ошибка будет получена на выходе;

5) шифратор преобразует уровень амплитуды, выбранный квантователем, в  $n$  код ( $n = \log_2 N$ );

6) после передачи двоичного кода дешифратор преобразует РСМ-сообщения обратно в уровни амплитуды, а фильтр низких частот преобразует уровни амплитуды в первоначальный аналоговый сигнал.

Значимость РСМ в цифровой передаче данных основана на высокой производительности этого метода и его универсальном стандарте. Особенно РСМ подходит для оцифровки голоса, РСМ со скоростью 64 кбит/с является международным стандартом, основанным на частоте дискретизации 8 кГц и 8-битном коде на выборку [12].

В 1972 г. ИТУ выпустил рекомендацию G.711 [15], в ней задокументировано использование двух алгоритмов компановки, так называемые А-закон и  $\mu$ -закон. РСМ является не самым эффективным методом оцифровки сигналов.

Адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (ADPCM – *Adaptive Differential Pulse Code Modulation*) более эффективна и обычно используется в телекоммуникациях для связи на большие расстояния, при этом обеспечивая приемлемую точность. Отличие такой РСМ состоит в том, что этот тип модуляции уменьшает требуемое количество бит на выборку примерно на 25 %, а переменный шаг квантования позволяет снизить требования к полосе пропускания при заданном соотношении сигнал/шум. В рекомендации G.726 от 1990 г. указаны блок-схемы и арифметические операции, которые требуется выполнить каждому системному блоку [16].

## 1.2 Обобщенная структурная схема цифровых оптических систем передачи

### Классификация ВОСП

ВОСП, как и кабельные линии связи, имеют те же базовые элементы – передатчик, линию передачи, повторитель (при необходимости) и приемник. Отличие состоит в том, что в качестве сигнала используется свет, а в качестве линии передачи – оптоволокно. Основное применение оптоволокно нашло в цифровой передаче данных, где в настоящее время используются скорости, значительно превышающие 1 Гб/с [14].

Сложность ВОСП может варьироваться от очень простой (например, локальная сеть) до сети среднего уровня (междугороднего телефонного соединения или кабельного телевидения). Также ВОСП может быть чрезвычайно сложной и дорогой при построении магистральной (*long-haul*) связи или при сокращении числа оптических/электронных/оптических преобразователей (О/Е/О) в оптической транспортной сети (OTN – *Optical Transport Network*) [17]. Для конструирования простейшей ВОСП понадобится источник света (светодиод или лазер), оптоволокно, фотодиод и простая электрическая схема. Цена такой ВОСП может достигать нескольких десятков долларов. С другой стороны, типичная система, применяемая для дальней широкополосной связи, в которой используется мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), волоконные усилители на основе эрбия (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*), внешняя модуляция с использованием лазеров с распределенной обратной связью (DFB – *Distributed Feedback Laser*), волоконные брэгговские решетки и высокоскоростные инфракрасные фотоприемники могут стоить сотни тысяч долларов [18].

Существует несколько систем классификации ВОСП, рассмотрим лишь некоторые из них, но перед этим необходимо дать определение *каналообразующему оборудованию тракта передачи*. Каналообразующее оборудование тракта передачи обеспечивает формирование определенного числа типовых каналов или типовых

групповых трактов со стандартной шириной полосы пропускания или скоростью передачи.

ВОСП, как и традиционные системы, работающие по электрическим кабелям связи, принято классифицировать следующим образом.

*В зависимости от каналообразующего оборудования:*

- аналоговые волоконно-оптические системы передачи, в которых каналообразующее оборудование строится на основе аналоговых систем передачи с частотным разделением каналов (FDM – *Frequency Division Multiplexing*) и, соответственно, аналоговых методов модуляции параметров несущей частоты (амплитудная, частотная, фазовая модуляции и их комбинации) или параметров периодической последовательности импульсов (амплитудно-импульсная, широтно-импульсная, фазоимпульсная модуляции и их комбинации);

- цифровые волоконно-оптические системы передачи (ЦВОСП), в которых каналообразующее оборудование строится на основе импульсно-кодовой модуляции, дельта-модуляции и их разновидностей; самое широкое применение находят цифровые ВОСП на основе ИКМ с временным разделением каналов (TDM – *Time Division Multiplexing*).

Цифровые волоконно-оптические системы передачи в зависимости от каналообразующего оборудования подразделяются:

- на ЦВОСП плезиохронной цифровой иерархии (PDH – *Plesiochronous Digital Hierarchy*), если в качестве каналообразующего оборудования используется оборудование формирования первичных, вторичных, третичных и четверичных цифровых потоков (потоков E1, E2, E3 и E4 европейского стандарта PDH или DS-1, DS-2 и DS-3 американского стандарта PDH);

- ЦВОСП синхронной цифровой иерархии (СЦИ, SDH), если в качестве каналообразующего оборудования используется оборудование формирования синхронных транспортных модулей STM-1, STM-4, STM-16, STM-64 и STM-256.

Для обеспечения естественного диалога между абонентами связь должна быть двусторонней.

*В зависимости от схемы организации двусторонней связи ВОСП подразделяются:*

- на двухволоконные однополосные однокабельные, в которых передача и прием оптических сигналов ведется по двум оптическим волокнам на одной длине волны. При этом каждое волокно является эквивалентом двухпроводной физической цепи. Так как взаимные влияния между оптическими волокнами кабеля отсутствуют, то тракты передачи и приема различных систем организуются по одному кабелю, что характерно для любой схемы организации двусторонней связи;

- одноволоконные однополосные однокабельные, особенностью которых является использование одного оптического волокна для передачи сигналов в двух направлениях на одной и той же длине волны;

- одноволоконные двухполосные однокабельные, в которых передача в одном направлении ведется на одной длине волны оптического излучения, а в обратном – на другой.

*В зависимости от количества оптических каналов и методов уплотнения оптического волокна ВОСП подразделяются:*

- на одноволновые ВОСП, в которых по линейному тракту в любом направлении передается одна модулированная оптическая несущая (один оптический канал);

- многоволновые ВОСП или ВОСП со спектральным разделением или мультиплексированием с разделением по длине волны (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), при котором по одному волокну одновременно передается несколько спектрально разнесенных оптических несущих, каждая из которых модулируется сигналом, сформированным соответствующим каналообразующим оборудованием.

### **Устройство составных частей ЦВОСП**

На рисунке 6 представлена структурная схема ЦВОСП [18]. В ЦВОСП входной и выходной сигнал является цифровым.

Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) предназначен для преобразования входного цифрового сигнала в электрический сигнал, который за счет фазовой модуляции (PM – *Phase Modulation*)

передает информацию на несущей волне. Затем световой сигнал распространяется по оптическому каналу, который представляет из себя оптоволоконно и EDFA.

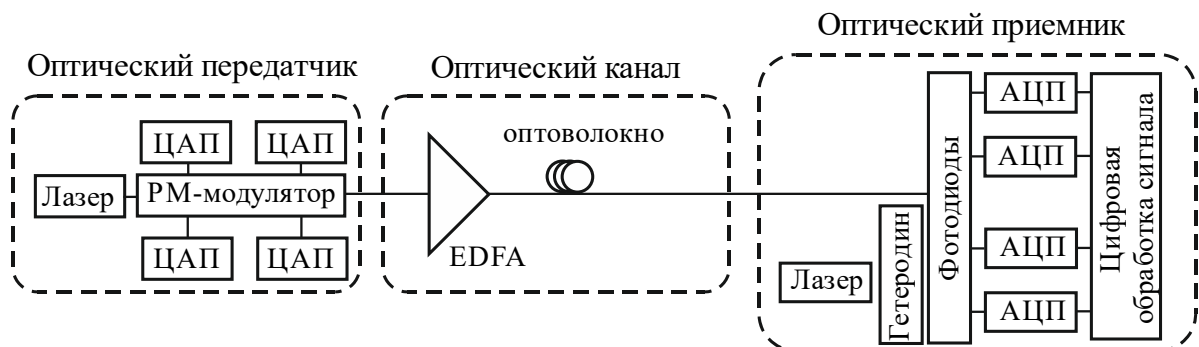


Рисунок 6 – Структурная схема ЦВОСП

После этого свет попадает на модуль приемника, состоящий из гибридных и балансных фотодиодов, позволяющих обнаружить как амплитуду, так и фазу приходящей световой волны. После аналого-цифрового преобразователя (АЦП) происходит цифровая обработка сигнала (DSP – *Digital Signal Processing*) [18].

### Устройство оптического передатчика

Роль оптического передатчика заключается в кодировании информации в световой волне. Его работу можно разделить на функции, реализованные в цифровой, электрической и оптической области. Операции в цифровой области характеризуются дискретным представлением передаваемой информации. Затем этот цифровой код преобразуется в электрический сигнал, который используется для модуляции несущей световой волны [18].

#### *Оптические источники*

Наиболее важным требованием для оптических источников является высокая оптическая мощность на выходе при низкой электрической мощности на входе. Для обеспечения эффективной связи ширина спектральных линий, а также расходимость луча и геометрический размер должны быть небольшими. Основными источниками света, которые используются в ВОСП, служат светодиоды (LED – *Light Emittig Diode*) или полупроводниковые лазеры. Главными параметрами являются мощность излучения, ширина полосы модуляции и ширина спектра [10]. В работе [19] объясняется

разница между светодиодом и полупроводниковым лазером. Ниже порогового тока лазер работает как светодиод. Когда инжекционный ток превышает пороговый, возникают вынужденные переходы и мощность излучения значительно возрастает [20] (рисунок 7).

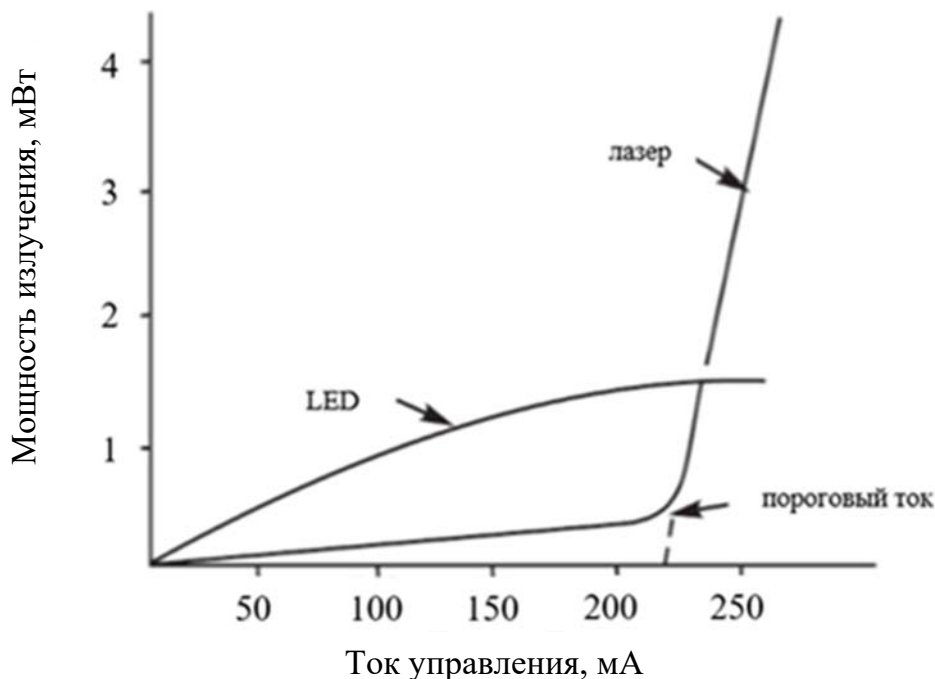


Рисунок 7 – Зависимость мощности излучения от тока управления

Стоит отметить, что LED больше подходит для аналоговой модуляции за счет своей практически линейной характеристики.

Однако ширина спектра у лазера значительно меньше, чем у LED [19], то есть лазер обеспечивает меньшую хроматическую дисперсию (рисунок 8).

#### *Оптические модуляторы*

Самым простым способом модуляции является прямая модуляция включением и выключением источника света. До появления когерентных источников света данные подвергались амплитудной модуляции (ООК – *On-Off-Keying*). На сегодняшний день такая модуляция до сих пор используется для передачи информации на небольшие расстояния [7].

Помимо ООК-модуляции, используется синфазная/квадратурная (I/Q – *In-phase/Quadrature*) модуляция. В I/Q-модуляторах применяют интерферометры для кодирования информации (наиболее

распространенный интерферометр Маха – Цендера на основе  $\text{LiNbO}_3$ ).

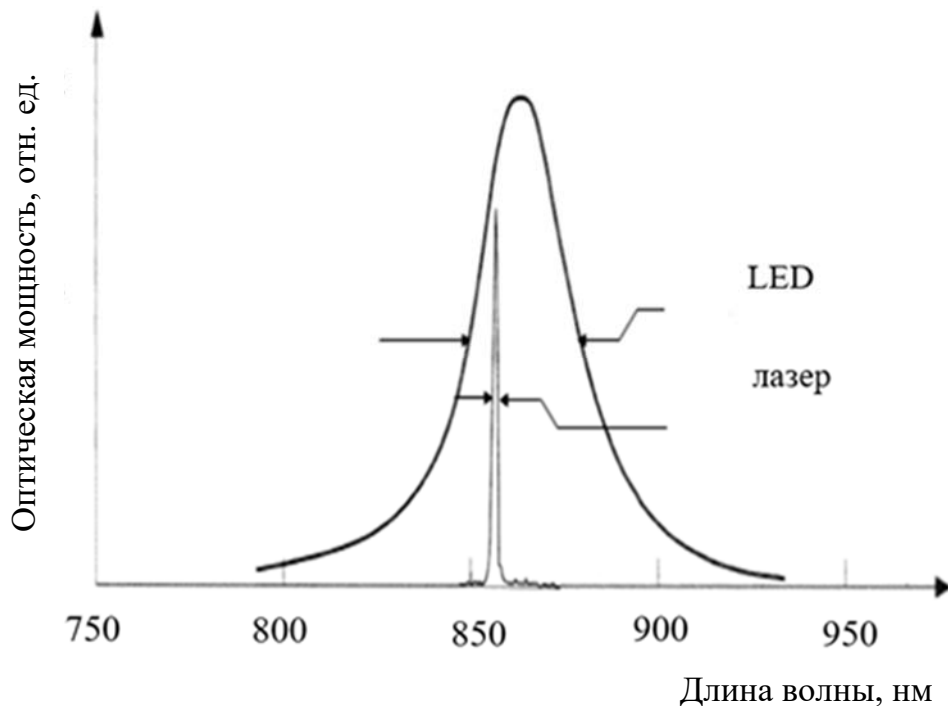


Рисунок 8 – Ширина спектра излучения лазера и LED

Недавние работы по  $\text{LiNbO}_3$  показали полосу пропускания в 100 ГГц [22]. Помимо  $\text{LiNbO}_3$ , также используется Si [23], InP [24] и плазмонные модуляторы на золотых подложках [25, 26].

В случае модуляции двух ортогональных по поляризации световых волн применяют РМ, который состоит из двух I/Q-модуляторов [18].

### Устройство оптического канала

Оптоволоконный канал состоит из оптоволоконной среды и усилителей, которые находят применение для периодического усиления сигнала в многопролетных каналах.

Для передачи на небольшие расстояния обычно используют градиентные многомодовые оптоволоконна (MMF – *MultiMode Fiber*), а высокопроизводительные системы связи – одномодовые оптоволоконна (SMF – *Single Mode Fiber*) и работу в C-диапазоне (около 1550 нм) [18]. Рассмотрим окна прозрачности современных оптических волокон.



Окно прозрачности (TW – *Transmission Window*) оптического волокна – диапазон длин волн оптического излучения, в котором имеет место меньшее затухание излучения в оптическом волокне. SMF имеет три окна прозрачности: 850 нм, 1310 нм и 1550 нм. Для других типов оптоволокна диапазон прозрачности может быть намного шире (например, в кварцевом оптоволокне полоса пропускания может охватывать весь видимый (380 – 740 нм), а также ближний (740 – 2500 нм) и средний инфракрасный (2500 – 50000 нм) диапазон). Наименьшее затухание наблюдается в ИК-спектре, поэтому третье TW используется в ВОСП, предназначенных для связи на большие расстояния.

В 1970-х годах системы волоконно-оптической связи использовали первое окно прозрачности, поскольку выпускаемые в то время GaAs-лазерные диоды и светодиоды работали на длине волны 850 нм. В настоящее время этот диапазон из-за большого затухания используется только в локальных сетях.

В 1980-х годах были разработаны лазеры на гетероструктурах, способные работать на длине волны 1310 нм, и второе окно прозрачности стало использоваться для дальней связи. Преимуществом данного диапазона явилась нулевая дисперсия на данной длине волны, что существенно уменьшало искажение оптических импульсов.

Третье окно прозрачности было освоено в начале 1990-х годов. Преимуществом третьего окна является не только минимум потерь, но и тот факт, что на длину волны 1550 нм приходится рабочий диапазон EDFA. Данный тип усилителей, имея способность усиливать все частоты рабочей области, предопределил использование третьего окна прозрачности для систем с WDM.

Четвертое окно прозрачности простирается до длины волны 1620 нм, увеличивая рабочий диапазон систем WDM.

Пятое окно прозрачности появилось в результате тщательной очистки оптического волокна от посторонних примесей. Таким образом было получено оптическое волокно AllWave, имеющее малые потери во всей области от 1280 нм до 1650 нм [27].

В таблице 1 приведены TW в соответствии с классификацией, предложенной Международным союзом электросвязи (ITU –

*International Telecommunication Union*) в диапазоне 1260 – 1675 нм в связи с расширением рабочего диапазона оптоволокна [27, 28].

Таблица 1 – Спектральные диапазоны TW

Обозначение	Длина волны, нм	Название
O	1260 – 1360	Основной (Original)
E	1360 – 1460	Расширенный (Extended)
S	1460 – 1530	Коротковолновый (Short wavelength)
C	1530 – 1565	Стандартный (Conventional)
L	1565 – 1625	Длинноволновый (Long wavelength)
U	1625 – 1675	Сверхдлинноволновый (Ultra-long wavelength)

По мере распространения световой сигнал затухает, и для восстановления уровня оптического сигнала применяются волоконно-оптические усилители. По сравнению с рамановскими и полупроводниковыми усилителями [29, 30] EDFA используются наиболее широко. EDFA изготавливаются на кремниевой и фтор-цирконатной основе. Оба типа применяются во всем рабочем диапазоне эрбия (1530 – 1560 нм).

### Устройство оптического приемника

Роль оптического приемника заключается в извлечении информации, передаваемой через оптоволокно. Этот процесс состоит из нескольких шагов, включая ADC и DSP.

Как показано на рисунке 6, в приемном модуле сигнал «смешивается» с излучением второго лазера, поступающим на гетеродин (LO – *Local Oscillator*), и попадает на фотодиод.

#### Фотодиоды

Основными параметрами фотодиодов являются высокая чувствительность, низкий уровень шума, линейность (для АВОСП) и небольшой размер. В ВОСП обычно используются PIN (PIN – *positive – intrinsic – negative*) и лавинные (APD – *Avalanche Photodiode*) фотодиоды.

PIN-фотодиод состоит из дырочного и электронного полупроводников, между которыми располагается нелегированный слой.

Кремниевые PIN-фотодиоды работают на 800 нм, а PIN-фотодиод на основе InGaAs – на 1300 и 1550 нм, так как эти фотодиоды имеют высокую квантовую эффективность (отношение числа фотонов, вызвавших генерацию носителей заряда, к общему числу поглощённых фотонов) на этих длинах волн.

APD состоит из четырех областей:  $p^+ - i - p - n^+$ . По своим функциям APD является твердотельным аналогом фотоумножителей за счет эффекта лавинного умножения (лавинного пробоя). Такие фотодиоды обладают повышенной чувствительностью, что позволяет использовать их для регистрации малых мощностей излучения (менее 1 нВт). Кремниевые и германиевые APD применяются на 800 нм, а InGaAs APD – на 1550 нм [10, 31].

## Вопросы для самоконтроля

1. В чем измеряется показатель ВЛ?
2. Что такое битрейт?
3. Расшифруйте аббревиатуру ТАТ-8.
4. По какому закону распространяется свет в оптоволокне?
5. Что такое числовая апертура оптоволокна?
6. Зачем нужно градиентное оптоволокно?
7. За счет каких трех процессов происходит аналого-цифровое преобразование?
8. По какой теореме определяется частота дискретизации?
9. Из каких базовых структурных элементов состоит любая система передачи информации?
10. Приведите любую классификацию ВОСП.
11. Какие самые распространенные источники излучения в ВОСП?
12. Что такое модуляция оптического излучения?
13. Дайте определение окну прозрачности оптоволокна.
14. Зачем нужен оптический усилитель и почему он расположен в оптическом канале?
15. Перечислите основные параметры фотодиодов.
16. Какие фотодиоды наиболее распространены в ВОСП?

## Тесты

1. В каком году был изобретен телефон?

- а) 1830;
- б) 1876;
- в) 1792;
- г) 1948.

2. Расположите в хронологической последовательности (от **а** до **и**) этапы развития систем связи:

- а) изобретение лазера;
- б) появление первых ретрансляционных станций;
- в) изобретение телефона;
- г) использование визуальных сигналов (дым, огонь, маяк);
- д) изобретение телеграфа;
- е) использование СВЧ-сигналов;
- ж) появление трансатлантического телефонного кабеля восьмого поколения;
- з) переход на коаксиальный кабель;
- и) появление первых коммерческих волоконных систем связи.

3. Оптоволокно в оптической системе информации сигнала играет роль:

- а) источника излучения;
- б) приемника излучения;
- в) преобразователя сигнала;
- г) среды для распространения света.

4. Для выполнения закона полного внутреннего отражения необходимо, чтобы выполнялось условие:

- а)  $n_1 < n_2$ ;
- б)  $n_1 > n_2$ ;
- в)  $n_1 = n_2$ ;
- г) верного ответа нет,

где  $n_1$  – показатель преломления сердцевины;  $n_2$  – оболочки.

5. Числовая апертура связывает показатели преломления составных частей оптоволокна и:

- а) диаметр сердцевины;
- б) длину волны света;
- в) количество мод в оптоволокне;
- г) максимальный угол входящих в оптоволокно лучей.

**6.** Межмодовая дисперсия присутствует:

- а) в одномодовом ступенчатом волокне;
- б) многомодовом ступенчатом оптоволокне;
- в) во всех волокнах;
- г) ни в каком из них.

**7.** Одним из стандартных размеров оптоволокна, закрепленном в стандарте ITU G.651, является:

- а) 100/100 мкм;
- б) 50 мкм;
- в) 50/125 мкм;
- г) 50/100 мм.

**8.** Закон полного внутреннего отражения связан с законом (формулой):

- а) Аррениуса;
- б) Снеллиуса (Снелла);
- в) Видемана – Франца;
- г) Френеля.

**9.** Какой тип оптоволокна необходимо использовать для передачи информации на большие расстояния?

- а) одномодовое ступенчатое;
- б) градиентное;
- в) многомодовое ступенчатое;
- г) никакое из этих.

**10.** Большинство сигналов (звук, музыка, видео) по своей природе являются:

- а) цифровыми;
- б) аналоговыми.

**11.** Расположите в правильном порядке (от **а** до **в**) этапы оцифровки сигнала:

- а) квантование;
- б) дискретизация;

в) кодирование.

**12.** Частота дискретизации определяется по теореме:

- а) Пифагора;
- б) Котельникова – Найквиста – Шеннона;
- в) Ферма;
- г) Менелая.

**13.** Частота дискретизации должна быть:

- а) в 2 или более раз выше частоты входного сигнала;
- б) равна частоте входного сигнала;
- в) меньше или равна частоте входного сигнала;
- г) кратна числу бит кодировки.

**14.** Чем больше уровней квантования сигнала, тем:

- а) дольше идет процесс оцифровки;
- б) меньшая ошибка будет получена на выходе;
- в) ниже должна быть частота дискретизации;
- г) больше информации можно закодировать.

**15.** Число уровней квантования должно быть:

- а) кратно частоте дискретизации;
- б) равно числу бит кодировки;
- в) кратно степени два;
- г) равно частоте дискретизации.

**16.** Из каких основных частей состоит ВОСП?

- а) передатчик, повторитель, приёмник;
- б) передатчик, канал связи, повторитель (при необходимости), приёмник;
- в) источник излучения, оптический усилитель, фотодиод;
- г) передатчик, канал связи (при необходимости), повторитель, приёмник.

**17.** Что **НЕ** входит в устройство передатчика ЦВОСП?

- а) ДАС (цифроаналоговый преобразователь);
- б) источник излучения;
- в) модулятор;
- г) оптический усилитель.

**18.** В полупроводниковом лазере резко увеличивается мощность излучения, когда:

- а) наблюдается инжекция носителей заряда;
- б) инжекционный ток превышает пороговый;
- в) инжекционный ток **НЕ** превышает пороговый;
- г) инжекционный ток равен нулю.

**19.** Какую роль выполняет передатчик в ЦВОСП?

- а) формирует оптическое излучение и передает его в оптоволокно;
- б) передает входные данные в оптоволокно;
- в) формирует оптическую несущую волну;
- г) преобразует входные данные в оптическое излучение.

**20.** В каком типе двусторонней ВОСП передача информации в одном направлении ведется на одной длине волны оптического излучения, а в обратном – на другой?

- а) одноволоконная однополосная одноканальная;
- б) одноволоконная двухполосная одноканальная;
- в) двухволоконная однополосная одноканальная;
- г) ни в каком из приведенных типов.

**21.** Каналообразующее оборудование тракта передачи обеспечивает:

- а) формирование определенного числа типовых каналов или типовых групповых трактов;
- б) кодирование информации;
- в) усиление оптического сигнала;
- г) нет верного ответа.

**22.** На какие типы делятся ВОСП в зависимости от каналообразующего оборудования?

- а) цифровые и аналоговые;
- б) синхронные и плезиохронные;
- в) одноволновые и многоволновые;
- г) одноволоконные однополосные одноканальные и одноволоконные двухполосные одноканальные.

**23.** К основным параметрам источника излучения **НЕ** относят:

- а) мощность излучения;
- б) ширину спектральных линий;
- в) ширину полосы модуляции;
- г) верного ответа нет.



- 24.** Ширина спектральных линии больше:
- а) у лазера;
  - б) LED.
- 25.** Для аналоговой модуляции больше подходит:
- а) лазер;
  - б) LED;
  - в) оба источника;
  - г) не подходит ни один.
- 26.** Сколько окон прозрачности оптоволокна освоено на данный момент?
- а) два;
  - б) три;
  - в) четыре;
  - г) пять.
- 27.** Наименьшее затухание электромагнитной волны наблюдается:
- а) в видимом диапазоне;
  - б) в ультрафиолетовом диапазоне;
  - в) в инфракрасном диапазоне;
  - г) не имеет значения.
- 28.** Какой из оптических усилителей получил наибольшее распространение?
- а) рамановский;
  - б) EDFA;
  - в) полупроводниковый;
  - г) основанный на механизме Мандельштамма – Бриллюэна.
- 29.** Из каких слоев полупроводника состоит PIN-диод?
- а) электронного и дырочного;
  - б) нейтрального и дырочного;
  - в) электронного, нейтрального и дырочного;
  - г) все слои полупроводника имеют один и тот же тип проводимости.
- 30.** APD по структуре представляет из себя последовательные слои полупроводников разного типа проводимости следующего вида:

- a)  $p-n-p$  ;
- б)  $n^+-p-n$  ;
- в)  $p-i-n$ ;
- г)  $p^+-i-p-n^+$ .

## 2 ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ КАНАЛОВ

### 2.1 TDM и синхронное мультиплексирование

При переходе от аналогового способа передачи данных к цифровому использовалась аналоговая телефонная сеть, которая оснащалась цифровым оборудованием. Для передачи голоса в цифровом виде было необходимо оцифровать аналоговый звуковой сигнал (процесс оцифровки голоса был рассмотрен ранее). Диапазон частот, в который помещается голос человека, составляет 300 – 3400 Гц, верхняя граница частоты в таком случае была выбрана 4000 Гц. Согласно теореме Котельникова – Найквиста – Шеннона дискретизация аналогового сигнала должна производиться с частотой не менее удвоенной верхней частоты, что составляет 8000 Гц. Таким образом, при использовании 8-разрядного АЦП скорость передачи данных оцифрованного сигнала, сформированного голосом человека, для телефонной сети составляет 64 000 бит/с ( $8000 \times 8$ ), или 64 Кбит/с. Канал связи для цифровых систем передачи данных, скорость передачи в котором равна 64 Кбит/с, называется *основным цифровым каналом*, или *нулевым уровнем* (DS-0 – *Digital Signal 0*; E0 – в европейском цифровом стандарте плезиохронной цифровой иерархии [ПЦИ, PDH – *Plesiochronous Digital Hierarchy*]; T0 – в североамериканском цифровом стандарте).

Так как большинство оптоволоконных систем способны передавать данные со скоростью более 1 Гбит/с, встает вопрос о максимальном использовании пропускной способности этой системы. В таком случае можно передавать информацию с нескольких каналов посредством *мультиплексирования*. Технология мультиплексирования, целью которой является разделение полосы пропускания одного канала передачи между несколькими пользователями, как раз увеличивает объем данных, передающихся через оптоволокно. На рисунке 9 схематично представлено мультиплексирование с разделением по частоте (FDM – *Frequency Division Multiplexing*). В волоконной оптике обычно используются два метода

мультиплексирования: мультиплексирование с разделением по времени (TDM – *Time Division Multiplexing*) (рисунок 10) и мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) [13]. В данном подразделе будет рассмотрен TDM-метод.

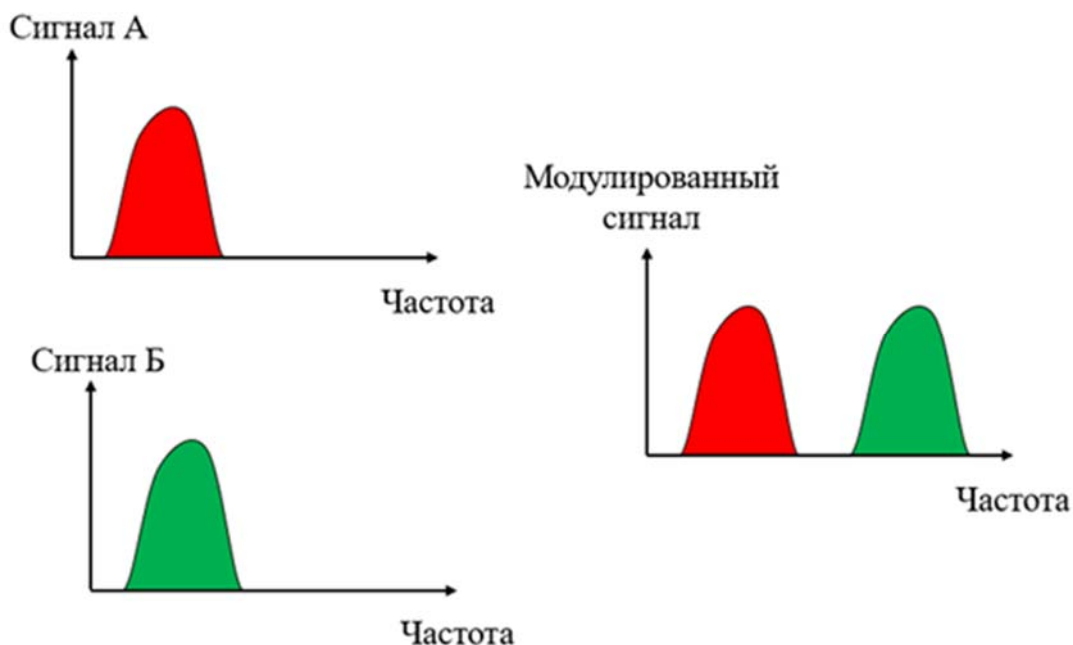


Рисунок 9 – Схематичное изображение FDM-процесса

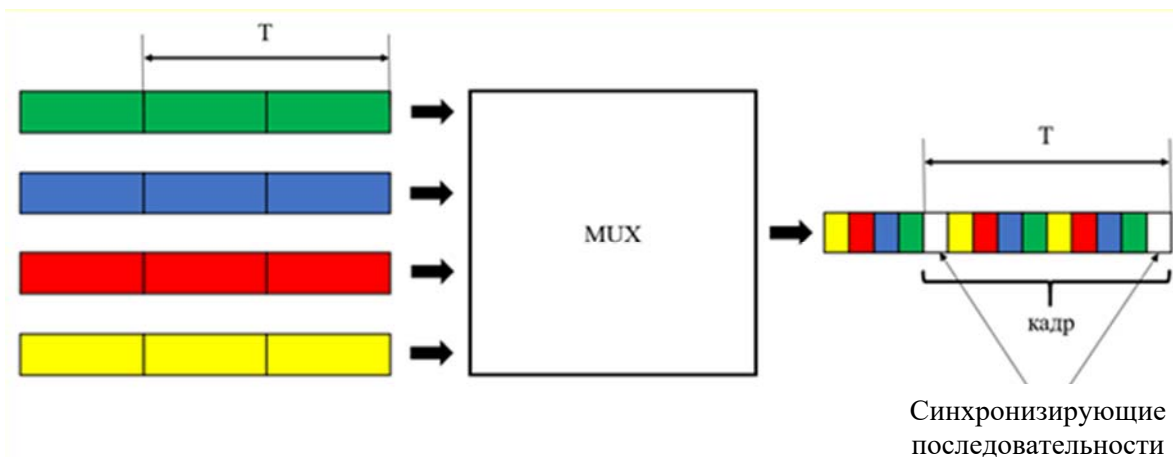


Рисунок 10 – Схематичное изображение TDM-процесса

## TDM

При такой технологии мультиплексирования передача данных разделена на временные интервалы – таймслоты (от англ. timeslot – ячейка времени) фиксированной длины, которые индивидуальны для каждого передающего источника данных. На рисунке 11

представлена схема TDM-системы. Мультиплексор MUX можно представить в качестве «вращающегося переключателя», который вращается с очень высокой скоростью, индивидуально подключая каждый вход к каналу связи на определенный промежуток времени. На выходе за счет демультиплексора DEMUX происходит обратный процесс. Один полный цикл называется кадром. Чтобы убедиться, что каждый канал на входе подключен к соответствующему каналу на выходе, добавляются кадры запуска и остановки для синхронизации входа с выходом [13].

Если мультиплексор назначает каждому каналу временной интервал, равный одному биту, то такая схема называется *битовым перемежением*. В этом случае мультиплексор выполняет роль коммутатора, который последовательно переключается с одного канала на другой без необходимости хранения информации в промежуточной памяти. Также мультиплексор может сразу принять группу битов, составляющих слово или символ, из каждого канала последовательно. Такая схема применяется, когда входящие сигналы ориентированы на символы или слова, а сама схема называется *символьным перемежением*. Эта схема подразумевает использование промежуточной памяти для накопления групп битов из каждого канала.

Если каналы входа имеют различный битрейт, то между битрейтом разных каналов должна существовать фиксированная связь. Длина кадра в таком случае определяется наименьшим общим кратным битрейтов каналов входа (рисунок 12) [32].

Рассмотрим принцип работы TDM-системы при передаче аналоговых сигналов. На рисунке 13 представлено применение TDM-системы для голосовых каналов. На стороне передачи четыре голосовых канала последовательно включаются переключателем, в результате чего появляется последовательность амплитудных выборок. После этого шифратор преобразует выборку в двоичный код, используя какой-либо метод АЦП. Выходной сигнал шифратора представляет собой строку кода, соответствующую информации с каждого канала. Эти голосовые биты комбинируются с фреймовыми битами для синхронизации мультиплексора и демультиплексора и сигнальными битами для управления телефонной связью, после чего происходит передача информации по цифровой линии.

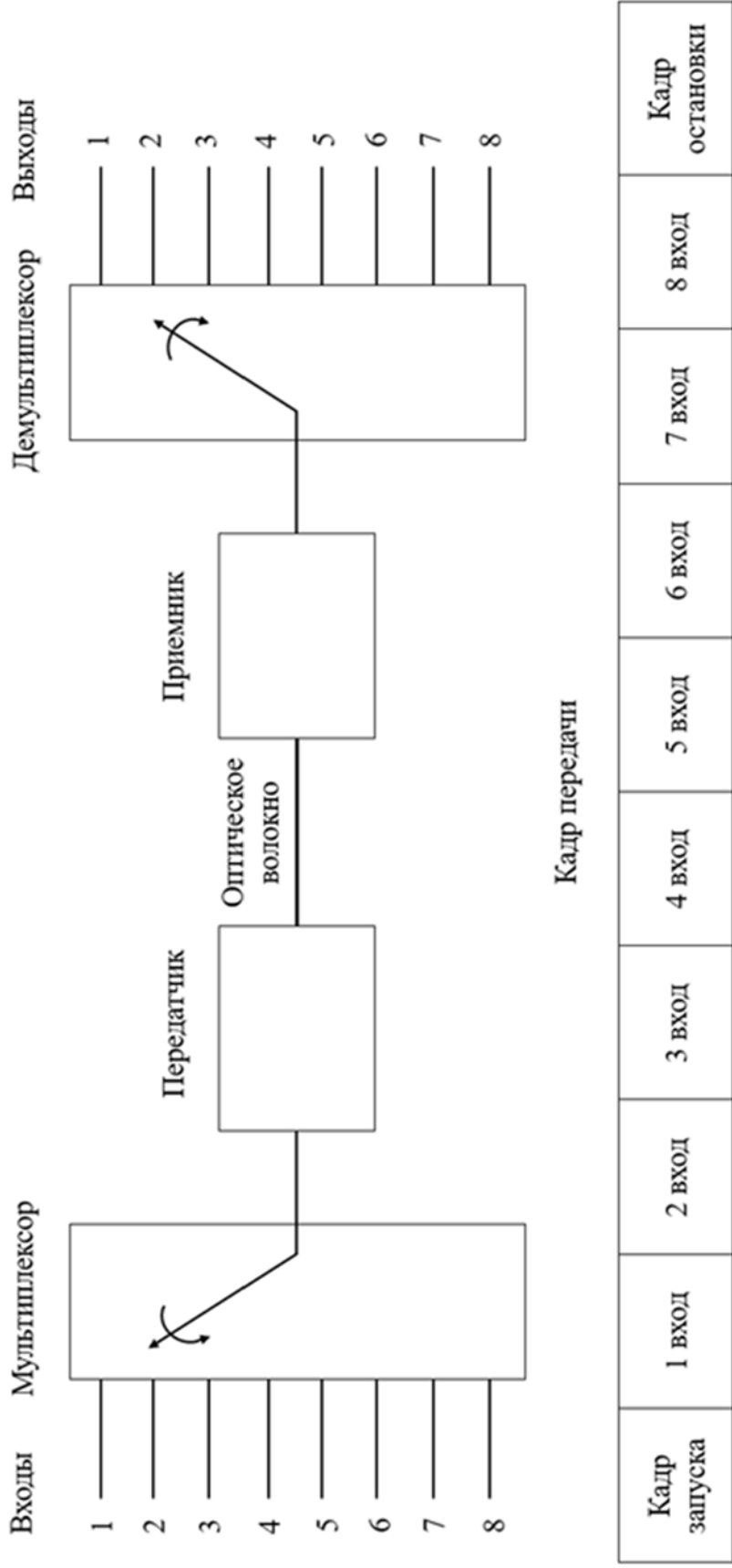


Рисунок 11 – Схема TDM-системы

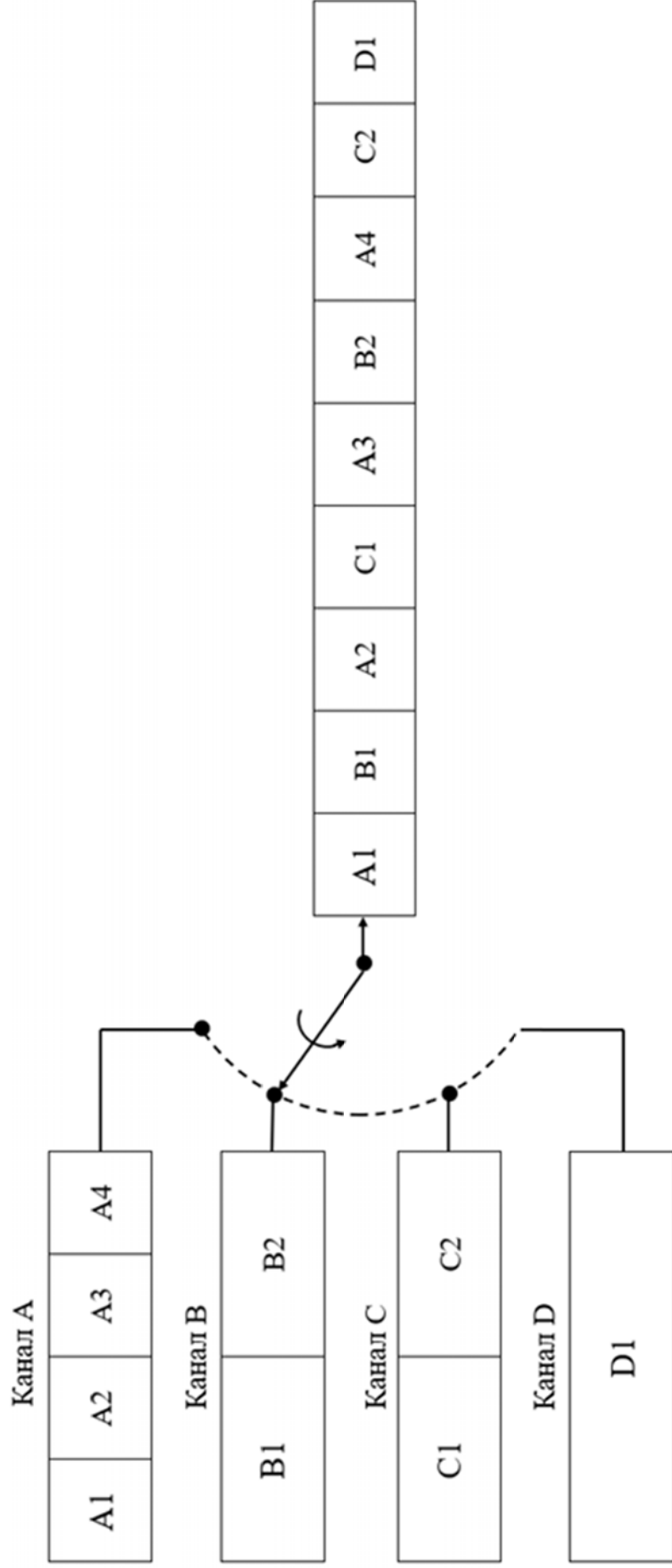


Рисунок 12 – Мультиплексирование каналов с разными битрейтами



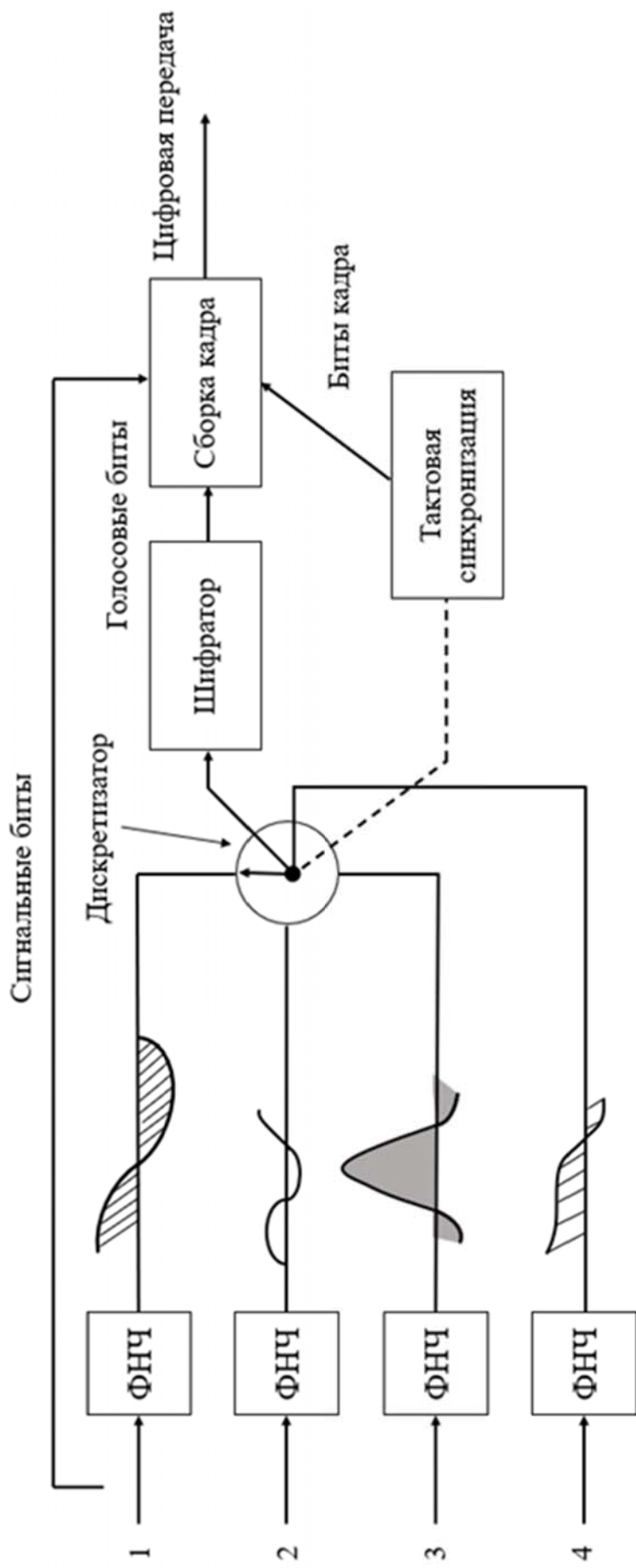


Рисунок 13а – Применение TDM-системы для голосовых каналов: передача

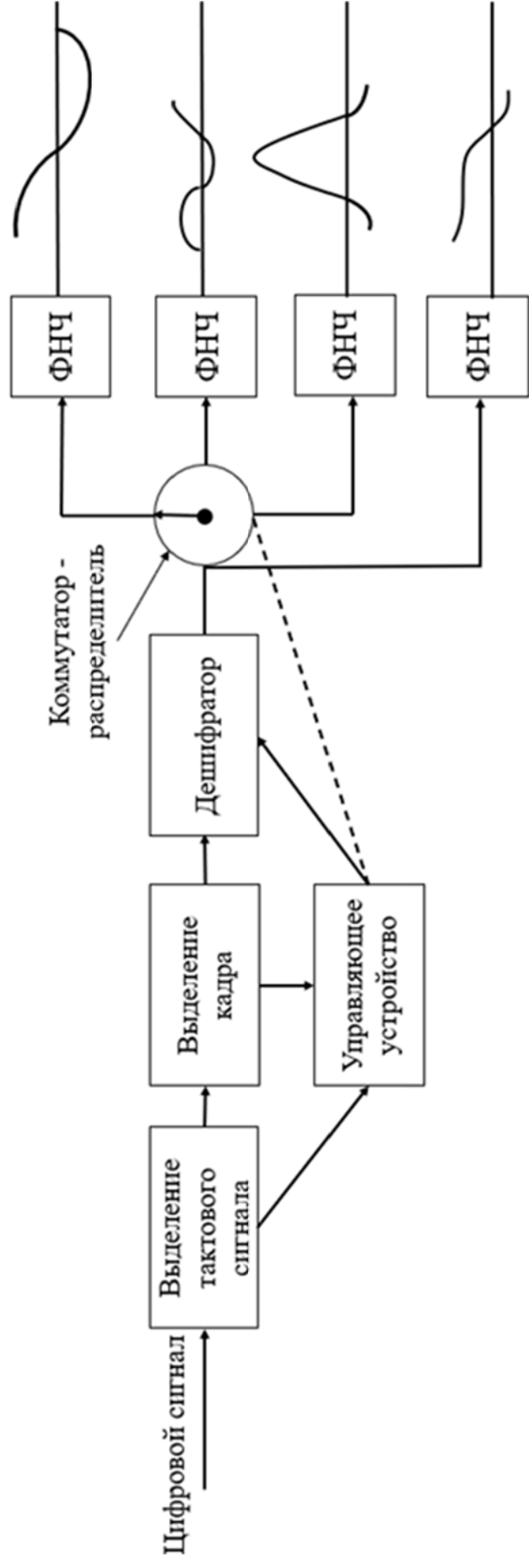


Рисунок 136: Применение TDM-системы для голосовых каналов: прием

На стороне приема осуществляется обратный процесс, и каждая выборка соответствует определенному выходному каналу [14].

TDM-системы можно разделить на категории, которые обеспечивают синхронное и асинхронное взаимодействие с каждым информационным каналом.

### **Синхронное мультиплексирование**

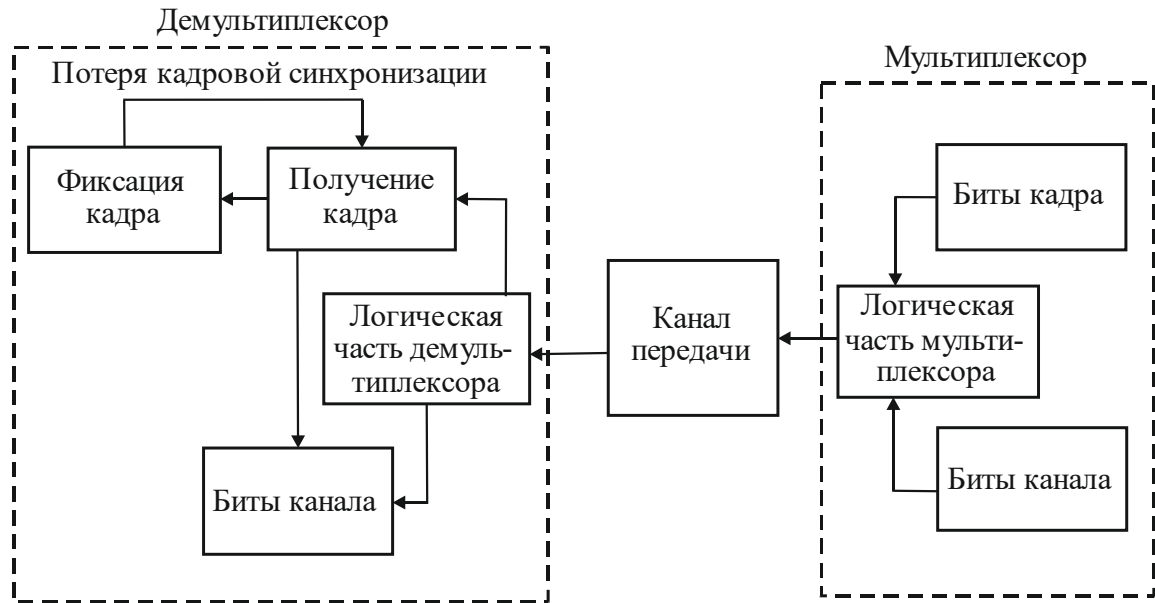
Синхронное мультиплексирование подразумевает, что каждый входной канал взаимодействует с TDM-системой согласованно по времени. В таком случае нет неоднозначности между временем «прибытия» каждого бита входного канала и временем мультиплексирования.

#### *Типы кадровой синхронизации*

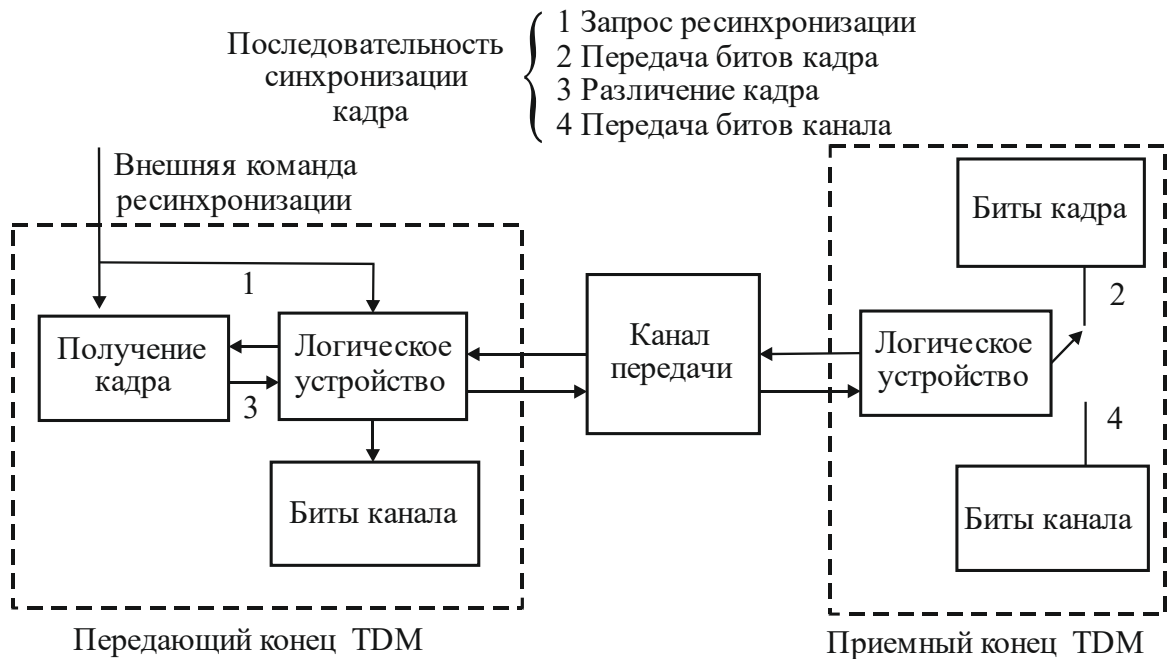
Схема кадровой синхронизации, характерная для большинства TDM-систем, представлена на рисунке 14. Определенный код, сгенерированный битами кадра, перемежается и передается вместе с битами канала. Во время синхронизации кадра демультиплексор последовательно ищет входящий поток битов на предмет совпадения с известным кодом кадра [14]. У такой схемы *прямой кадровой синхронизации* существуют неотъемлемые недостатки: небольшое снижение эффективности передачи из-за наличия служебных сигналов, возможность срабатывания ложной синхронизации кадров из-за случайных данных, совпадающих со служебными сигналами.

Второй тип кадровой синхронизации включает в себя последовательность действий, известных как *квити́рование*. Чтобы инициировать кадровую синхронизацию, запрос для синхронизации передается ближайшим мультиплексором в дальний мультиплексор. Затем сообщение, состоящее полностью из битов кадра, передается обратно в ближайший мультиплексор, пока не будет активирован сигнал распознавания кадра. После чего передача битов кадра прекращается и начинается передача битов канала. Пока поддерживается кадровая синхронизация, никаких дополнительных действий не требуется, однако потеря синхронизации на других уровнях в системе передачи нарушит синхронизацию данного уровня.

При квитировании синхронизация кадра выполняется быстрее, чем в схемах прямого действия, поскольку нет неоднозначности между битами кадра и битами канала. Как только кадр получен, сам мультиплексор не может вызвать случайную потерю синхронизации.



*a*



*б*

Рисунок 14 – Типы кадровой синхронизации:  
*a* – схема прямой кадровой синхронизации;  
*б* – схема квитирования

Тем не менее, если потеря синхронизации происходит по любой другой причине, такой тип кадровой синхронизации должен полагаться на внешнее оборудование, чтобы распознать потерю синхронизации и передать команду ресинхронизации.

### Структура кадров

Биты синхронизации кадра могут быть вставлены по одному (распределенно) или сгруппированно (пакетно) для формирования  $N$ -битового шаблона. На рисунке 15 представлена структура распределенного кадра, в которой биты вставляются по одному в начале или в конце кадра [14].

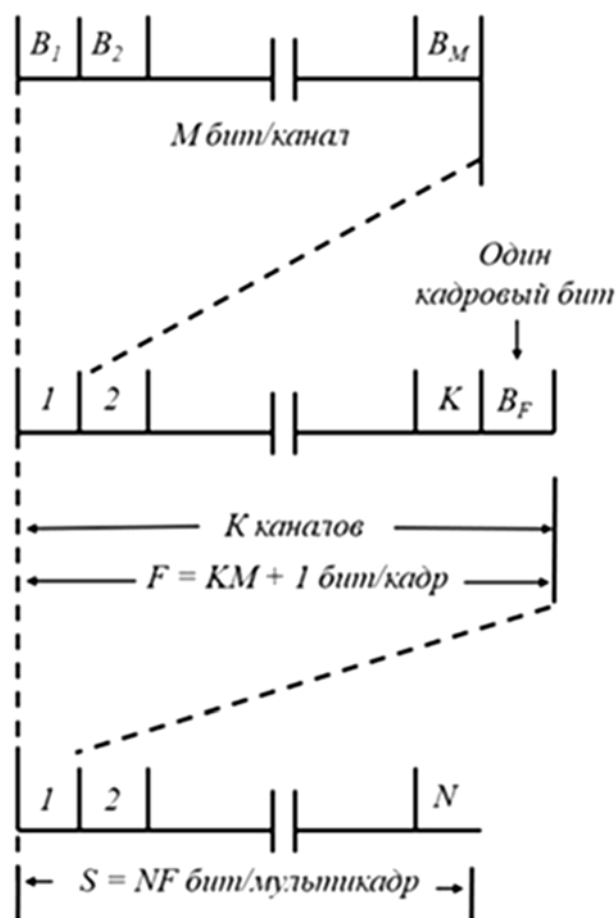


Рисунок 15 – Структура распределенного кадра

Каждый кадр содержит  $M$  битов на каждый из  $K$  каналов плюс один кадровый бит ( $F = (KM + 1)$  битов). Чтобы передать полным  $N$ -битовый шаблон, требуется всего  $NF$  битов передачи, которые образуют мультикадр (иногда называемый суперкадром, или основным кадром). Преимущество распределения битов кадра – невоз-

приимчивость к пакетам ошибок, которые могут возникнуть, например, в радиоканале. Пакет ошибок длиной  $F$  битов может повлиять не более чем на один бит синхронизации, а не на несколько или все биты кадра. Недостатком распределенной структуры кадров является дополнительное время, необходимое для получения синхронизации кадров по сравнению со структурой сгруппированных кадров. Примером мультиплексора, который использует структуру распределенного кадра, является 24-канальный мультиплексор РСМ, определенный ITU-T Rec. G.733 [4].

На рисунке 16 показана структура сгруппированного кадра, где  $N$ -битовый код кадра появляется как непрерывные биты в начале или конце мультикадра [14].

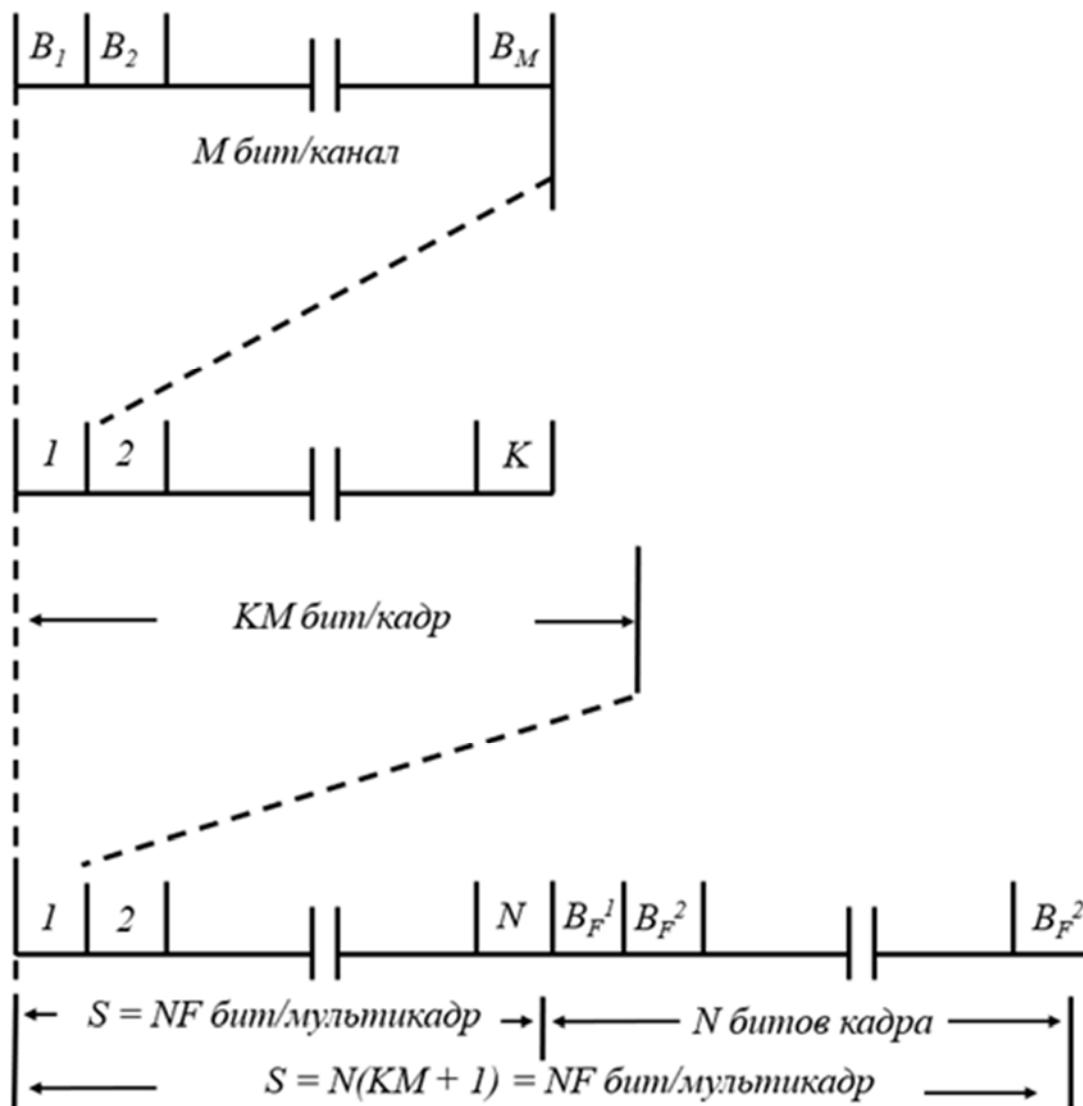


Рисунок 16 – Структура сгруппированного кадра

Стоит отметить, что общая длина мультикадра равна  $NF$  битам, так что отношение битов кадра к общему количеству битов на один кадр идентично таковому у распределенного кадра. Преимущество сгруппированного кадра состоит в том, что меньше времени требуется для синхронизации кадра по сравнению со временем, требуемым для распределенного кадра. Один из недостатков заключается в том, что пакеты ошибок могут влиять на большую часть или всю конкретную  $N$ -битную комбинацию. Мультиплексор РСМ со скоростью 2,048 Мбит/с и мультиплексор второго уровня со скоростью 8,448 Мбит/с, рекомендованные ITU-T Recs. G.732 и G.742 соответственно, являются примерами мультиплексоров, использующих структуру сгруппированных кадров [33]. Эти два определения структуры кадра представляют две крайности организации кадра. На практике TDM может использовать комбинацию двух типов при организации структуры кадра, например мультиплексор второго уровня со скоростью 6312 Мбит/с, рекомендованный ITU-T Recs. G.743 [33].

#### *Режимы кадровой синхронизации*

В схемах кадровой синхронизации TDM обычно используются два режима работы: начальный режим, называемый режимом поиска кадра, или режимом получения кадра, в котором выполняется поиск по всем битам кадра, пока не произойдет обнаружение; захват кадра объявляется, когда позиция выравнивания кадра кандидата соответствует указанному критерию приемлемости, основанному на корреляции с известным шаблоном кадра. При обнаружении схема синхронизации кадров переключается на второй режим работы, называемый режимом поддержания кадра, который непрерывно отслеживает корреляцию между принятым шаблоном формирования кадров и ожидаемым шаблоном кадров. Если режим поддержания кадра обнаруживает потерю синхронизации, на что указывает потеря требуемой корреляции, объявляется потеря синхронизации кадров и снова включается режим поиска. Третий, а иногда и четвертый режим кадровой синхронизации используется как промежуточный режим между поиском и поддержанием. В общем, эти дополнительные режимы лишь незначительно повышают производительность синхронизации кадров [34, 35]. На рисунке 17

представлена диаграмма изменения состояния двухрежимной кадровой синхронизации [14].

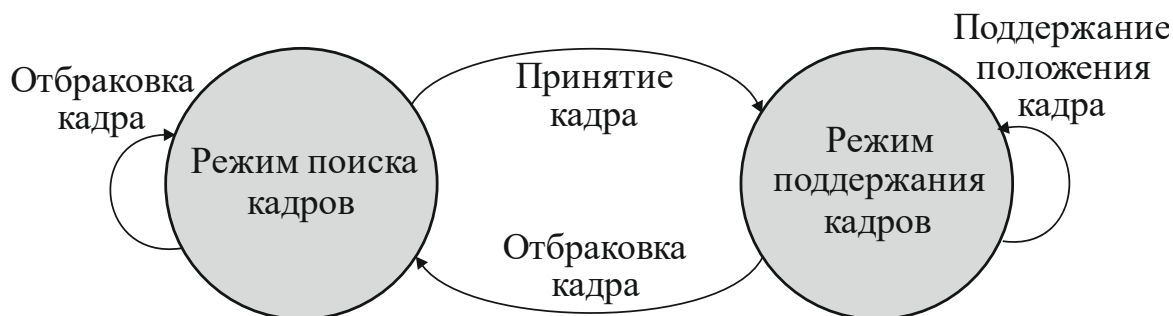


Рисунок 17 – Диаграмма изменения состояния двухрежимной кадровой синхронизации

Производительность кадровой синхронизации характеризуется следующими показателями:

- временем для получения начальной синхронизации или временем получения кадра;
- временем, в течение которого поддерживается синхронизация кадра;
- временем повторного получения кадровой синхронизации после потери синхронизации.

#### *Режим поиска кадра*

Режим поиска обеспечивает последовательный поиск, сравнивая каждую позицию выравнивания кадра кандидата с известным шаблоном кадра, пока не будет найдено надлежащее совпадение. Для распределенной структуры кадра каждая позиция кандидата сканируется по одному биту с интервалами  $F$  битов до  $N$  раз, где  $F$  – длина кадра, а  $N$  – количество кадров в шаблоне. Для структуры сгруппированных кадров каждый кандидат сканируется путем проверки последних  $N$  битов. Эту операцию режима поиска удобно описать в терминах набора состояний (позиций кандидатов) и вероятностей переходов между этими состояниями (вероятности принятия / отклонения), как показано на рисунке 18 [14]. Таким образом, существуют четыре вероятности перехода [36].



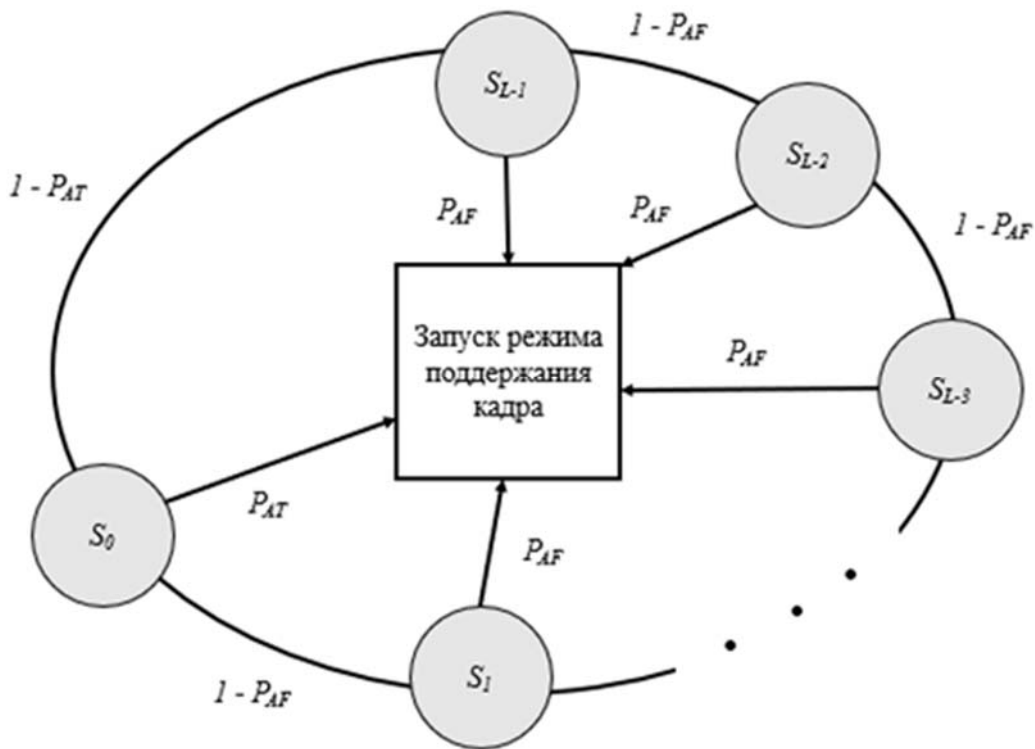


Рисунок 18 – Диаграмма состояния режима поиска кадра

### *Режим поддержания кадра*

Существуют две наиболее используемые схемы для режима поддержания кадра. В обеих схемах каждый шаблон кадра сначала проверяется по критерию «годен / не годен», аналогичному или идентичному критерию принятия / отклонения, используемому в режиме поиска. Любая схема должна уметь распознавать фактическую потерю выравнивания кадров и инициировать повторное получение кадра. Однако если бы использовалась схема режима поддержания кадра, которая отклоняла позицию кадра на основе одного неудачного теста, время для поддержания истинной кадровой синхронизации, вероятно, было бы неприемлемо малым при наличии ошибок передачи битов. По этой причине критерий отклонения режима поддержания основан на сравнении нескольких шаблонов кадров, что снижает вероятность непреднамеренной потери синхронизации кадров. В первой схеме требуется, чтобы  $r$  последовательных тестов завершились неудачей до того, как будет запущен режим поиска. Вторая схема основана на реверсивном счетчике (рисунок 19), который изначально установлен на максимальное значение  $(M + 1)$  [14].

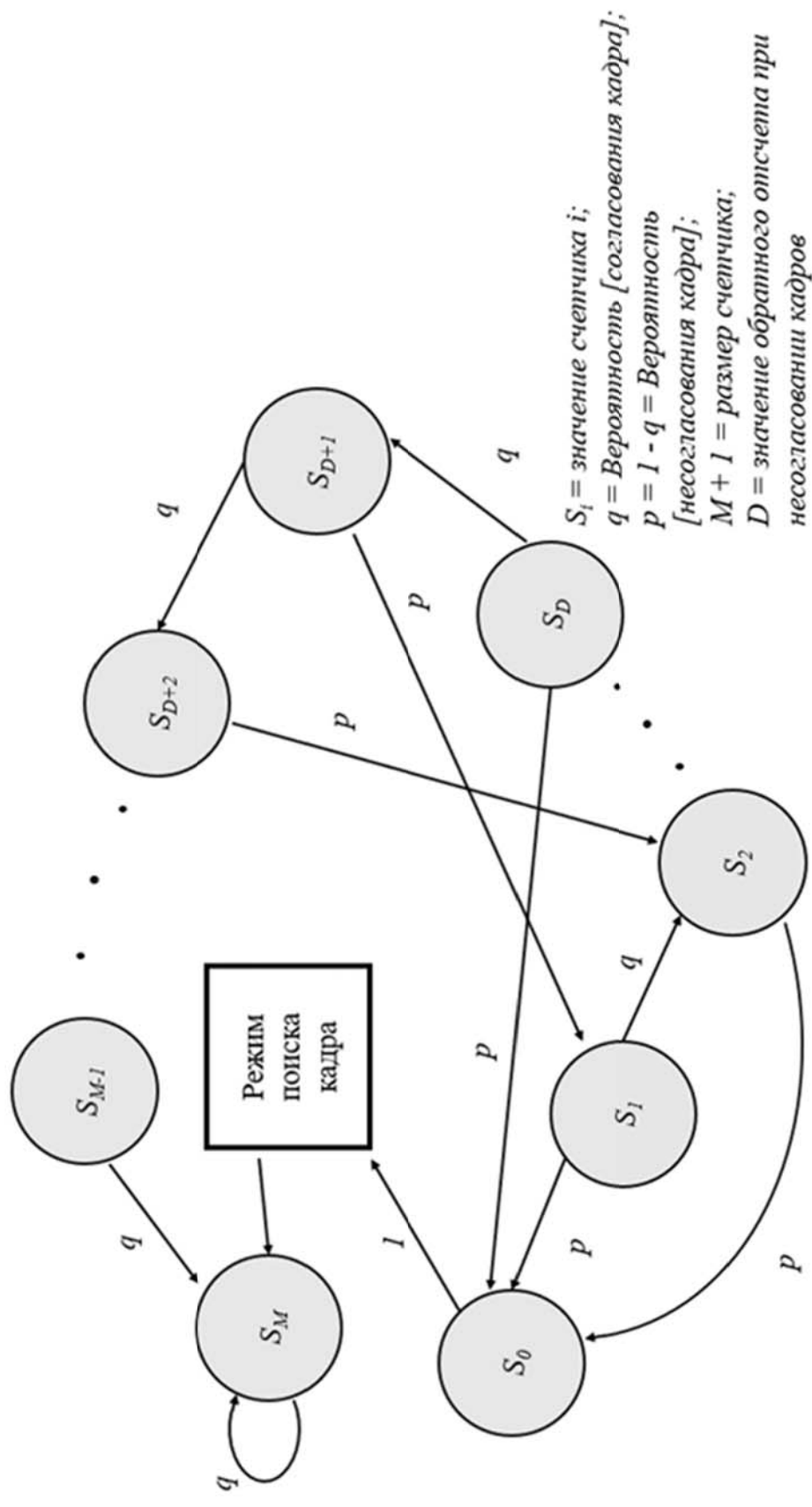


Рисунок 19 – Диаграмма состояния режима поддержания кадра с использованием реверсивного счетчика

Для каждого теста принятого шаблона кадра согласие приводит к приращению 1, а несогласование приводит к уменьшению  $D$ . Объявляется потеря кадра и запускается режим поиска, если счетчик достигает своего минимального (нулевого) состояния.

Этот рисунок показывает, что если значение счетчика находится в пределах  $D$  отсчетов от нуля, то счетчик переходит в состояние ноль, когда возникает несогласование кадров. Точно так же, если счетчик уже на своем максимальном значении, последующие соглашения кадра оставляют счетчик на его максимальном значении. Как только счетчик достигает своего нулевого состояния, активизируется режим поиска кадра. В общем, вычисление количества тестов  $n$ , необходимых для достижения нулевого состояния, сложно и требует применения численных методов.

## 2.2 Асинхронное мультиплексирование

Метод асинхронного мультиплексирования привлекателен тем, что одновременно может поддерживать передачу голоса, видео и других данных на разных скоростях и с использованием множества протоколов [37]. В отличие от TDM асинхронное мультиплексирование не связывает пользователя с конкретным временным интервалом. В каждый момент времени для передаваемых данных доступно фиксированное количество ячеек, но принадлежность той или иной ячейки конкретному пользователю определяется заголовком ячейки, а не позицией временного интервала. При асинхронном мультиплексировании приписывание таймслотов происходит более свободным образом (по требованию).

Когда каждый цифровой источник имеет свой собственный тактовый сигнал, обмен данных с TDM-системой называется асинхронным. Если каждый источник формирует данные и передает их со скоростью, близкой по синхронизации с TDM, то такое подключение называется *плеззиосинхронным*. В любом случае небольшие различия в тактовом сигнале источника данных и TDM-системы возникают в результате неточностей и нестабильности тактовых генераторов.

Для восстановления синхронизации используется метод *выравнивания* (от англ. *bit stuffing, pulse stuffing*). На рисунке 20 представлена схема мультиплексирования с использованием выравнивания [14].

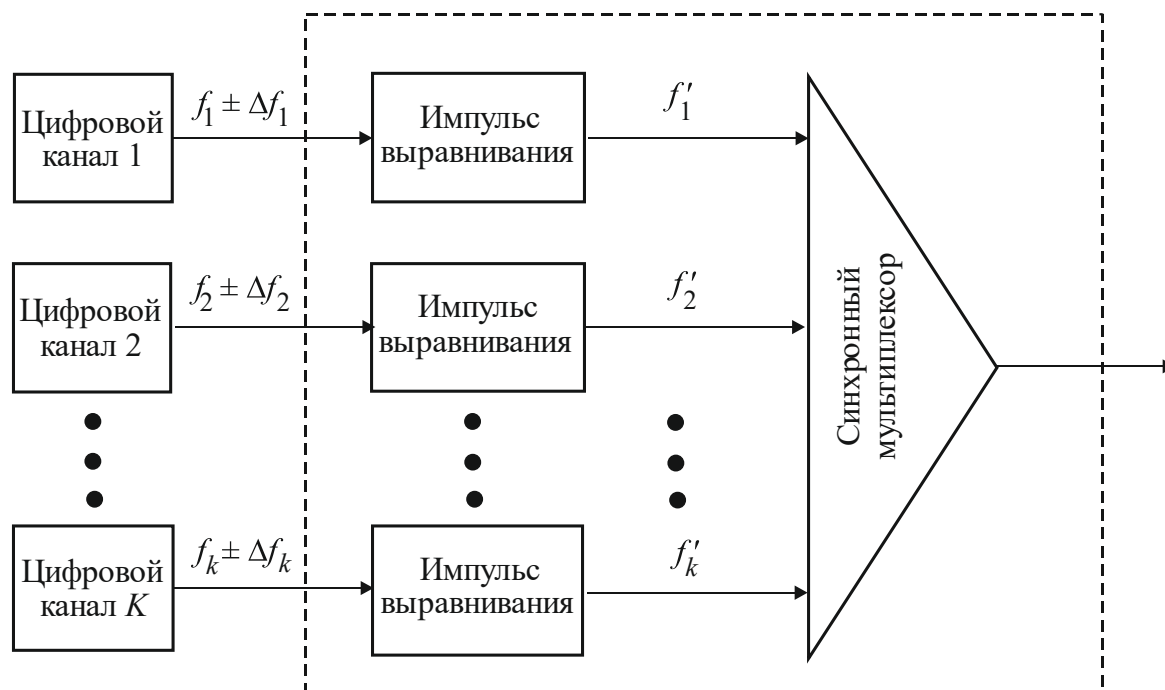


Рисунок 20 – Схема мультиплексирования с использованием выравнивания

Каждый цифровой источник синхронизируется с некоторой тактовой частотой  $f_i$ , которая находится в диапазоне  $f_i \pm \Delta f_i$ , где допуск  $\Delta f_i$  зависит от параметров тактового генератора, но обычно для битрейтов 1,544 или 2,048 Мбит/с не превышает  $5 \cdot 10^{-5}$  Гц. TDM-система должна принимать разные битрейты с каждого источника и синхронизировать их с тактовой частотой TDM-системы. Как показано на рисунке 20, метод выравнивания, или дословно «вставки импульсов/битов», обеспечивает преобразование частоты  $f_i$  в  $f'_i$  для последующего синхронного мультиплексирования. Два обычно применяемых метода для выполнения этого синхронного преобразования – это положительное выравнивание и положительно-отрицательное выравнивание [14].

### *Положительное выравнивание*

Положительное выравнивание может использоваться для синхронизации нескольких каналов перед мультиплексированием или для согласования двух отдельных каналов друг за другом.

При положительном выравнивании тактовая частота каждого входного канала  $f_i$  выравнивается с тактовой частотой TDM-системы  $f_i'$ , которая выше максимально возможной частоты входного канала  $f_i + \Delta f_i$ . На рисунках 21 и 22 изображены типичные структурные схемы передающего и принимающего модулей TDM-системы с положительным выравниванием [14].

Биты входного канала записываются в *буфер с регулируемой задержкой сигналов* с тактовой частотой  $f_i$  и считываются из буфера с тактовой частотой  $f_i'$ . Поскольку частота  $f_i'$  немного выше частоты  $f_i$ , существует вероятность опустошения буфера. Для того чтобы этого избежать, заполнение буфера отслеживается и сравнивается с пороговым значением. При достижении порогового значения отправляется запрос на вставку пустого бита, и в следующий удобный момент для вставки такты считывания приостанавливаются, позволяя вставить бит (или биты) в назначенный временной интервал в синхронном канале в то время, как асинхронный канал продолжает заполнять буфер. Точное положение заполненного временного интервала кодируется в *канале передачи заголовков* и передается на принимающую сторону (демультиплексор) TDM-системы.

Принятые биты также записываются в буфер с регулируемой задержкой сигналов, но биты заполнения не могут попасть в буфер по каналу передачи заголовков. На принимающей стороне дополнительные биты удаляются, чтобы вернуть потоки битов к их первоначальным битрейтам.

Зависимость по синхронизации между асинхронным входным каналом и синхронным каналом TDM-системы представлена на рисунке 23. Типичная разница частот на рисунке преувеличена. Каждый бит синхронного выходного сигнала имеет период, составляющий четыре пятых периода асинхронного входного сигнала.

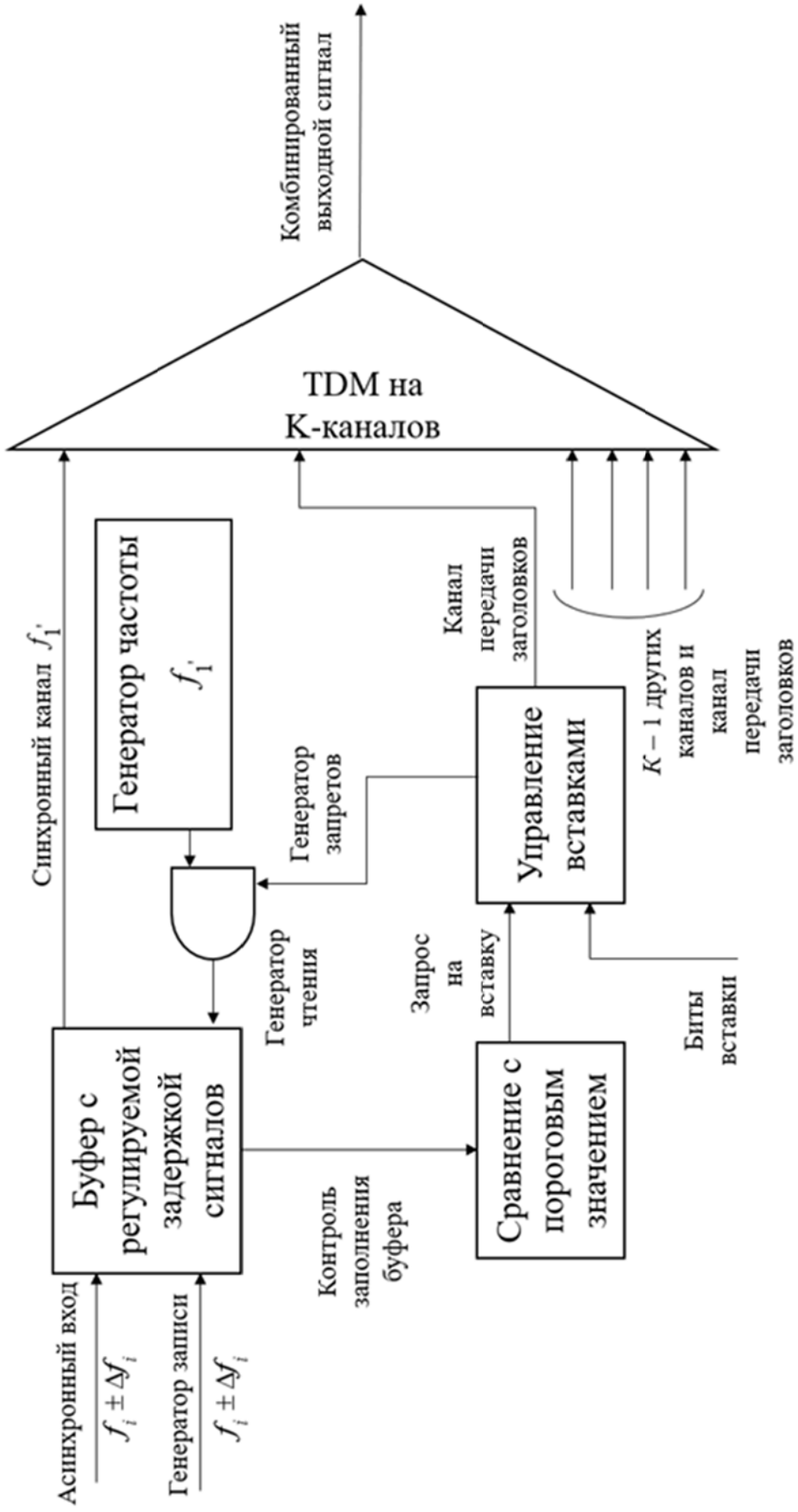


Рисунок 21 – Структурная схема мультиплексора с положительным выравниванием

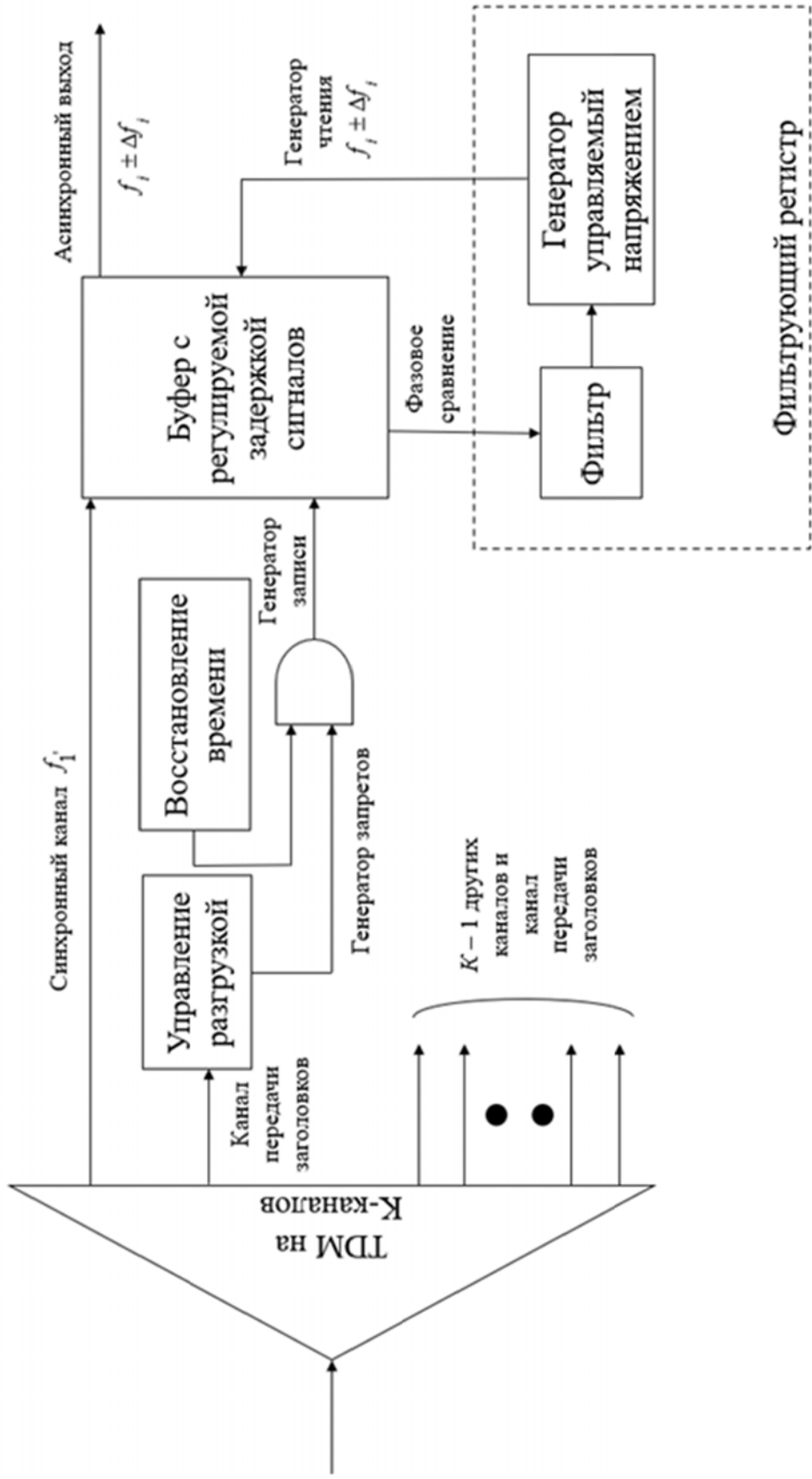


Рисунок 22 – Структурная схема демультиплексора с положительным выравниванием

В таком случае скорость вывода в 1,25 раза больше скорости ввода данных. Каждый пятый бит синхронного вывода преобразуется в фиктивный бит заполнения. Из-за разницы в скорости фаза выходного сигнала линейно увеличивается по отношению к входному сигналу. Когда разность фаз накапливается до 1 бита, фаза сбрасывается путем вставки фиктивного бита в выходной сигнал синхронного канала [14].

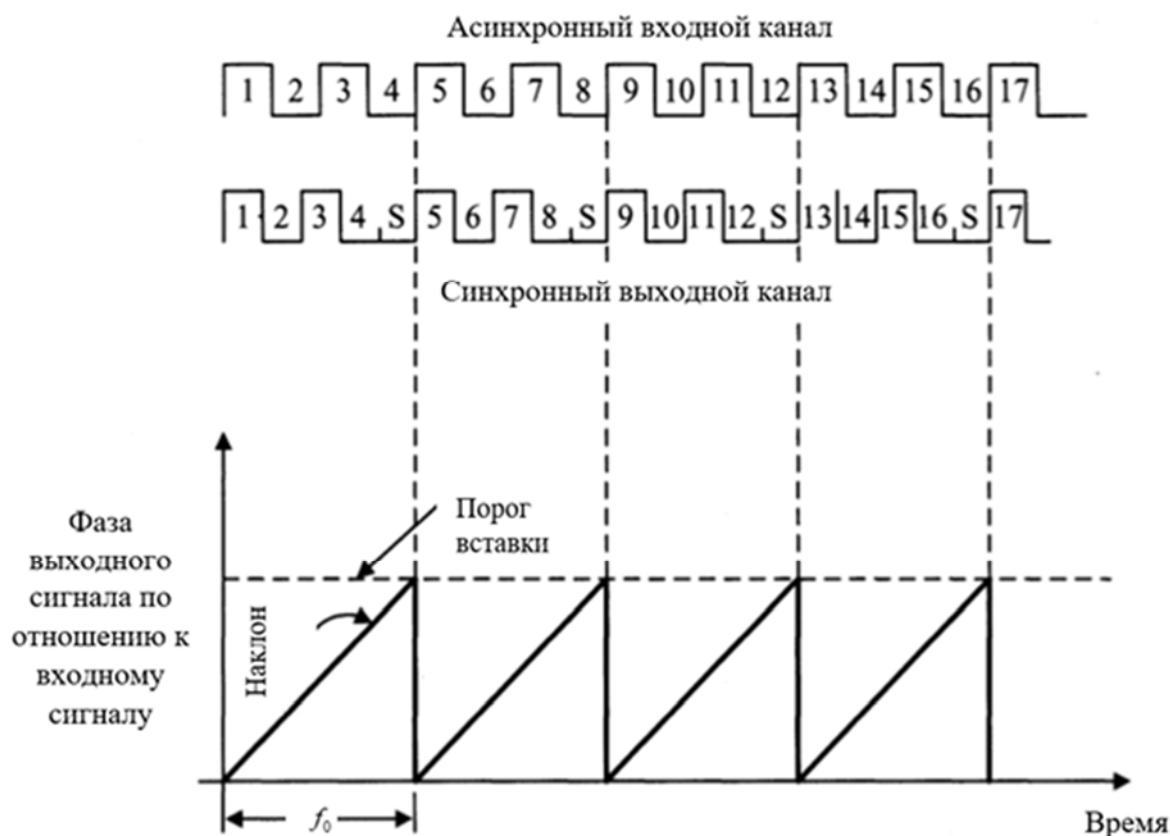


Рисунок 23 – Временная зависимость асинхронного/синхронного каналов при положительном выравнивании

### *Положительно-отрицательное выравнивание*

При таком способе тактовая частота входного канала  $f_i$  синхронизируется с тактовой частотой канала TDM. Отличием от положительного выравнивания служит то, что содержимое буфера может исчерпаться. Если битрейт входного канала ниже, чем скорость канала мультиплексора, то буфер имеет тенденцию к истощению, и тогда происходит процесс положительного выравнивания. Если битрейт входного канала выше, то информационные биты



вычитаются из входного канала и передаются по каналу передачи заголовков.

Несмотря на то что положительное выравнивание используется в большинстве мультиплексоров, также существуют стандартизованные ITU-T-схемы положительного-нулевого-отрицательного выравнивания [33].

## 2.3 WDM-мультиплексирование

При мультиплексировании с разделением по длине волны данные с каждого канала передаются на своей длине волны. При использовании разной длины волны для каждого канала данные могут передаваться без помех по одному и тому же оптоволокну. Эта технология применяется для многократного увеличения пропускной способности ВОСП [4]. Сигналы с разных источников объединяются мультиплексором и вводятся в оптическое волокно одновременно, а не разделяются, и пересылаются по временным интервалам. Затем объединенные каналы разделяются в приемном блоке демультиплексором и регистрируются фотоприемником [39].

Первые устройства WDM появились в начале 90-х годов XX века. В основном это были широкополосные двухканальные системы с длинами волн 1310 нм и 1550 нм. В дальнейшем по мере всё большего освоения окна прозрачности 1550 нм появляются прецизионные узкополосные WDM-устройства с мультиплексируемыми длинами волн, полностью лежащими в окне прозрачности 1550 нм. Это позволило строить на волокне протяжённые магистрали с множеством каналов. Катализатором прогресса стали оптические усилители. Практически вся рабочая область длин волн (1530–1560 нм), в которой усилитель имеет достаточно высокий коэффициент усиления и приемлемое соотношение сигнал-шум (SNR – *Signal to Noise Ratio*), отводится в распоряжение систем спектрального уплотнения.

Плотное мультиплексирование с разделением по длине волны (DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing*) является развитием технологии WDM и позволяет передавать информацию с

нескольких каналов на разных близкорасположенных длинах волн по одному и тому же волокну.

Для каждой длины волны  $\lambda$  и соответствующей частоты  $f$  ITU определяет стандартный частотный интервал в 100 ГГц. Современные коммерческие DWDM-системы используют частотный интервал 50 или даже 25 ГГц.

Мультиплексорам DWDM (в отличие от более традиционных WDM) присущи две отличительные черты:

- малые интервалы  $\Delta\lambda$  между мультиплексными каналами (1,6–0,8 или 0,4 нм);
- использование только одного окна прозрачности 1550 нм в пределах области усиления оптического усилителя (1530–1560 нм) [41].

Простейшая схема WDM-системы представлена на рисунке 24 [13].

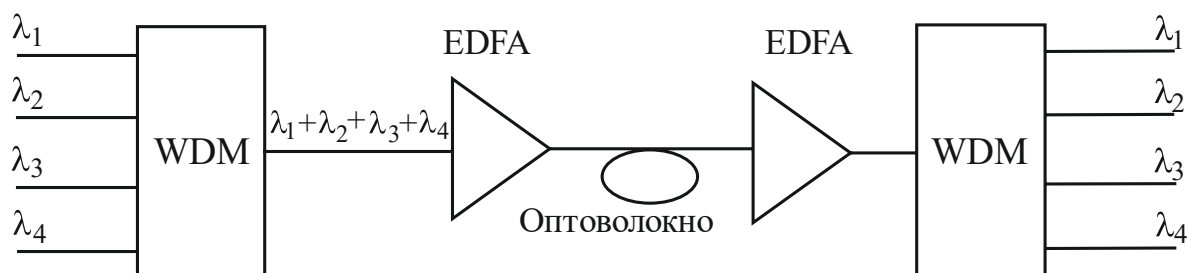


Рисунок 24 – Простейшая схема WDM-системы

Несмотря на стремительное развитие оптической связи и появление цифровой иерархии следующего поколения (NG-SDH – *Next Generation Synchronous Digital Hierarchy*), гигабитно-пассивной оптической сети (G-PON – *Gigabit-Passive Optical Network*), все еще существует потребность в высокоэффективных быстрых сетях, которые могут использовать существующие оптоволоконные линии. Для этой цели необходимо увеличение скорости передачи данных путем использования различных методов мультиплексирования, в частности WDM и оптического мультиплексирования с разделением по времени (OTDM – *Optical Time Division Multiplexing*), а также гибридной системы WDM/OTDM [40].

Тем не менее существует множество проблем в WDM-системах. К ним относят перекрестные взаимодействия и нелинейные

эффекты. Также серьезной проблемой является управление дисперсией. В связи с этим возможно использование OTDM и гибридных систем [14].

## 2.4 OTDM-мультиплексирование

Оптическое мультиплексирование с разделением по времени – это метод высокоскоростной генерации данных за пределами ограничений полосы пропускания электроники. В этой технологии разные потоки оптических импульсов, исходящие от одного и того же лазера (с одинаковой длиной волны), кодируются электрически генерируемыми сигналами данных.

Технология OTDM позволяет увеличить скорость передачи данных одной оптической несущей до значений выше 1 Тбит/с. Технология OTDM широко изучалась в течение 1990-х годов, и в последние годы продолжаются дальнейшие исследования в контексте появления WDM-систем со скоростью передачи данных более 100 Гбит/с [9].

Преимущество OTDM-системы состоит в том, чтобы объединить множество оптических данных с базовой скоростью передачи данных  $B$  во временной области для получения более высокой связанной скорости передачи данных  $N \times B$ , где  $N$  – количество каналов [43].

На рисунке 25 представлена структурная схема OTDM-системы на  $N$  каналах. Последовательность оптических импульсов от лазерного диода делится на  $N$  путей. В каждом канале последовательность импульсов индивидуально модулируется, создавая  $N$  каналов данных в формате RZ (*Return to Zero* от англ. код с возвращением к нулю) [14].

Передатчик OTDM использует формат модуляции RZ вместо NRZ (*Non Return to Zero*), потому что энергия импульсов RZ сосредоточена в меньшем временном интервале, чем период битов. Чтобы избежать помех между каналами, лазерный источник должен генерировать оптические импульсы длительностью меньше чем  $1/N$  периода синхронизации [44].

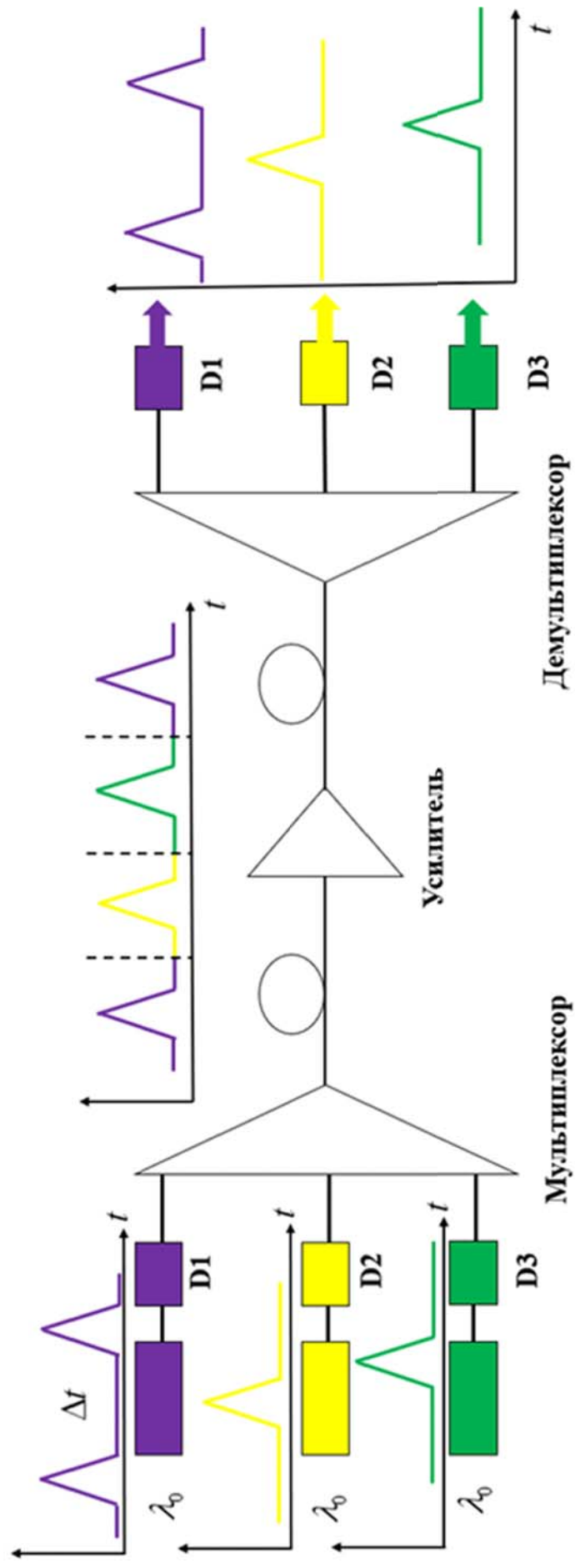


Рисунок 25 – Структурная схема OTDM-системы

### *Производительность OTDM-систем*

Во многих лабораториях была реализована высокоскоростная передача данных с использованием технологии OTDM. В эксперименте 1996 г. 100 Гбит/с OTDM-сигнал, состоящий из 16 каналов, со скоростью 6,3 Гбит/с передавался на расстояние 560 км с использованием оптических усилителей. Позже общая скорость передачи данных была увеличена до 400 Гбит/с (40 каналов по 10 Гбит/с) за счет использования импульсов суперконтинуума длительностью 1 пс [45]. Передача OTDM со скоростью 160 Гбит/с привлекла значительное внимание после 2000 г., поскольку считалась естественным обновлением для систем со скоростью 40 Гбит/с. В ходе испытаний 2001 г. OTDM-сигнал со скоростью 160 Гбит/с передавался на расстояние 116 км [46]. В эксперименте 2000 г. сигнал OTDM со скоростью 1,28 Тбит/с мог передаваться на расстояние более 70 км, но для этого требовалась одновременная компенсация дисперсий второго, третьего и четвертого порядков [47].

Простой способ реализации высоких скоростей передачи данных, превышающих 1 Тбит/с, состоит из комбинирования методов OTDM и WDM. В исследовании 1999 г. этот подход использовался для реализации скорости передачи 3 Тбит/с. Каналы были разнесены на 450 ГГц друг от друга, чтобы избежать перекрытия между соседними каналами WDM [48]. Скорость передачи данных OTDM была увеличена до 320 Гбит/с в эксперименте 2004 г., в ходе которого было передано 10 таких каналов на ограниченное расстояние в 40 км [49]. К 2009 г. пять каналов, каждый со скоростью 320 Гбит/с, передавались на расстояние 525 км с использованием метода оптического преобразования Фурье во временной области [50]. При использовании новых форматов модуляции общая пропускная способность систем WDM/OTDM должна превышать 10 Тбит/с. Однако многие факторы, такие как различные нелинейные эффекты в волокнах и практическая компенсация дисперсии в широкой полосе частот, вероятно, ограничат производительность таких систем.

С продолжающимся переходом от современного «Интернета информации» к «Интернету вещей», в рамках которого миллиарды интеллектуальных устройств будут постоянно обмениваться ин-

формацией, ожидается, что трафик между машинами вскоре может опередить трафик данных, генерируемый людьми. На этом фоне возникает вопрос, как долго нынешние сетевые технологии, основанные в основном на стандартных SMF, могут справиться с таким ростом трафика [51]. В связи с этим появляется потребность находить новые технические решения для того, чтобы справиться с растущими объемами передаваемой информации.

## 2.5 SDM-мультиплексирование

За время развития оптоволоконной передачи данных инженеры и ученые научились почти полностью использовать доступные электрические и оптические ресурсы во временной области с точки зрения скорости передачи информации (TDM), в частотной области с точки зрения полосы пропускания (WDM, DWDM). В этом смысле мультиплексирование с пространственным разделением каналов (SDM – *Space Division Multiplexing*) считается последним рубежом для решения постоянно растущей потребности в пропускной способности оптических сетей [52].

В последние годы ведутся работы по использованию многомодовых волокон (MMF – *MultiMode Fiber*) [53, 54], а также волокон, которые содержат несколько сердцевин [55, 56]. SDM является общим термином для мультиплексирования с разделением по сердцевинам и/или по модам. Использование «пространства» – это полностью новая концепция, которая проявляется в современных коммерческих продуктах в виде мультиплексирования с разделением по поляризации (PDM – *Polarization Division Multiplexing*) в когерентных оптических системах связи, где два состояния ортогональной поляризации световой волны составляют две основные моды, которые могут распространяться по классическому SMF. MMF может поддерживать более ста мод, что создает большие трудности для получения и обработки оптического сигнала. Маломодовое волокно (FMF – *Few Mode Fiber*) поддерживает небольшое количество мод, поэтому по сравнению с MMF оно имеет потенциал для значительного уменьшения сложности системы. Также FMF имеет преимущество по селективности и управлению модовыми искажениями [57].

Тем не менее, чтобы сделать SDM более привлекательным для коммерческого использования, этот метод мультиплексирования должен обеспечивать значительные преимущества с точки зрения стоимости на один бит передаваемой информации. Кроме того, внедрение этой технологии должно обеспечиваться плавной заменой уже существующих оптических сетей, в которых SMF, однажды уже проложенные в земле или под водой, являются наиболее сложной и дорогой частью в плане замены.

### *Характеристики SDM-волокон*

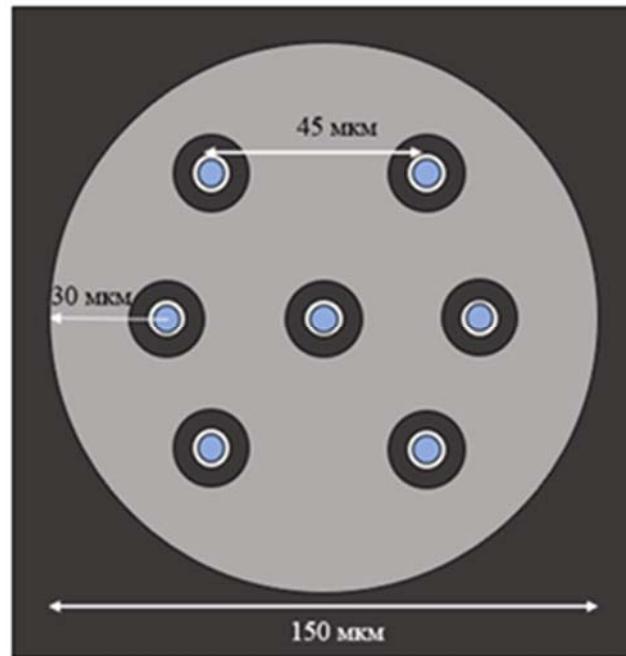
SDM основано на включении нескольких независимых каналов передачи в общее «пространство», которое до этого было зарезервировано для одного канала. Эти каналы состоят из сердцевин в случае MCF, мод в случае FMF и их комбинации (FM-MCF) [58, 59].

Интеграция параллельных каналов передачи приводит к возникновению перекрестных помех между каналами. Такая связь между каналами передачи может быть выгодно использована для уменьшения разброса групповой задержки между модами [60], но увеличивает сложность приемника из-за необходимости применения техники цифровой обработки сигнала множественного ввода – вывода (MIMO – *Multiple Input Multiple Output*) [61].

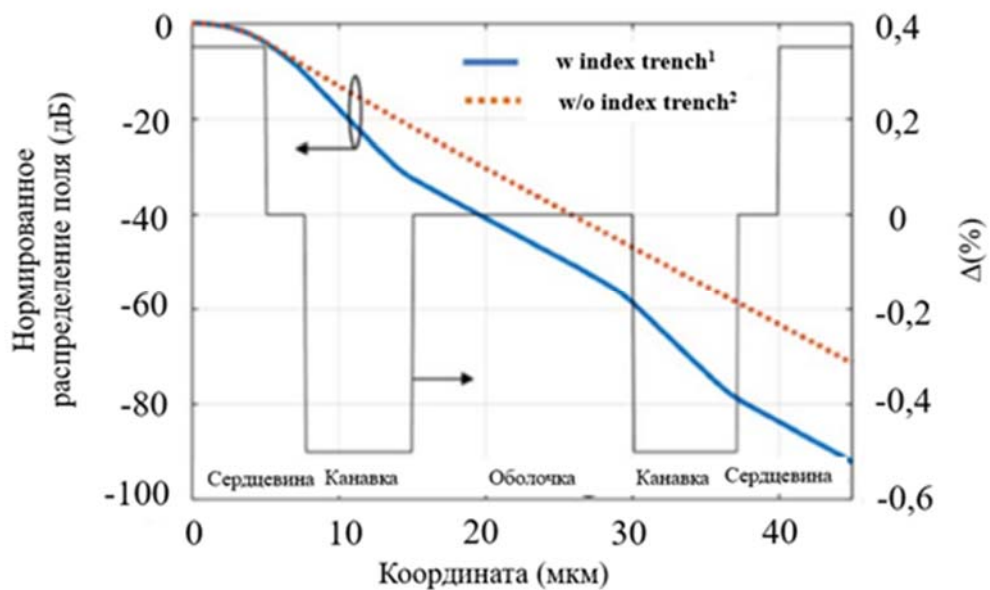
С другой стороны, в MCF гораздо проще контролировать степень связи или перекрестных помех с помощью конструкции волокна. В большинстве случаев информацию с каналов передачи можно обрабатывать независимо без использования MIMO до тех пор, пока перекрестная связь остается ниже определенного порога, который зависит от формата модуляции, например менее минус 23 дБ для сигналов 16 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation* – квадратурная модуляция) для сохранения SNR ниже 1 дБ при коэффициенте ошибок по битам (BER – *Bit Error Ratio*) 0,001 [62].

На рисунке 26,а представлена конструкция волокна с наличием канавок [68], оказавшаяся наиболее эффективной в снижении перекрестных помех. Как показано на рисунке 26,б для такой конструкции напряженность поля в соседней сердцевине снижается примерно на 20 дБ при использовании канавки с показателем преломления, отличным от единицы [51].

Применение такого МСФ, состоящего из 7 сердцевин (см. рисунок 26,*а*), в 2011 г. позволило осуществить передачу данных на скорости, превышающей 100 Тбит/с [63].



*а*



*б*

<sup>1</sup>показатель преломления канавки отличен от единицы

<sup>2</sup>показатель преломления канавки равен единице

Рисунок 26 – Поперечное сечение МСФ, состоящей из 7 сердцевин (*а*); нормированное распределение поля основной моды (жирные сплошные и пунктирные линии) и профиль относительного показателя преломления (тонкая черная линия) (*б*)



После этого развитие шло по пути увеличения количества сердцевин. В начале 2012 г. сообщалось о 19-сердцевинном MCF, способным передать данные со скоростью 305 Тбит/с [64].

К концу 2012 г. были достигнуты результаты, превышающие 1 Пбит/с [65], с использованием 12-сердцевинного MCF, в каждой сердцевине которого передавалось 222 канала WDM-сигнала с PDM и 32QAM. В 2015 г. рекорд был удвоен и достиг 2 Пбит/с при использовании 12-сердцевинного [66] и 19-сердцевинного MCF [67].

На рисунке 27 показаны поперечные сечения волокон, используемых в SDM-технологии. Здесь  $n$  – количество групп пространственных каналов, а  $m$  – число каналов в каждой группе.

## Вопросы для самоконтроля

1. Что такое мультиплексирование и зачем оно применяется?
2. В чем принципиальное отличие TDM от FDM (WDM)?
3. Какое взаимодействие мультиплексора с входными каналами подразумевает согласование по времени?
4. Какой тип кадровой синхронизации является наиболее распространенным для TDM-систем?
5. Какой тип кадровой синхронизации работает быстрее?
6. Перечислите известные вам структуры кадров.
7. Как называется режим кадровой синхронизации, при котором происходит последовательное сравнение кадра с известным шаблоном?
8. Что произойдет, если в режиме обслуживания кадра значение реверсивного счетчика достигнет нуля?
9. В чем преимущество метода асинхронного мультиплексирования?
10. В чем заключается метод выравнивания?
11. Какие разновидности метода выравнивания существуют?
12. Как передаются данные с каждого канала при WDM?
13. Чем отличается WDM от DWDM?
14. С чем связано появление технологии SDM?
15. В чем различие между MMF и FMF?
16. Чем грозит интеграция параллельных каналов передачи?

		Одномодовая сердцевина		Многомодовая сердцевина	
		I) Неспаренное $m = 1$		II) Спаренное $m \geq 2$	
<b>A</b> Несколько пространственных групп каналов $n \geq 2$	<b>I A</b> Многосердцевинное	Гомогенное $n = 31$	Гетерогенное $n = 32$	<b>II A</b> <b>Coupled-core group</b>	<b>III A</b> Многосердцевинное многомодовое Гетерогенное $n = 36; m = 3$
		$n = 22$	$n = 30$		
		$n = 19$	$n = 16$ двустороннее	$n = 3; m = 3$	$n = 19; m = 6$
		$n = 12$ двустороннее	$n = 7$		$n = 7; m = 3$
<b>B</b> Одна пространственная группа каналов $n = 1$	<b>I B</b> Стандартное одномодовое			<b>II B</b> $m = 3$	<b>III B</b> Многомодовое FMF $m = 15; m = 10; m = 6; m = 3$ MMF
				$m = 6$	

Рисунок 27 – Поперечные сечения оптических волокон, используемых в SDM-технологиях

## Тесты

1. Мультиплексор может являться:

- а) устройством;
- б) программой;
- в) и тем и другим;
- г) нет подходящего ответа.

2. Разделение линии передачи на логические каналы, отделенные друг от друга защитными интервалами, свойственно для:

- а) FDM;
- б) DWDM;
- в) TDM;
- г) для всех технологий мультиплексирования.

3. При какой технологии мультиплексирования практически отсутствуют перекрестные помехи?

- а) FDM;
- б) WDM;
- в) TDM.

4. Как называется процесс, когда мультиплексор выполняет роль коммутатора, который последовательно переключается с одного канала на другой без необходимости хранения информации в промежуточной памяти?

- а) символьное перемежение;
- б) битовое перемежение.

5. Как называется процесс, когда мультиплексор принимает на вход группу битов?

- а) символьное перемежение;
- б) битовое перемежение.

6. Какая последовательность является верной для описания принципа построения TDM?

- а) таймслот – кадр – временной канал;
- б) дискретизация – таймслот – кадр;
- в) таймслот – временной канал – кадр;
- г) временной канал – кадр – таймслот.

7. В каком типе кадровой синхронизации синхронизация кадра выполняется быстрее, поскольку нет неоднозначности между битами кадра и битами канала?

- а) режим прямой кадровой синхронизации;
- б) режим квитирования.

8. В случае разных битрейтов входных каналов длина кадра определяется:

- а) наименьшим битрейтом;
- б) наименьшим общим кратным битрейтов;
- в) наибольшим общим кратным;
- г) наибольшим битрейтом;
- д) средним значением битрейтов.

9. К недостаткам прямой кадровой синхронизации **НЕ** относят:

- а) снижение эффективности из-за служебных сигналов;
- б) зависимость от внешнего оборудования;
- в) возможность срабатывания ложной синхронизации из-за случайного совпадения данных;
- г) все перечисленное является недостатками.

10. Что подразумевает синхронное мультиплексирование?

- а) нет неоднозначности между временем «прибытия» каждого бита входного канала и временем мультиплексирования;
- б) существует неоднозначность между временем «прибытия» каждого бита входного канала и временем мультиплексирования;
- в) отсутствие связи пользователя с конкретным временным интервалом.

11. Преимущество сгруппированного кадра перед распределенным состоит:

- а) в невосприимчивости к пакетам ошибок;
- б) высокой скорости синхронизации;
- в) относительной простоте структуры кадра.

12. Какой режим кадровой синхронизации обеспечивает последовательный поиск, сравнивая каждую позицию выравнивания кадра кандидата с известным шаблоном кадра?

- а) режим поиска;
- б) режим поддержания.

**13.** Какой режим непрерывно отслеживает корреляцию между принятым шаблоном формирования кадров и ожидаемым шаблоном кадров?

- а) режим поиска;
- б) режим поддержания.

**14.** Что происходит, когда в режиме поддержания кадра счетчик достигает своего нулевого значения?

- а) ничего не происходит;
- б) в режиме поддержания кадра нет счетчика;
- в) запускается режим поиска кадра;
- г) возникает несогласование кадров.

**15.** Чем **НЕ** характеризуется производительность кадровой синхронизации?

- а) временем получения кадра;
- б) временем повторного получения кадра после потери кадровой синхронизации;
- в) временем запуска режима поиска кадра;
- г) временем поддержания кадра.

**16.** Как называется мультиплексирование, когда каждый цифровой канал имеет свою собственную тактовую частоту?

- а) синхронным;
- б) асинхронным;
- в) плезиосинхронным.

**17.** Как называется мультиплексирование, когда каждый источник формирует данные и передает их со скоростью, близкой по синхронизации с TDM?

- а) плезиохронным;
- б) плезиосинхронным;
- в) синхронным.

**18.** Какой метод используется для восстановления синхронизации?

- а) TDM;
- б) положительного выравнивания;
- в) отрицательного выравнивания;
- г) положительного или отрицательного выравнивания.

**19.** Какой должна быть тактовая частота входного канала при положительном выравнивании по сравнению с тактовой частотой TDM-системы?

- а) выше;
- б) ниже;
- в) равна;
- г) не имеет значения.

**20.** При методе положительного выравнивания куда изначально записываются биты входного канала?

- а) в канал передачи заголовков;
- б) в буфер с регулируемой задержкой сигнала;
- в) биты входного канала никуда не записываются.

**21.** Где кодируется точное значение дополнительно введенных битов при методе выравнивания?

- а) в буфере;
- б) канале передачи заголовков;
- в) нигде не кодируется.

**22.** Какой должна быть тактовая частота входного канала при положительно-отрицательном выравнивании по сравнению с тактовой частотой TDM-системы?

- а) выше;
- б) ниже;
- в) равна;
- г) не имеет значения.

**23.** Какого оптоволокна достаточно для использования WDM-технологии?

- а) SMF;
- б) MMF;
- в) MCF;
- г) FMF.

**24.** Сколько окон прозрачности применяется при использовании DWDM-технологии?

- а) одно;
- б) два;
- в) три;
- г) не имеет значения.

25. Выберите одну характеристику, которая **НЕ** относится к **НЕДОСТАТКАМ** WDM-технологии.

- а) наличие перекрестных помех;
- б) проявление нелинейных эффектов;
- в) малые интервалы  $\Delta\lambda$  между мультиплексными каналами.

26. Что может произойти с трафиком при переходе от современного Интернета информации к Интернету вещей?

- а) не изменится;
- б) уменьшится;
- в) трафик между машинами может опередить трафик между людьми.

27. Выберите тип оптоволокна, которое **НЕВОЗМОЖНО** использовать в SDM-технологии:

- а) MMF;
- б) SMF;
- в) FMF;
- г) MCF.

28. В чем заключается необходимость применения техники цифровой обработки сигнала множественного ввода-вывода MIMO?

- а) в интеграции параллельных каналов передачи и уменьшении разброса групповой задержки между модами;
- б) в усложнении системы приёмника;
- в) в повышении пропускной способности.

29. По какому пути происходило развитие скорости передачи данных после 2011 г.?

- а) OTDM;
- б) замены SMF на FMF;
- в) увеличения числа сердцевин в MCF.

30. В чем заключается основная трудность перехода коммерческих ВОЛС к SDM-технологии?

- а) стоимость;
- б) большое количество негативных эффектов;
- в) использование принципиально нового подхода мультиплексирования.

## 3 ПЛЕЗИОХРОННЫЕ И СИНХРОННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ИЕРАРХИИ

### 3.1 Плезиохронная цифровая иерархия

#### Общие сведения

За счет большого объема данных структура сложной сети предопределяет разделение и объединение потоков передаваемой информации. Одним из факторов построения сложной сети является количество каскадов мультиплексирования и их расположение. Используемые в сети системы передачи строятся по иерархическому принципу. Относительно цифровых систем этот принцип определяет, что количество каналов, соответствующее какой-то ступени иерархии, больше числа каналов предыдущей ступени в целое число раз.

Сеть должна представлять из себя взаимодействие между мультиплексированием и демультиплексированием на разных концах схемы, а в случае телефонной связи в схеме также должны быть предусмотрены АЦП и ЦАП. Аналого-цифровые (A/D – *Analog/Digital*) преобразования зачастую происходят на самом нижнем уровне иерархии.

Использование TDM-систем для создания большей пропускной способности привело к появлению различных цифровых иерархий в Северной Америке, Японии и Европе. Три различных PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy* – плезиохронная цифровая иерархия) были приняты ИТУ-Т. Каждая иерархия отражает выбор, сделанный одной из ведущих телекоммуникационных компаний.

Технология PDH, несмотря на свой «возраст», продолжает активно применяться при развертывании новых сетей и расширении существующих. Технология PDH – это способ организации цифровых систем передачи, использующих мультиплексированный РСМ-сигнал, собранный из 30-канальных цифровых потоков. Передаваемые потоки называются плезиохронными, т. е. «почти синхронными», из-за небольших различий в их скорости.



За первой иерархией, предложенной АТ&Т (American Telephone and Telegraph), последовали США и Канада, за NIT (Nippon Telegraph and Telephone) последовала Япония, а за СЕРТ (Conférence Européenne des Administrations des Postes et Télécommunications) последовала Европа, большинство стран за пределами Северной Америки и также Япония.

Структура битрейта и пропускная способность каналов этих иерархий представлена на рисунке 28. В Северной Америке и Японии первый цифровой уровень (DS-1) соответствует мультиплексированию 24 голосовых каналов с битрейтом 1,544 Мбит/с, тогда как в Европе 30 голосовых каналов за счет мультиплексирования имеют битрейт 2,048 Мбит/с (иерархия E1). Битрейт мультиплексированного сигнала чуть выше чем просто произведение 64 Кбит/с на число каналов из-за дополнительных битов управления, необходимых для демуплексирования сигнала на приемной стороне [14].

Среди различных PDH существуют некоторые общие черты: способ мультиплексирования и метод выравнивания. Однако отличаются они рядом действительно важных особенностей: канальной и агрегатной скоростью передачи.

### **Цифровая иерархия Северной Америки**

Как показано на рисунке 29, цифровая иерархия Северной Америки основана на 4 уровнях. Иерархия второго уровня получается путем мультиплексирования 4 каналов DS-1. В таком случае битрейт составляет 6,312 Мбит/с (иерархия DS-2). По такому принципу формируются и все последующие цифровые уровни [13].

Линии передачи, соответствующие этим скоростям, обозначаются T1–T4. Оборудование мультиплексирования обозначается каналом и уровнем преобразования (например, M13 объединяет 28 DS-1 сигналов в DS-3 сигнал).

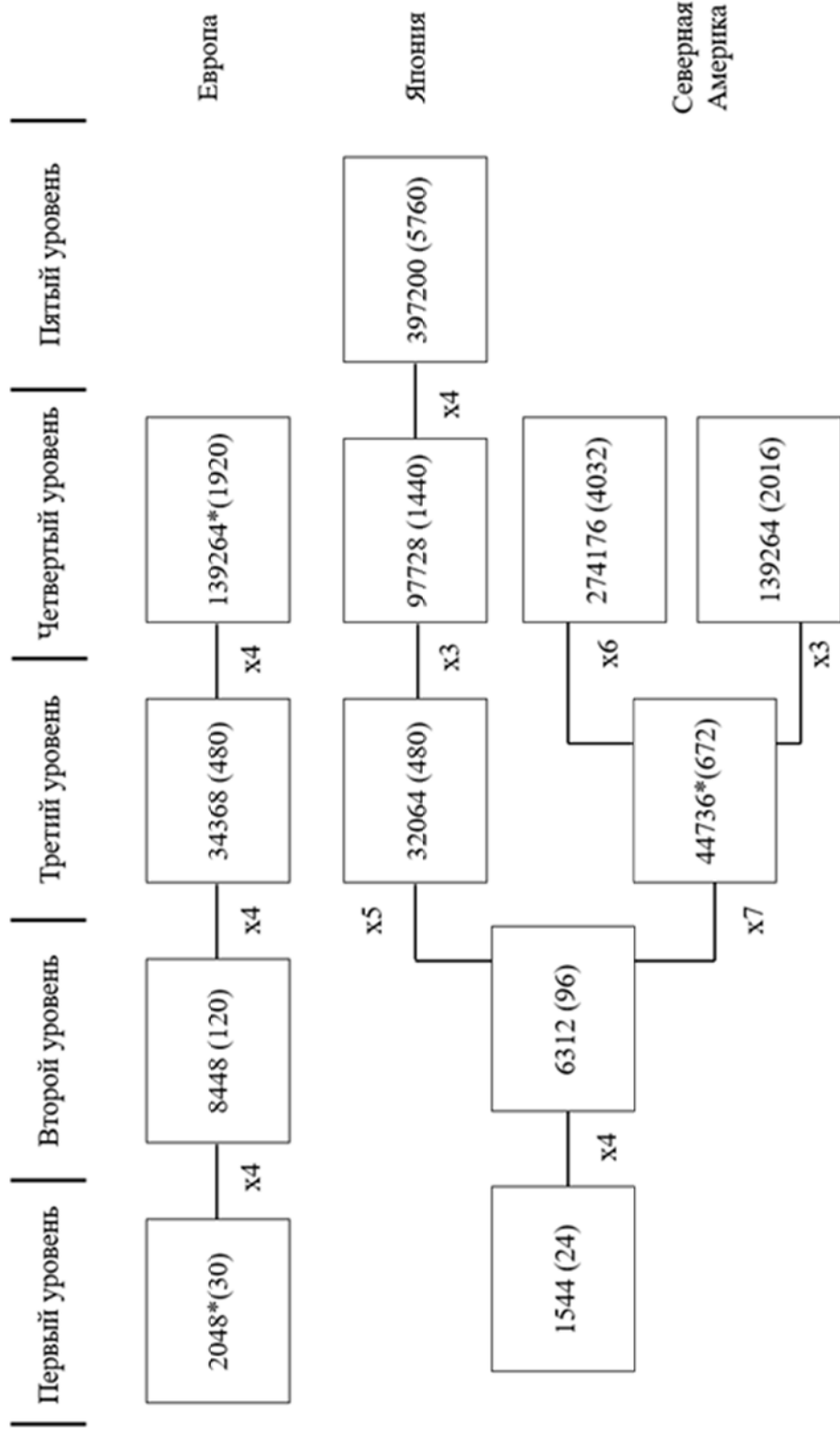


Рисунок 28 – PDH в соответствии с ITU-T: в каждом прямоугольнике представлен битрейт (Кбит/с) и пропускная способность в количестве каналов 64 Кбит/с;  $xN$  отображает число мультиплексированных цифровых каналов; \* указывает на гибридную иерархию, используемую для взаимодействия разнородных цифровых иерархий

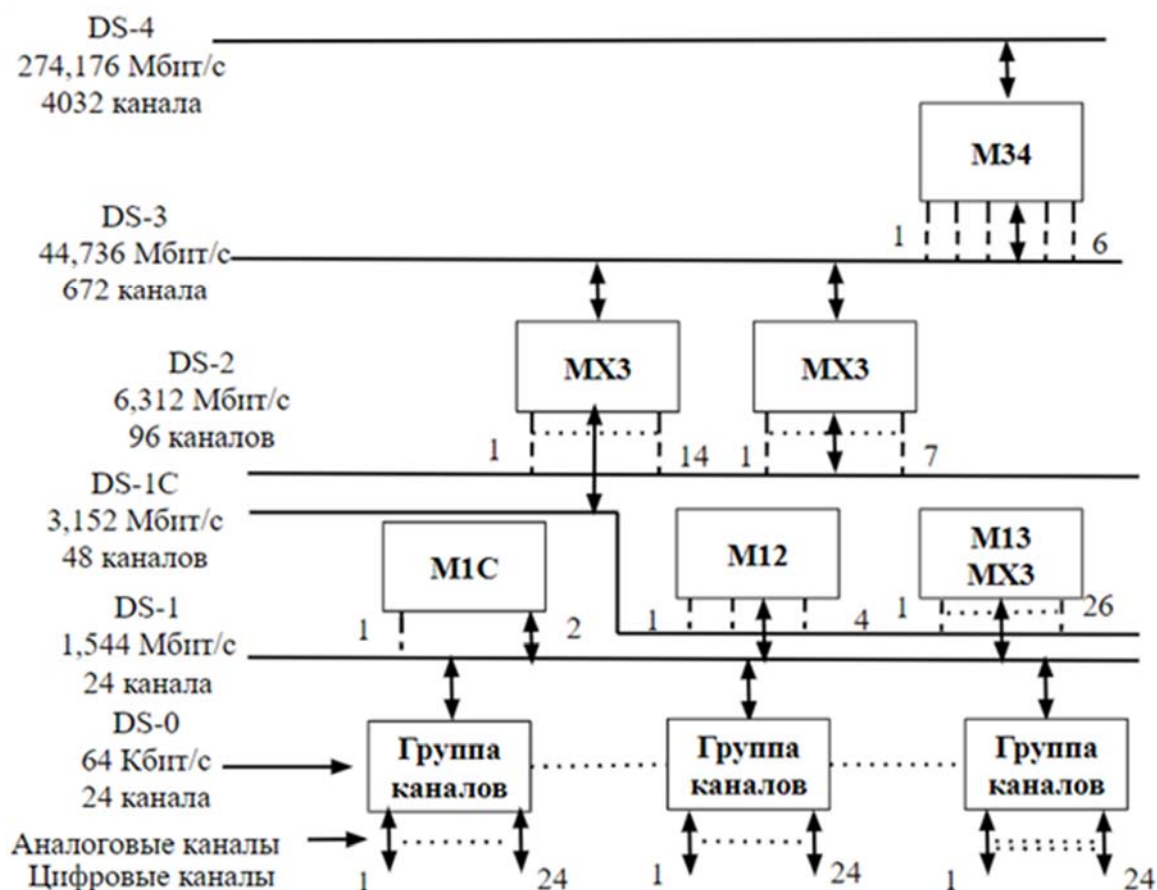


Рисунок 29 – Цифровая иерархия Северной Америки

### *Мультиплексирование первого уровня*

Мультиплексором первого уровня каждой цифровой иерархии ИТУ-Т является РСМ-мультиплексор, работающий на битрейте 1,544 Мбит/с для североамериканской и японской иерархии и 2,048 – для иерархии СЕРТ.

На рисунке 30 показана структура кадра 1,544 Мбит/с, который обеспечивает функционирование 24 голосовых каналов [14]. Такая группа из 24 каналов с битрейтом 1,544 Мбит/с называется первичной группой РСМ или линии передачи T1. T1 – это высокоскоростная линия передачи данных, которая используется для установления офисных связей между различными зданиями. Каждый кадр состоит из 24 8-битных слов и одного бита синхронизации (всего 193 бита). Частота дискретизации каждого канала 8000 Гц. Таким образом, итоговая агрегатная скорость (8000 кадров)  $\times$  (193 бит/кадр) = 1,544 Мбит/с. Каждый суперкадр состоит из 12 кадров, в котором присутствуют 12 битов синхронизации (по одному от каждого кадра).

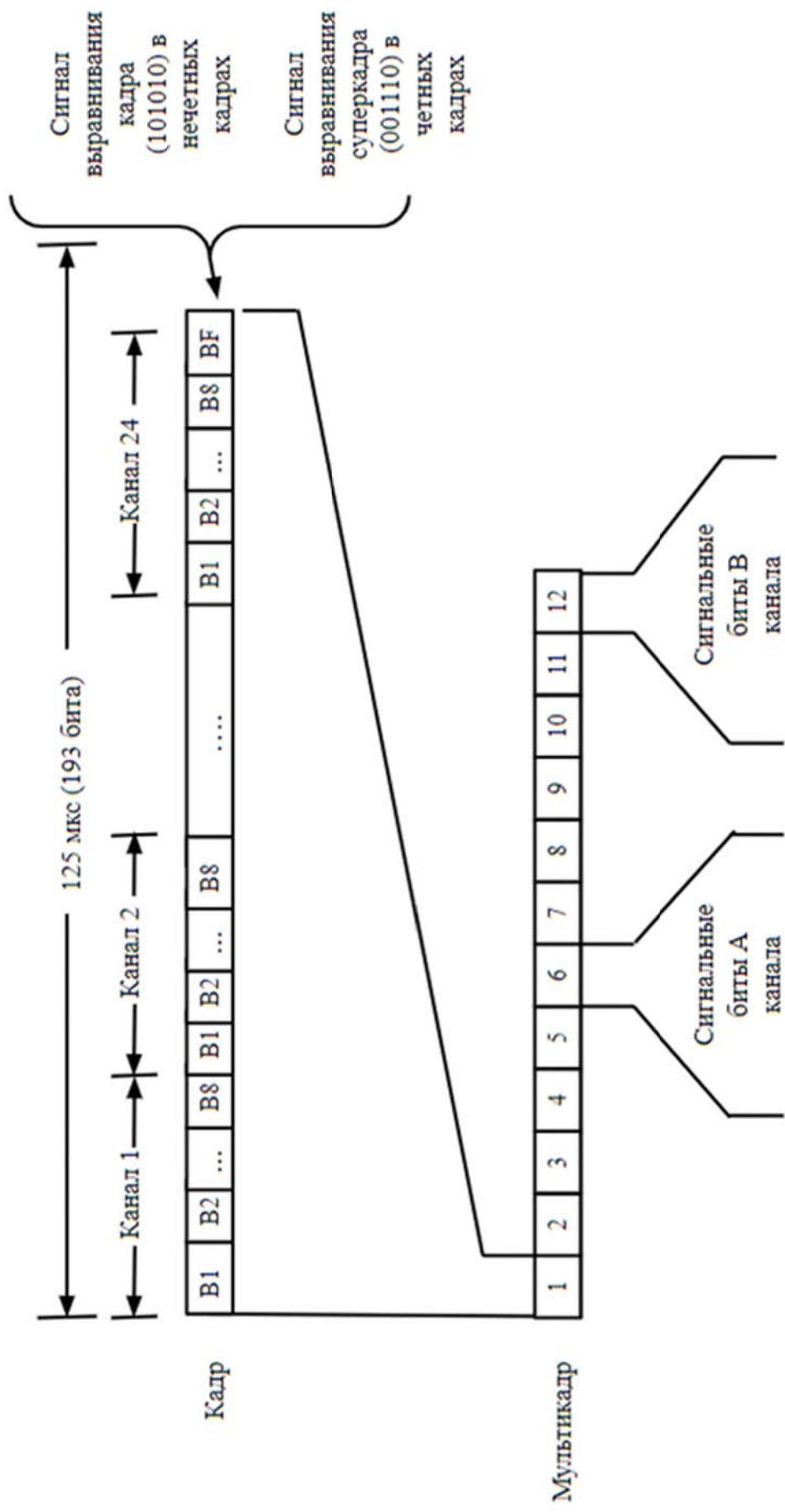


Рисунок 30 – Формат кадра и суперкадра для 24-канального РСМ-мультиплексора

Эта 12-битовая последовательность подразделяется на две последовательности. Шаблон совмещения кадров (101010) расположен в кадрах с нечетными номерами, а шаблон выравнивания суперкадра (001110) расположен в кадрах с четными номерами. Структура суперкадра также содержит сигнальные биты, которые используются для передачи контрольной информации (трубка положена, трубка снята) и импульсов набора для каждого голосового канала. Наименьший значащий бит (B8) разделяет кадр между речью и сигнальными битами. Биты B8 несут информацию о речевых выборках для пяти кадров, за которыми следует служебная информация в каждом шестом кадре.

Сигнал T1 относится к протоколам, предназначенным для создания или разрыва соединения. Например, в телефонных системах он используется для контроля вызовов. Существуют 2 способа сигнализации T1:

- Channel Associated Signaling (CAS) – сигнализация по выделенному каналу, поскольку она передает сигнал по тому каналу (кадру), что и фактические данные. Предусмотрены два отдельных канала сигнализации, которые чередуются между шестым и двенадцатым кадрами каждого суперкадра. Сигнальные биты, переносимые 6-м кадром, называются *A*, а биты, переносимые 12-м кадром, называются *B*;

- Common Channel Signaling (CCS) – это форма сигнализации, также известная в США как Common Channel Interoffice Signaling (CCIS), основана на определенном канале, по которому передаются управляющие сигналы для передачи голоса и данных по сети. Все эти сигналы передаются по одному каналу управления, но отвечают за управление несколькими другими временными интервалами.

#### *Мультиплексирование верхних уровней*

Мультиплексоры верхних уровней стандартизованы (рисунок 28). Оригинальные версии этих мультиплексоров были основаны на использовании циклического битового перемежения и позитивного выравнивания. M1C и M12 объединяют два и четыре DS-1 сигнала в DS-1C и DS-2 сигнала соответственно. Мультиплексоры M1C и M12 были разработаны в основном для металлических кабелей со скоростью T1C и T2. Мультиплексирование более

низкого уровня было заменено мультиплексированием более высокого уровня из-за того, что скорость передачи увеличилась с появлением волоконной оптики и цифрового радио.

Сигнал DS-3 может быть получен через несколько типов мультиплексоров (M23, M13, MC3 или MX3). Четвертый уровень может быть получен мультиплексором M34. Четвертый уровень с битрейтом 274,176 Мбит/с редко используется в североамериканской иерархии, в связи с чем не был принят ИТУ-Т, а был заменен четвертым уровнем из СЕРТ-иерархии (DS-4NA).

### **Цифровая иерархия СЕРТ**

Как показано на рисунке 28, СЕРТ-иерархия использует четыре уровня мультиплексирования. Эти уровни иногда называют европейскими, или Е-уровнями. Например, Е1 для обозначения битрейта 2,048 Мбит/с. Все четыре уровня стандартизованы ИТУ-Т [70]. Стандарты для трёх верхних уровней существуют как для положительного, так и для положительного/нулевого/отрицательного выравнивания.

#### *Мультиплексирование первого уровня*

Стандарт СЕРТ для РСМ-мультиплексирования показан на рисунках 31а и 31б. Каждый кадр состоит из 30 8-битных РСМ-слов (таймслоты 1–15 и 17–31), 8 битов кадровой синхронизации и 8 сигнальных битов – всего 256 бит. Таким образом, итоговый агрегатный битрейт 2 048 Мбит/с. Структура мультикадра, показанная на рисунке 31б, состоит из 16 кадров. Первый 8-битный таймслот используется для выравнивания мультикадра, следующие 15 таймслотов обеспечивают 4 сигнальных бита на канал для всех 30 речевых каналов.

60-канальный преобразователь кода может использоваться для преобразования двух 30-канальных 2,048 Мбит/с РСМ-сигналов в один 60-канальный сигнал ADPCM (*Adaptive differential pulse-code modulation* – адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция). Структура кадра идентична той, которая показана на рисунке 31. 60-канальный преобразователь кода стандартизован в ИТУ-Т Rec. G.761 [30].

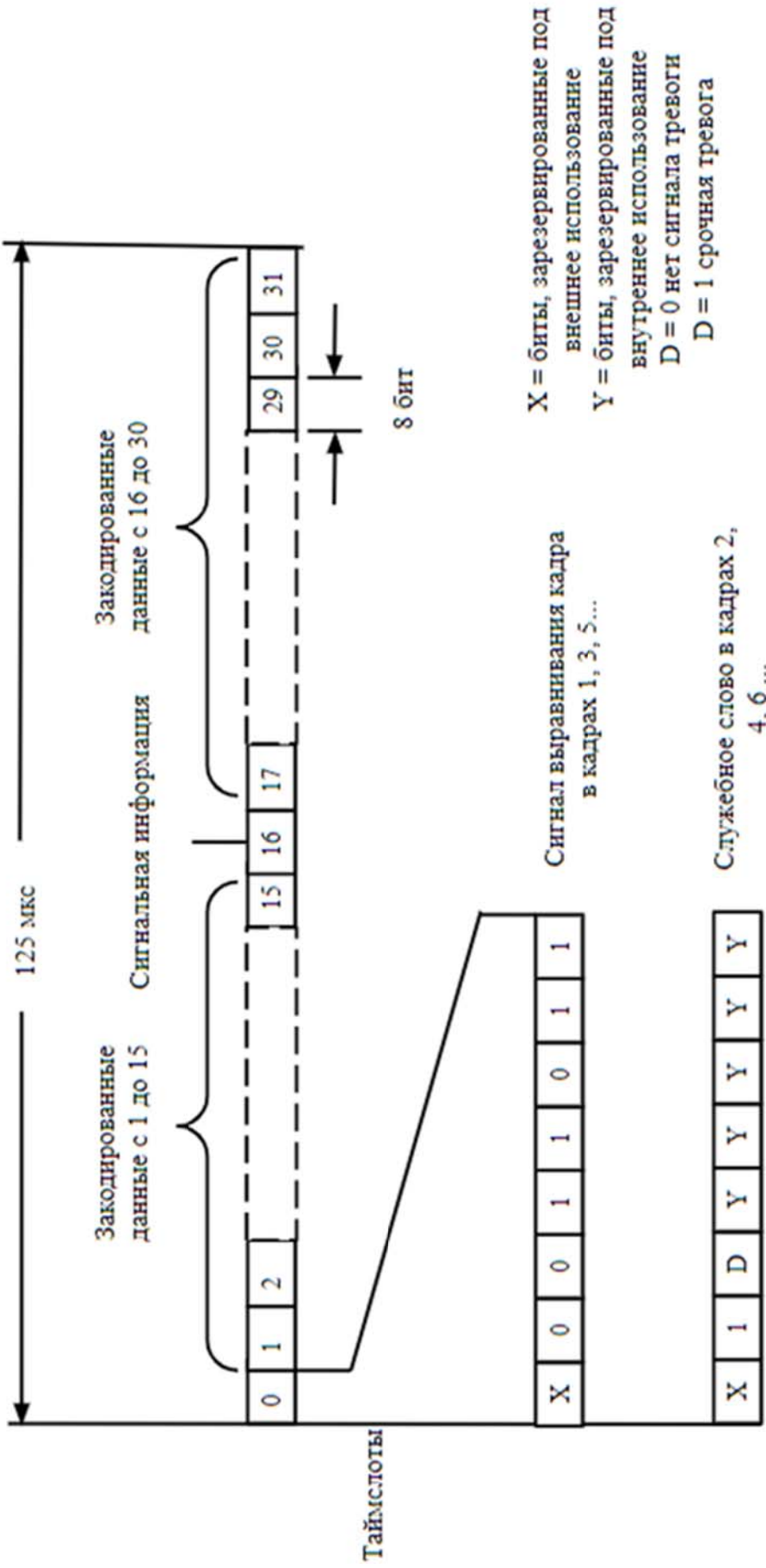


Рисунок 31а – Структура кадра 30-канального РСМ-мультиплексора:  
формат цикловой синхронизации

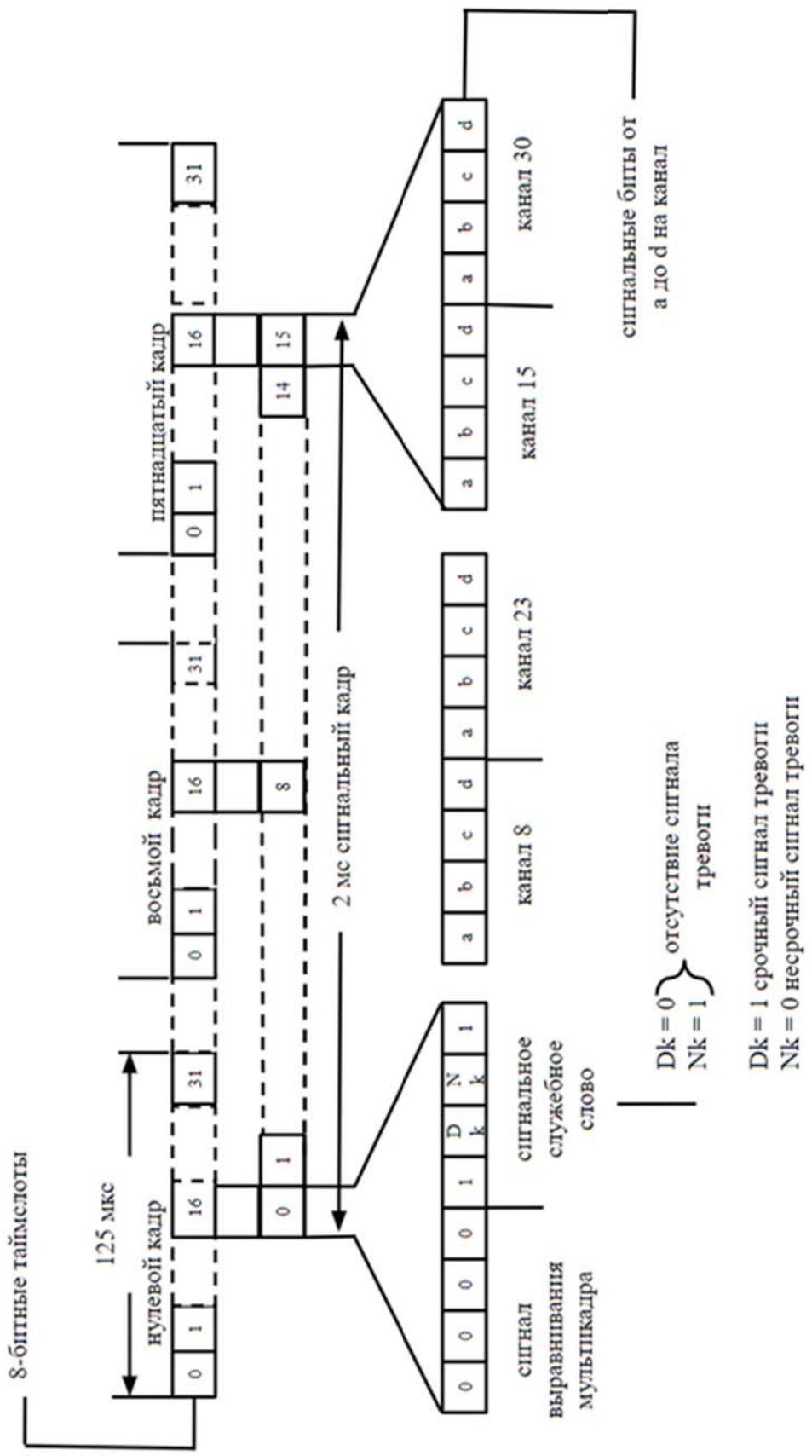


Рисунок 316 – Структура кадра 30-канального РСМ-мультиплексора:  
формат мультикадра



### *Мультиплексирование верхних уровней*

Все СЕРТ-мультиплексоры верхнего уровня основаны на циклическом перемежении битов, где четыре компонентных сигнала выбираются в порядке номера их порта. Однако размер мультикадра и его организация отличаются между различными уровнями и между положительным и положительным/нулевым/отрицательным выравниванием. В случае мультиплексирования второго уровня, который работает с агрегатным битрейтом 8,448 Мбит/с ITU-T, Rec. G.742 определяет 848-битный мультикадр, а ITU-T Rec. G.745 определяет 1056-битный мультикадр. Аналогичным образом для мультиплексирования третьего уровня с агрегатным битрейтом 34,368 Мбит/с ITU-T Rec. G.753 предписывает 2148-битный мультикадр. И наконец для мультиплексирования четвертого уровня с агрегатным битрейтом 139,264 Мбит/с ITU-T Rec. G.751 предписывает 2928-битный мультикадр, а Rec. G.754 – 2176-битный.

ITU-T Rec. G.751 также определяет два метода для достижения уровня с битрейтом 139,264 Мбит/с путем мультиплексирования четырех сигналов с битрейтом 34,368 Мбит/с или шестнадцати сигналов с битрейтом 8,448 Мбит/с. В таблице 2 приведены общие характеристики всех цифровых СЕРТ-мультиплексоров верхнего уровня [14].

Таблица 2 – Характеристики СЕРТ цифровых мультиплексоров

Характеристики мультиплексора	Второй уровень ITU-T Rec.		Третий уровень ITU-T Rec.		Четвертый уровень ITU-T Rec.	
	G.742	G.745	G.751	G.753	G.755	G.754
Агрегатный битрейт, Мбит/с	8,448		34,368		139,264	
Допуск по агрегатному битрейту, миллионные части	±30		±20		±15	
Агрегатный цифровой интерфейс	HDB3		HDB3		CM1	
Битрейт одного канала, Мбит/с	2,048		8,448		34,368	
Число каналов	4					

## Окончание таблицы 2

Характеристики мультиплексора	Второй уровень ITU-T Rec.		Третий уровень ITU-T Rec.		Четвертый уровень ITU-T Rec.	
	G.742	G.745	G.751	G.753	G.755	G.754
Цифровой интерфейс канала	HDB3					
Структура кадра	–	G.745	G.751	G.753	G.751	G.754
Метод выравнивания	+	+/0/–	+	+/0/–	+	+/0/–
Метод мультиплексирования	Циклическое перемежение битов в порядке нумерации каналов					
Примечания: HDB3 – <i>high density bipolar of order 3</i> – один из способов линейного кодирования; CMI – <i>coded mark inversion</i> – одна из схем двухступенчатого кодирования						

### Японская цифровая иерархия

На рисунке 28 показана цифровая иерархия Японии, состоящая из пяти уровней. Первые два уровня имеют ту же скорость передачи данных, что и североамериканская цифровая иерархия. Этим уровням иногда присваивают обозначения JX, где J1 – мультиплексор первого уровня, объединяющий 24 голосовых канала со скоростью 64 Кбит/с по  $\mu$ -закону РСМ. J1 отличается от T1 только методом, используемым для передачи аварийных сигналов. Японский мультиплексор второго уровня основан на синхронной структуре кадра, указанной в ITU-T Rec. G.704, который не совместим с североамериканским M12, хотя они оба имеют одинаковую агрегатную скорость.

В то время как M12 чередует информацию, управление и синхронизацию бит в 1176-битном мультикадре, японский мультиплексор второго уровня имеет 789-битный мультикадр, который состоит из 96 байтов информации, 16 сигнальных и 5 служебных бит. Информационные байты соответствуют выборкам из 96 каналов с основным DS-0 сигналом. В таблице 3 приведены характеристики всех японских мультиплексоров верхнего уровня [14].

Таблица 3 – Характеристики японских цифровых мультиплексоров

Характеристики мультиплексора	Второй уровень ITU-T Rec. G.704	Третий уровень ITU-T Rec. G.752	Четвертый уровень ITU-T Rec. G.752
Агрегатный битрейт, Мбит/с	6,312	32,064	97,728
Допуск по агрегатному битрейту, миллионные части	±30	±10	±10
Агрегатный цифровой интерфейс	B6ZS	Зашифрованный AMI	
Битрейт одного канала, Мбит/с	0,064	6,312	32,064
Число каналов	96	5	4
Цифровой интерфейс канала	Bipolar	B6ZS	Зашифрованный AMI
Структура кадра	Таблица 1	G.752	
Метод выравнивания	Не используется	Положительное выравнивание	
Метод мультиплексирования	Байтовое перемежение	Циклическое перемежение битов в порядке нумерации каналов	
Примечания: B6ZS – <i>bipolar N (6) zero substitution</i> – метод кодирования, в котором вместо комбинации из <i>N</i> нулей передается другой код; AMI – <i>alternative mark inversion</i> – один из методов линейного кодирования			

### Гибридная цифровая иерархия

Гибридная иерархия была разработана и стандартизирована ITU-T Rec. G.802, чтобы обеспечить взаимодействие разнородных цифровых иерархий [71]. Как показано на рисунке 28, гибридная иерархия включает в себя уровни 2,048; 6,312; 44,736 и 139,264 Мбит/с. Для таких битрейтов требуется три ступени мультиплексоров. Мультиплексор 2,048 – 6,312 Мбит/с объединяет три E1 сигнала в один DS-2. Мультиплексор 6,312 – 44,736 Мбит/с идентичен M23, а мультиплексор 44,736 – 139,264 Мбит/с объединяет три DS-3 сигнала в E4.

Другие положения этого стандарта касаются мультиплексирования первого уровня и кодирования речи. Они обеспечивают

международную связь между странами, которые приняли разные законы о кодировании (A-закон или  $\mu$ -закон). Любое необходимое преобразование между двумя странами – это ответственность страны, использующей  $\mu$ -закон.

## 3.2 Синхронная цифровая иерархия

### Общие сведения

Из-за того, что PDH является не совсем синхронной, мультиплексоры используют хоть и небольшие, но накладные расходы в виде служебных сигналов, которые необходимы для осуществления процедур синхронизации и фазирования, контроля ошибок и т.д. Также в связи с большим разнообразием оборудования межсетевой переход является дорогим и сложным, PDH не является гибкой системой и делает наблюдение и управление за сетями более трудным. Синхронная цифровая иерархия (SDH – *Synchronous Digital Hierarchy*) была разработана для того, чтобы исправить некоторые ограничения PDH [72, 73].

Отсутствие международного стандарта в телекоммуникационной отрасли в 1980-х годах привело к появлению нового стандарта, который сначала назывался синхронной оптической сетью (SONET – *Synchronous Optical Network*), а позже был переименован в SDH [74–76]. SONET строится на базовом битрейте 51,84 Мбит/с. Соответствующий оптический сигнал обозначается как OC-1, где OC (Optical Carrier) – оптическая несущая.

SDH, принятая в 1988 г. сектором стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (ССТТ – фр. *Comite Consultatif International Telephonique et Telegraphique*), основана на структуре SONET. Главное отличие заключается в том, что битрейт первого уровня SDH составляет 155,52 Мбит/с, а не 51,84 Мбит/с. В рекомендациях G.707, G.708 и G.709 закреплены битрейты, форматы сигналов, структура мультиплексирования и полезная нагрузка для интерфейса сетевого узла (NNI – *Network Node Interface*). NNI – это интерфейс между средствами передачи, например оптоволоконный или цифровой радиоканал и сетевой узел, который

выполняет переключение, кросс-соединение и мультиплексирование. SDH строится на базовом битрейте 155,52 Мбит/с и обозначается как STM-1, где STM (*Synchronous Transport Module*) – синхронный транспортный модуль.

Отличительной особенностью SONET и SDH является то, что более высокие уровни обладают кратным увеличением битрейта. В таблице 4 приведено соответствие между битрейтами SONET и SDH [13].

Таблица 4 – Соответствие битрейтов SONET и SDH

SONET	SDH	Битрейт, Мбит/с	Число каналов
OC-1	–	51,84	672
OC-3	STM-1	155,52	2016
OC-12	STM-4	622,08	8064
OC-48	STM-16	2488,32	32256
OC-192	STM-64	9953,28	129024
OC-768	STM-256	39813,12	516096

SDH, в отличие от PDH, основана по повторяющейся иерархии кадров фиксированной длины. SDH устраняет огромное число мультиплексоров с помощью одноступенчатого мультиплексирования и демультимплексирования, в связи с чем снижается сложность оборудования [77]. Некоторые из рекомендаций развития SDH были сформулированы для того, чтобы определить защиту, механизмы управления, требования к оптическим компонентам и к мультиплексированию нескольких источников данных. Базовая концепция SDH относительно скорости передачи данных заключается в следующем: в четыре раза выше битрейт – в два раза выше стоимость.

SONET/SDH, разработанные с целью оптимизации TDM, крайне надежны и работают безотказно в течение 99,99 % времени [78]. К свойствам SONET/SDH относят:

- использование TDM;
- сочетание оптических и электрических компонентов;
- побайтовое мультиплексирование;
- чрезвычайно точное регулирование времени.

## *Элементы сети SDH*

1. Синхронный мультиплексор – мультиплексор, который выполняет функции линейной передачи и мультиплексирования, тем самым заменяя передающее оборудование и мультиплексор PDH. Выделяют два вида синхронных мультиплексоров:

- терминальный мультиплексор (ТМ – *Terminal Multiplexer*) – принимает ряд компонентных сигналов и мультиплексирует их в оптимальный агрегированный сигнал;
- мультиплексор ввода и вывода (ADD – *Add and Drop Multiplexer*) – позволяет формировать каналы ввода и вывода из «проходящих» каналов. Мультиплексор ADD является строительной единицей для синхронных сетей местного доступа.

2. Синхронное цифровое кросс-соединение (SDCC – *Synchronous Digital Cross Connect*): оборудование кросс-соединения выполняет роль переключателя, который отделяет один или более каналов нижнего порядка без использования канала передачи.

3. Повторитель сигнала – это устройство, которое повторяет (восстанавливает) сигнал. Повторители сигнала широко распространены для передачи данных на расстояния более 50 км [73].

## *Структура кадра SDH*

Структура кадра SDH основана на синхронном побайтовом мультиплексировании нескольких строительных блоков. Такие элементы синхронного мультиплексирования представляют собой структурированные наборы байтов фиксированного размера, которые чередуются или отображаются один в другой, чтобы в конечном итоге сформировать кадры STM-N, N = 1, 4, 16 и т. д. Структура STM-1 представляет из себя 9 строк на 270 столбцов (рисунок 32). Служебный и административный блоки занимают первые 9 столбцов 9-строчного кадра. Служебный блок обеспечивает кадровую синхронизацию, проверку ошибок. Административный блок занимает четвертую строку, определяемую столбцами 1–9, дополнительный административный блок также может располагаться в строках 1–3, определяемых столбцами 11–14.

На рисунке 33 представлена структура мультиплексирования в SDH [80], основанная на нескольких элементах:

- контейнер **C-n** ( $n = 1-4$ ) эквивалентен стандартным североамериканским, японским и европейским битрейтам, характерным для уровней 1-4;



Рисунок 32 – Структура кадра STM-N

- виртуальный контейнер **VC-n** ( $n = 1-4$ ) состоит из одного контейнера и трактового заголовка или группы вспомогательных блоков с их трактовыми заголовками. VC являются базовыми строительными блоками. В качестве полезной нагрузки может использоваться как любой сигнал PDH, так и другие элементы синхронного мультиплексирования более низкого порядка [79]. VC индивидуально и независимо доступны в SDH-кадрах посредством информационного указателя;

- вспомогательный блок **TU-n** ( $n = 1-3$ ) состоит из VC и указателя вспомогательного блока, который определяет начало VC внутри VC более высокого уровня;

- административный блок **AU-n** ( $n = 3, 4$ ) состоит из VC-n ( $n = 3, 4$ ) и указателя административного блока, который определяет начало VC-n внутри STM-1;

- группа вспомогательных блоков **TUG-n** ( $n = 2, 3$ ) – это группа вспомогательных блоков, сформированных мультиплексированием.

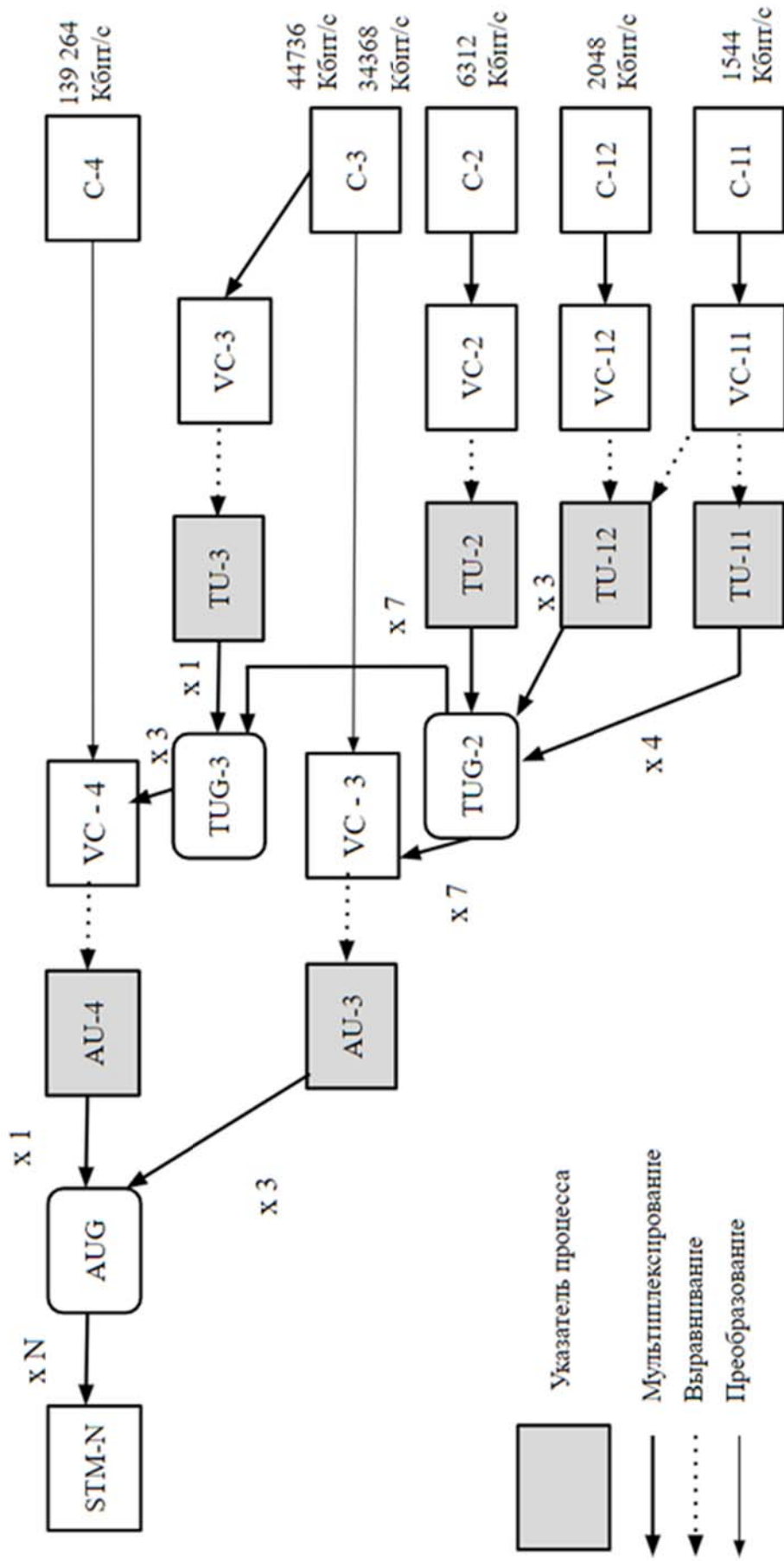


Рисунок 33 – Структура мультиплексирования SDN



## Архитектура сетей SDH/SONET

Существуют две стандартные архитектуры: линейная и кольцевая, обе могут обеспечить защиту сети и восстановление в случае сбоя [81]. На рисунке 34 представлена линейная архитектура. Трафик в такой архитектуре передается по цепочке сетевых элементов. Каждый промежуточный элемент обычно представляет из себя ADM, который позволяет добавлять, отбрасывать или пропускать сигнал. Конечные узлы представляют из себя ТМ [14].

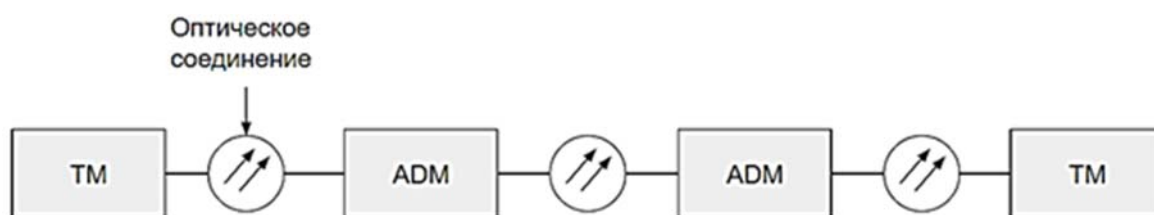


Рисунок 34 – Линейная архитектура

Для защиты от порезов волокна между каждой парой узлов можно использовать два и более оптоволокон. К механизмам защиты такой архитектуры относят:

- 1:1. Передача сигнала происходит на одном волокне, а защита обеспечивается другим. Активно только рабочее волокно, а защитное используется в качестве резервного;
- 1+1. Активны оба волокна одновременно. Это позволяет намного быстрее произвести переключение при возникновении сбоев;
- 1:N. Существуют  $N$  рабочих каналов, в то время как для защиты используется 1 канал.

Такие защитные переключатели могут быть реверсивными (сигнал переключается обратно при устранении неисправности) или нереверсивными.

*Кольцо* является наиболее широко используемой топологией. В такой топологии могут быть применены два или четыре оптоволокон, и в каждом узле присутствует ADM [81]. Кольцевая система является замкнутой, что облегчает разработку протоколов, которые способны определить сбой в оптоволоконе и быстро восстановить подключение. Существуют два типа самовосстанавливающихся кольцевых соединений: однонаправленное и двунаправленное.

Однонаправленное кольцо посылает трафик в одном направлении по кольцу. Двухнаправленное кольцо направляет трафик в противоположных направлениях. Обрыв волокна или отказ узла в двухнаправленном кольце защищен переключением линии на резервную. Сквозное переключение выполняется автоматическим защитным переключением (APS – *Automatic Protection Switching*). Современное коммерческое оборудование SONET обычно способно к восстановлению через 20–40 мс.

Наиболее распространенными типами кольцевой архитектуры являются:

1. Однонаправленное кольцо с коммутацией трактов (UPSR – *Unidirectional Path Switched Ring*). В таком типе используются два оптоволоконна (рабочее и защитное). Базовая маршрутизация – однонаправленная, рабочее волокно действует в одном направлении, а защитное – в противоположном. Как показано на рисунке 35, каждый узел передает сигнал в оба оптоволоконна [14]. В стандартном режиме извлекается полезный сигнал только из одного волокна. UPSR является самой быстрой кольцевой архитектурой, потому что трафик постоянно передается на приемник.

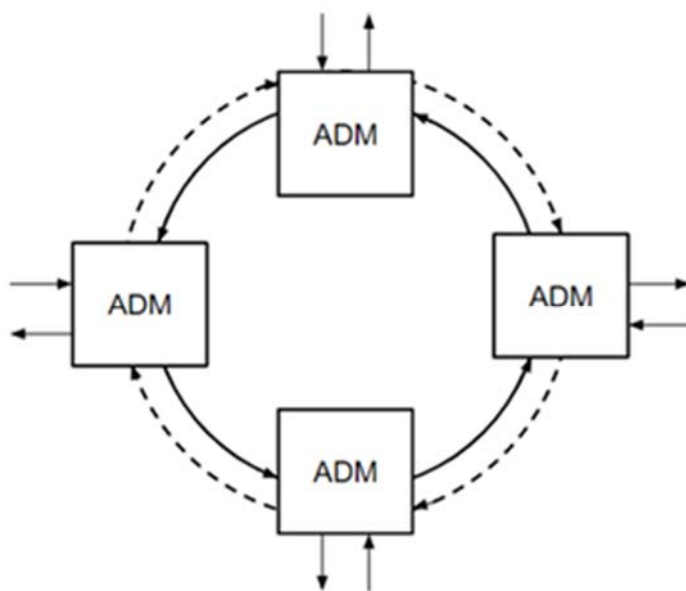


Рисунок 35 – UPSR: ————— — рабочее волокно;  
 - - - - - — защитное волокно

2. Двухволоконное двухнаправленное кольцо с коммутацией трактов (BLSR/2 – *Two Fiber Bi-directional Line Switched Ring*).

В таком типе рабочий трафик распространяется в обоих направлениях, используя оба оптоволокна. Один путь передачи направлен по часовой стрелке, а другой – против. Каждое волокно работает на половине своей пропускной способности, а вторую половину использует для защиты. Если в оптоволокне или узле происходит сбой, то трафик переключается на оставшуюся половину [14] (рисунок 36).

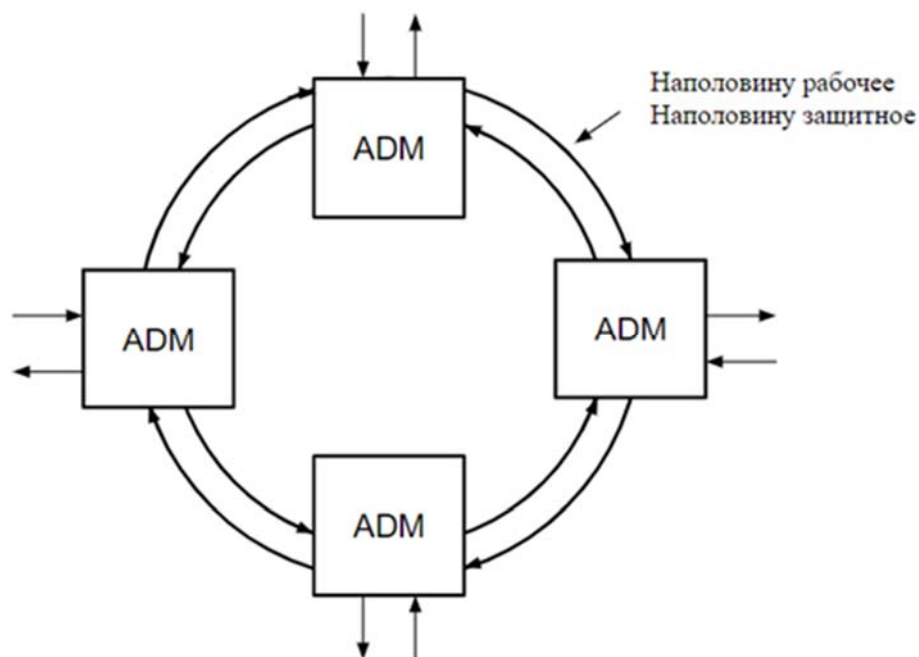


Рисунок 36 – BLSR/2

3. Четырехволоконное двунаправленное кольцо с коммутацией трактов (BLRS/4). В таком типе два волокна используются для передачи рабочего трафика, а другие два – для защиты. Важной особенностью BLRS/4 является то, что такой тип кольцевой архитектуры может выдержать более одного перебоя оптоволокна в сети [14] (рисунок 37).

Среди других архитектур выделяют *звезду* и *шину*.

*Звезда* является топологией сети, в которой все элементы присоединены к центральному ядру, которое является SDH-кросс-соединением.

*Шина* обладает хорошей гибкостью и используется там, где необходимо безопасное соединение [73].

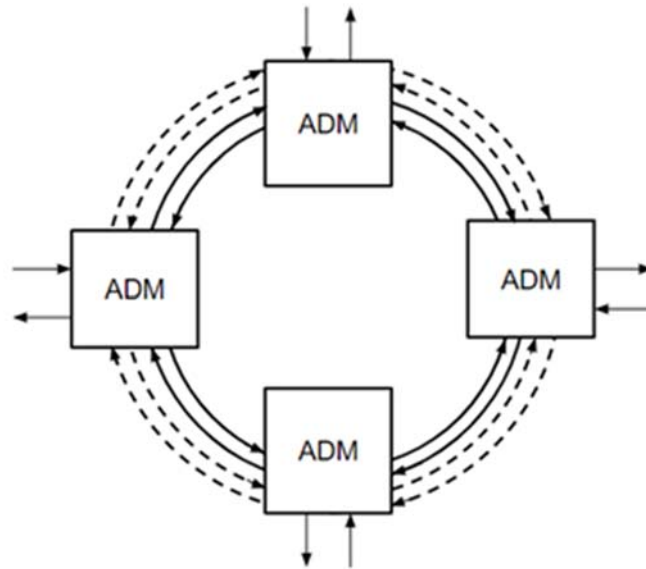


Рисунок 37 – BLSR/4: ————— — рабочее волокно;  
 - - - - - — защитное волокно

### *Преимущества SDH*

По сравнению с PDH битрейт SDH может достигать 10 Гбайт/с, легче извлекать и вставлять каналы с низкой скоростью передачи в каналы с высокой скоростью передачи. В системы SDH включаются механизмы автоматического резервного копирования и восстановления в случае сбоя. Зачастую отказ одного из элементов сети не вызывает отказ всей сети. К другим преимуществам SDH относят:

- более простую технику мультиплексирования и демуплексирования;
- поддержку синхронных сетей и SDH-многоточечную сеть;
- возможность передачи существующих сигналов PDH;
- возможность роста до более высоких скоростей передачи, что улучшает процесс администрирования и обслуживания;
- способность передавать широкополосные сигналы;
- предоставление услуги сетевого транспорта и локальной сети (например, видеоконференции и интерактивные мультимедиа);
- увеличение полосы пропускания оптического волокна без ограничений;
- обеспечение защиты трафика сетевой топологией при переключении;
- быстрое восстановление после сбоя [73].

## Вопросы для самоконтроля

1. Для чего была разработана SDH?
2. Чем отличается SDH и SONET?
3. На каком базовом битрейте строится SDH?
4. Что является отличительной особенностью SDH/SONET от PDH в отношении изменения битрейтов на разных уровнях мультиплексирования?
5. Что надежнее PDH или SONET/SDH?
6. Перечислите основные элементы сети SDH.
7. Какая из топологий сети является наиболее распространенной?
8. В чем преимущества SDH?
9. Почему цифровые иерархии называются плезиохронными?
10. В результате чего появилось несколько PDH?
11. В чем заключаются значительные различия между PDH?
12. Для чего предназначается линия передачи T1?
13. На чем основаны все СЕРТ-мультиплексоры верхнего уровня?
14. С чем связана несовместимость мультиплексора 2-го уровня японской PDH с североамериканским?
15. С какой целью была разработана гибридная цифровая иерархия?
16. При условии, что разные страны используют разные законы кодирования (A-закон и  $\mu$ -закон), какая из стран берет на себя ответственность за обеспечение международной связи?

## Тесты

1. Что предполагает иерархический принцип построения цифровой сети?
  - а) число каналов какого-либо уровня должно быть больше числа каналов предыдущего уровня;
  - б) число каналов какого-либо уровня должно быть меньше числа каналов предыдущего уровня;

- в) наличие нескольких каскадов мультиплексирования;
- г) разделение и объединение потоков информации.

**2.** Какой вид мультиплексирования привел к возникновению PDH?

- а) WDM;
- б) TDM;
- в) SDM;
- г) вид мультиплексирования не имеет отношения к возникновению PDH.

**3.** Ведущие телекоммуникационные компании какой страны (стран) **НЕ** предложили свою собственную PDH?

- а) Северная Америка;
- б) Европа;
- в) Китай;
- г) Япония.

**4.** Почему битрейт мультиплексированного канала чуть выше, чем просто произведение битрейтов мультиплексируемых каналов на число каналов?

- а) за счет резервного канала, который не участвует в передаче данных;
- б) за счет дополнительных битов управления, необходимых для демультимплексирования сигнала;
- в) битрейт мультиплексированного канала не может быть выше, чем произведение битрейтов мультиплексируемых каналов на число каналов.

**5.** Чем отличаются различные PDH (европейская, североамериканская, японская)?

- а) канальной и агрегатной скоростью передачи данных;
- б) методом выравнивания;
- в) видом мультиплексирования;
- г) нет верного ответа.

**6.** Сколько кадров в одном суперкадре?

- а) 24;
- б) 12;
- в) 8;
- г) 32.

**7.** Какова частота дискретизации каждого канала?

- а) 8000 Гц;
- б) 2048 Гц;
- в) более 1 МГц;
- г) не имеет значения.

**8.** Какой битрейт у основного цифрового канала (D-0, E0, J-0)?

- а) 1,544 Мбит/с;
- б) 1,544 Кбит/с;
- в) 2,048 Мбит/с;
- г) 64 Кбит/с.

**9.** Сколько голосовых каналов в СЕРТ-иерархии первого уровня (E1)?

- а) 24
- б) 30;
- в) 64;
- г) 2048.

**10.** Что называют первичной группой РСМ, или линией передачи?

- а) 24 голосовых канала 64 Кбит/с;
- б) основной цифровой канал;
- в) ничего из этого.

**11.** Сколько уровней мультиплексирования в СЕРТ-иерархии?

- а) 3;
- б) 4;
- в) 5.

**12.** Какой битрейт на 4-м уровне мультиплексирования СЕРТ-иерархии (E4)?

- а) 1,544 Мбит/с;
- б) 34,398 Мбит/с;
- в) 34,398 Кбит/с;
- г) 139,264 Мбит/с.

**13.** Что общего между первыми двумя уровнями японской иерархии и другими иерархиями?

- а) первые два уровня идентичны СЕРТ-иерархии;

б) первые два уровня идентичны североамериканской иерархии;

в) первый уровень идентичен СЕРТ-иерархии, а второй – североамериканской;

г) первый уровень идентичен североамериканской иерархии, а второй – СЕРТ.

**14.** Допуск по агрегатному битрейту по всем видам PDH не превышает:

а) 5%;

б) 20 ppm<sup>1</sup> (1 – *part per million* (миллионная часть));

в) 30 ppm;

г) 1%.

**15.** Гибридная цифровая иерархия используется...

а) для согласование различных PDH друг с другом;

б) пропуска одного из уровней мультиплексирования;

в) оба варианты верны;

г) ничего из этого.

**16.** SDH была принята ...

а) в 1988 году;

б) 2000 году;

в) 1998 году;

г) нет подходящего ответа.

**17.** Определите соответствие между битрейтом и его обозначением SONET/SDH (два правильных ответа):

а) 155,52 Мбит/с – OC-3/STM-1;

б) 2488,32 Мбит/с – OC-48/STM-16;

в) 51,84 Мбит/с – OC-3/STM-1;

г) 39813,12 Мбит/с – OC-48/STM-16.

**18.** Что относят к свойствам SONET/SDH?

а) использование TDM;

б) сочетание оптических и электрических компонентов;

в) чрезвычайно точное регулирование времени;

г) низкую надежность.

**19.** Какой мультиплексор принимает ряд компонентных сигналов и мультиплексирует их в оптимальной агрегированный сигнал?



- а) ТМ;
- б) регенератор;
- в) ADD;
- г) коммутатор.

**20.** Какой мультиплексор позволяет формировать каналы ввода и вывода из «проходящих» каналов?

- а) ТМ;
- б) регенератор;
- в) ADD;
- г) коммутатор.

**21.** Какой мультиплексор представляет собой вырожденный случай мультиплексора, имеющего один входной канал? Такой мультиплексор используется для увеличения допустимого расстояния между узлами сети SDH путём регенерации сигналов полезной нагрузки.

- а) ТМ;
- б) регенератор;
- в) ADD;
- г) коммутатор.

**22.** Что представляет из себя структура кадра STM-N?

- а) 9 строк и 270 столбцов;
- б) 9 строк и 261 столбец;
- в)  $9 \times N$  строк и  $270 \times N$  столбцов;
- г)  $9 \times N$  строк и  $261 \times N$  столбец.

**23.** Административный блок в структуре кадра занимает:

- а) 4-ю и (при необходимости) 1–3-ю строку;
- б) 4-й и (при необходимости) 1–3-й столбец;
- в) 9 столбцов;
- г) административного блока в кадре STM-N нет.

**24.** К стандартным архитектурам SDH/SONET сетей относят:

- а) линейную и кольцевую;
- б) кольцевую и звезду;
- в) только кольцо;
- г) линейную и звезду.

- 25.** Сколько оптических волокон используется в UPSR?
- а) 1;
  - б) 2;
  - в) 3;
  - г) 4.
- 26.** Современное коммерческое SONET-оборудование способно к восстановлению через:
- а) 20–40 мс;
  - б) 1–2 с;
  - в) 20–40 с;
  - г) больше минуты.
- 27.** В каком из типов кольцевой архитектуры оптическое волокно работает только на половину своей пропускной способности?
- а) UPSR;
  - б) BLSR/2;
  - в) BLSR/4;
  - г) нет верного ответа.
- 28.** В механизме защиты 1: $N$  :
- а) используется один канал и имеется  $N$  защитных;
  - б) используется  $N$  каналов и имеется один защитный.
- 29.** В механизме защиты 1:1:
- а) активны оба оптических волокна;
  - б) одно волокно активно, а другое является резервным;
  - в) там всего одно волокно.
- 30.** В какой топологии все элементы сети подключены к центральному ядру?
- а) звезда;
  - б) кольцо;
  - в) шина.

## 4 СИНХРОНИЗАЦИЯ В ЦВОСП

### 4.1 Виды синхронизации в ЦВОСП

Синхронизация в широком смысле относится к процессу координации различных событий, которые происходят в одно и то же время. Синхронизация является незаменимым компонентом всех цифровых систем связи и имеет высокую степень сложности как при запуске, так и в установившемся состоянии. Синхронизация может потребоваться на нескольких уровнях, включая кадровую синхронизацию, сетевую синхронизацию, символьную синхронизацию, синхронизацию несущей и фазовое восстановление. Синхронизация частоты, фазы, символов и кадра выполняется на передающей стороне, однако сетевая синхронизация задействует также и приемную сторону.

Согласно сетевой модели OSI (*The Open Systems Interconnection model*), разработанной в конце 1970-х годов, выделяют различные уровни взаимодействия сетевых устройств. При этом каждый уровень выполняет определенные функции при таком взаимодействии. В таблице 4 представлена информация об уровнях модели OSI.

Синхронизация несущей, фазовое восстановление и символьная синхронизация выполняются на физическом уровне, а сетевая и кадровая синхронизации происходят как на физическом, так и на сетевом уровне.

Сетевая синхронизация требуется, когда передатчики должны быть синхронизированы с приемником путем изменения времени и частоты их передачи, чтобы гарантировать его удовлетворительную работу. К примерам можно отнести передачу от базовой станции на приемник мобильного устройства и пересечение границ шестиугольной ячейки (соты). В большинстве случаев передатчик полагается на обратный тракт от приемника для определения точности его синхронизации.

Кадровая синхронизация требуется после того, как переданная последовательность битов была обнаружена на приемнике. Последовательность битов может быть разделена на блоки (группы битов), например восьмибитные слова.

Таблица 4 – Модель OSI

Уровень		Тип дан-ных (PDU)	Функции
Хост-слой	7	Прикладной	Данные
	6	Логический	
	5	Сеансовый	
	4	Транспорт-ный	Сегменты (segment) / Диаграммы (datagram)
Медиа-слой	3	Сетевой	Пакеты (packet)
	2	Канальный	Биты (bit) Кадры (frame)
	1	Физический	Биты (bit)

Это происходит, например, при использовании блочного кода для реализации схемы прямой защиты от ошибок или если канал связи имеет временное разделение и используется несколькими пользователями. При блочном кодировании декодер должен знать

расположение границ между кодовыми словами, что необходимо для верного декодирования сообщения. При использовании канала с временным разделением для верного направления информации нужно знать расположение границ между пользователями канала.

Синхронизация несущей представляет из себя генерацию несущего синусоидального сигнала с частотой и фазой, близкой к полезному (модулированному) сигналу. Эта опорная несущая используется при выполнении операции когерентной демодуляции для восстановления полезного сигнала. Стоит отметить, что при некогерентной демодуляции синхронизация несущей не требуется.

Символьная синхронизация – это создание опорной частоты синхронизации. Генератор синхроимпульсов используется для извлечения входной последовательности символов. Кроме того, предполагается, что приемник точно знает, где начинается поступающий символ и где он заканчивается. Эта информация необходима, чтобы знать соответствующий промежуток интегрирования символа. Очевидно, если приемник интегрирует по интервалу несоответствующей длины или по интервалу, захватывающему два символа, способность к принятию точного решения будет снижаться. Символьную и фазовую синхронизации объединяет то, что обе включают создание в приемнике копии части переданного сигнала. Для фазовой синхронизации это будет точная копия несущей. Для символьной — это меандр с переходом через нуль одновременно с переходом поступающего сигнала между символами. Приемник, способный сделать это, имеет символьную синхронизацию. Однако символьная синхронизация по сравнению с фазовой синхронизацией рассматривается как более грубая, поскольку несущая частота намного выше, чем символьная скорость.

Обычно выделяют синхронизацию, направленную на данные и не направленную на данные. В первом случае заголовок передается с информационными битами в мультиплексированном формате на регулярной (периодической) основе. Биты заголовка представляют из себя информацию о синхронизации, которая извлекается приемником. Преимущества синхронизации такого типа заключаются в том, чтобы минимизировать время, необходимое для синхронизации, и улучшить ее точность. Однако к недостаткам относится

снижение пропускной способности и энергоэффективности. Во втором типе синхронизация выполняется путем обработки ухудшенного сигнала на приемной стороне для извлечения всей необходимой информации. К преимуществам относят повышенную пропускную способность и энергоэффективность, а к недостаткам – более длительное время синхронизации [82, 83].

## 4.2 Тактовая синхронизация

В основе уже упомянутой сетевой синхронизации лежит тактовая синхронизация. Тактовый сигнал также называется синхросигналом и используется для согласования операций различных цифровых схем узлов, которые участвуют в системе передачи данных. Источником тактового сигнала является задающий генератор или генератор тактовых импульсов.

Различные состояния сигнала в линии передачи называют символами.

В цифровых системах связи символы модуляции (или биты модуляции), которые необходимо передать, встраиваются в несущие импульсы и отправляются через фиксированные интервалы времени. Для того чтобы передать сигнал без искажений и расширения спектра, интервал времени должен быть равен интервалу времени передачи символов от передатчика. Обозначим временной интервал передачи символов  $T$ . Обратная величина  $1/T$  называется символьной скоростью, или скоростью манипуляции. Единица измерения символьной скорости – бод. Символьная скорость не равна скорости передачи информации, так как помимо полезного сигнала канал передачи может включать в себя служебные символы.

После прохождения через канал связи сигнал должен быть дискретизирован с той же самой символьной скоростью. Частота дискретизации полученного сигнала обычно равна  $m/T$ , где  $m$  – целое число. Кроме того, время дискретизации должно иметь фиксированный сдвиг (временную фазу) относительно времени, когда передатчик начинает передавать символы, чтобы компенсировать задержку по времени передачи данных.

Для того чтобы произвести дискретизацию сигнала, необходимо синхронизировать передающую и приемную стороны. На приемной стороне функции тактовой синхронизации выполняются в блоке с соответствующим названием (блок тактовой синхронизации). Зачастую операция по достижению тактовой синхронизации называется выделением тактовой частоты.

Реализации и характеристики тактовой синхронизации в приемниках разнообразных систем связи, например в системах с одиночной несущей частотой или с мультиплексированием с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM – *Orthogonal frequency-division multiplexing*), имеют как сходства, так и различия. Различия также существуют в реализации тактовой синхронизации в системах с одиночной несущей частотой с расширением спектра и без него.

### 4.3 Оптимальная синхронизация фаз

Рассмотрим оптимальные синхронизации фаз для каналов, наиболее часто встречающихся при передаче посредством одиночной несущей частоты.

*Канал с одиночной несущей частотой без межсимвольных помех*

Для систем с одиночной несущей частотой с частотной характеристикой канала, которая удовлетворяет критерию Найквиста, оценка максимального правдоподобия (ML – *Maximum Likelihood*) фазы сигнала является оптимальной. В таком случае отсутствуют межсимвольные помехи (ISI – *Intersymbol interference*). Канал, который удовлетворяет критерию Найквиста, имеет гарантированную полосу пропускания (CIR – *Committed Information Rate*), соответствующую функции  $\text{sinc } x$ . Для такого канала средняя оценка максимального правдоподобия фазы находится в максимуме функции  $\text{sinc } x$ , сгенерированной  $n$ -м переданным символом [82] (рисунок 38).

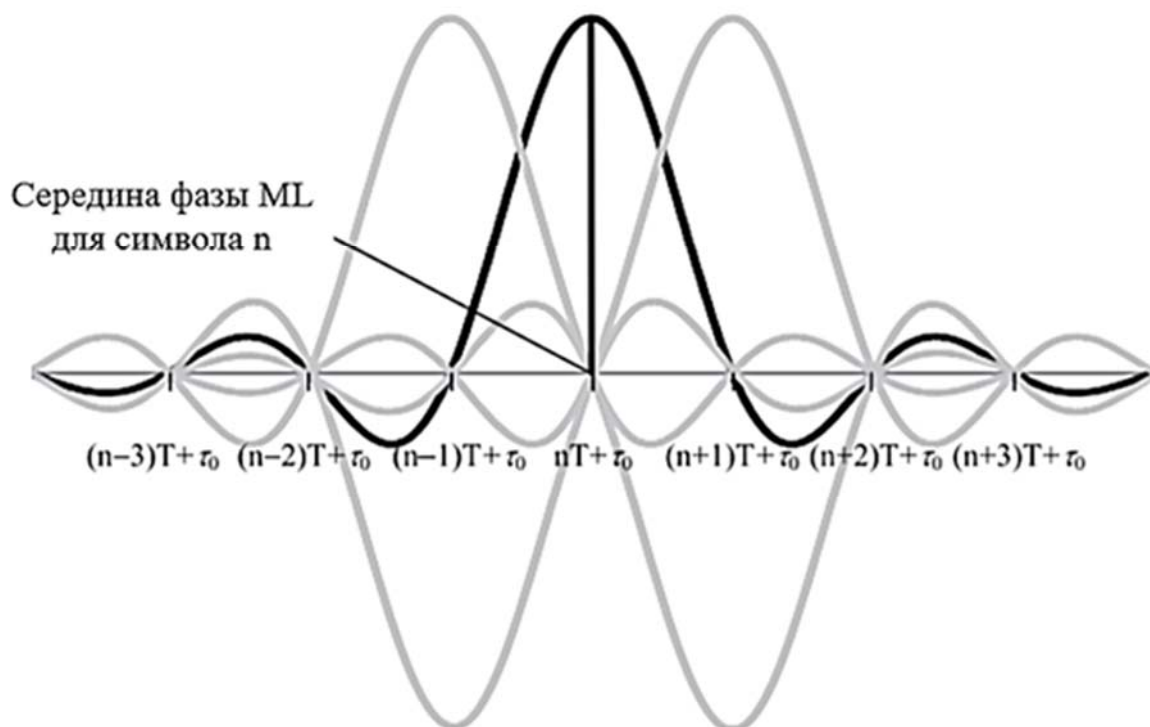


Рисунок 38 – Оптимальная фаза для T-образного сигнала через канал без межсимвольных помех

*Канал с одиночной несущей частотой с существенными межсимвольными помехами*

Для каналов с сильными линейными искажениями обычно используются эквалайзеры, которые помогают улучшить выходное отношение сигнал/шум для достижения лучших характеристик приемника. Производительность эквалайзеров символьной скорости (SRE – *Symbol Rate Equalizer*) чувствительна к фазе входных отсчетов (значений отдельного параметра сигнала в выбранный момент времени). К сожалению, для произвольных ISI-каналов не существует известного метода определения оптимальной фазы SRE.

Для уменьшения или устранения фазовой чувствительности на приемном конце в таких каналах применяются дробные эквалайзеры (FSE – *Fractionally Spaced Equalizers*) [84, 85]. В качестве входного сигнала используются отсчеты, сгенерированные с частотой дискретизации выше  $1/T$  (эта частота обычно выражается в виде  $m/T$ , где  $m$  – целое число больше 1). Поскольку такие частоты дискретизации обычно удовлетворяют теореме Котельникова – Найквиста – Шеннона, т. е. не происходит наложение сигнала в частотной области, производительность эквалайзера не чувствительна



к фазам отсчетов [86]. Таким образом, точные фазы отсчетов не имеют значения до тех пор, пока они стабильны или медленно меняются, так как FSE могут их отслеживать. Использование FSE может упростить разработку и реализацию систем тактовой синхронизации. Однако поскольку оптимальная фаза FSE не уникальна, коэффициенты FSE могут дрейфовать и в конечном итоге вызвать ухудшение производительности эквалайзера [85, 87].

#### *Синхронизация фаз DS-CDMA-сигнала*

Расширение спектра методом прямой последовательности (DSSS – *Direct-sequence Spread Spectrum*) и множественный доступ с кодовым разделением методом прямой последовательности (DS-CDMA – *Direct-sequence Code Division Multiple Access*) относятся к методам связи с использованием одиночной несущей частоты. Уникальная особенность DS-CDMA-приемников заключается в том, что они обычно реализуются в виде Rake-приемников, каждый из которых демодулирует сигналы, проходящие через канал. Поскольку DS-CDMA-приемники имеют высокий выигрыш при обработке сигнала, который достигается за счет сжатия, отношение сигнала к ISI и шуму будет значительно увеличено. В результате каждый тракт можно рассматривать как канал, заполненный аддитивным белым гауссовским шумом (AWGN – *Additive White Gaussian Noise*) с одним ответвлением. В таком случае можно реализовать ML фазовую синхронизацию.

#### *Фазовая синхронизация OFDM-сигнала*

В OFDM-системах частота дискретизации приемника  $f_s = 1/T_s$ , где  $T_s$  – это частота дискретизации OFDM-канала, которая удовлетворяет теореме Котельникова – Найквиста – Шеннона. Таким образом, регулировка фазы в этом случае не требуется.

## **4.4 Синхронизация тактовой частоты**

В большинстве случаев к синхронизации тактовой частоты предъявляют не такие строгие требования, как к синхронизации несущей частоты. Это связано с тем, что смещение несущей частоты равно несущей частоте, умноженной на относительную ошибку частоты кварцевого генератора, в то время как смещение тактовой

частоты просто определяется неточностью кварцевого генератора. Например, рассмотрим систему связи с символьной скоростью 3,84 МГц, работающую на частоте 1,9 ГГц. Если погрешность кварцевого генератора равна 10 миллионным частям (*ppm – parts per million*), ошибка тактовой частоты составляет всего 38,4 Гц, при этом ошибка несущей частоты может достигать 19 кГц. По сравнению со скоростью передачи символов ошибка тактовой частоты составляет 0,001 %, в то время как ошибка несущей частоты составляет около 0,5 %.

Из-за слабой ошибки тактовой частоты ее синхронизация зачастую достигается только при помощи схемы автоматической фазовой подстройки (*PLL – Phase Locked Loop*) частоты первого или второго порядка. Стоит отметить, что в беспроводных системах несущая и модулирующая частоты генерируются одним и тем же тактовым генератором. В таком случае смещение несущей частоты, рассчитанное блоком синхронизации частоты приемника, может быть использовано для коррекции смещения тактовой частоты. Если задействованы дополнительные повышающие и понижающие преобразования несущей частоты во время передачи, то расчетное смещение несущей частоты может не точно совпадать со смещением тактовой частоты, но все же будет хорошим приближением для последней. В таком случае можно реализовать схему автоматической подстройки тактовой синхронизации (*TLL – Timing Locked Loop*) второго порядка для компенсации остаточного сдвига частоты синхронизации.

#### *Рекомендации по реализации тактовой синхронизации*

Как уже упоминалось, блок синхронизации времени приемника обычно реализуется как TLL первого или второго порядка разновидности PLL. Как и любой PLL, TLL состоит из датчика фазы (*TPD – Timing Phase Detector*), фильтра внутри петли и автоматической регулировки уровня передачи (*TPC – Transmit Power Control*). Когда TLL реализуется в виде схемы второго порядка, удастся добиться синхронизации как по фазе, так и по частоте.

TLL управляется ошибкой по фазе, то есть разницей между ожидаемым значением фазы и тем значением, которое обнаруживает TPD. Синхронизация тактовой частоты и фазы может быть

реализована совместно, но оптимизирована независимо. Целью синхронизации тактовой частоты является долгосрочное отслеживание среднего значения символьной скорости передатчика. В то же время фаза может быть скорректирована на основе краткосрочной смены канала. Такие корректировки не должны вызывать резкого изменения тактовой частоты. TLL может исполняться с аналоговыми, цифровыми или смешанными компонентами. Изначально TLL были реализованы в аналоговой или смешанной форме, но в настоящее время они в основном переходят полностью на цифровые компоненты.

Высокоуровневая структурная схема TLL [82] представлена на рисунке 39.

Как показано на рисунке 39, импульсный модулятор символьной скорости данных генерирует отсчеты  $y(nT + \tau)$ , где время дискретизации  $nT + \tau$  контролируется ТРС. Если в качестве входного сигнала используется аналоговый сигнал, то импульсный модулятор создается в качестве АДС. В другом случае, когда схема имеет только цифровую реализацию, на вход будут подаваться отсчеты на скорости, которая может отличаться от  $1/T$ . В данной схеме используется импульсный модулятор символьной скорости. ТРД в TLL принимает отсчеты от импульсного генератора для того, чтобы сгенерировать погрешность синхронизации  $\Delta\tau$ , которая определяет фазовую разницу между  $\tau$  и искомой задержкой дискретизации  $\tau_0$ . ТРД характеризуется входным усилением  $k_d$ . Основные различия между TLL в разнотипных системах связи заключаются в реализации ТРД.

Фазовые ошибки, генерируемые ТРД, поступают в фильтр внутри петли, назначение которого является таким же, как и у петлевого фильтра в двойном PLL. Коэффициент  $\alpha_{22}$  следует выбирать исходя из требуемого максимального смещения частоты, при котором должен работать TLL. Регистр D2 содержит предполагаемое смещение частоты синхронизации. Значение  $\alpha_2 = \alpha_{21} + \alpha_{22}$  определяет петлевое усиление второго порядка.

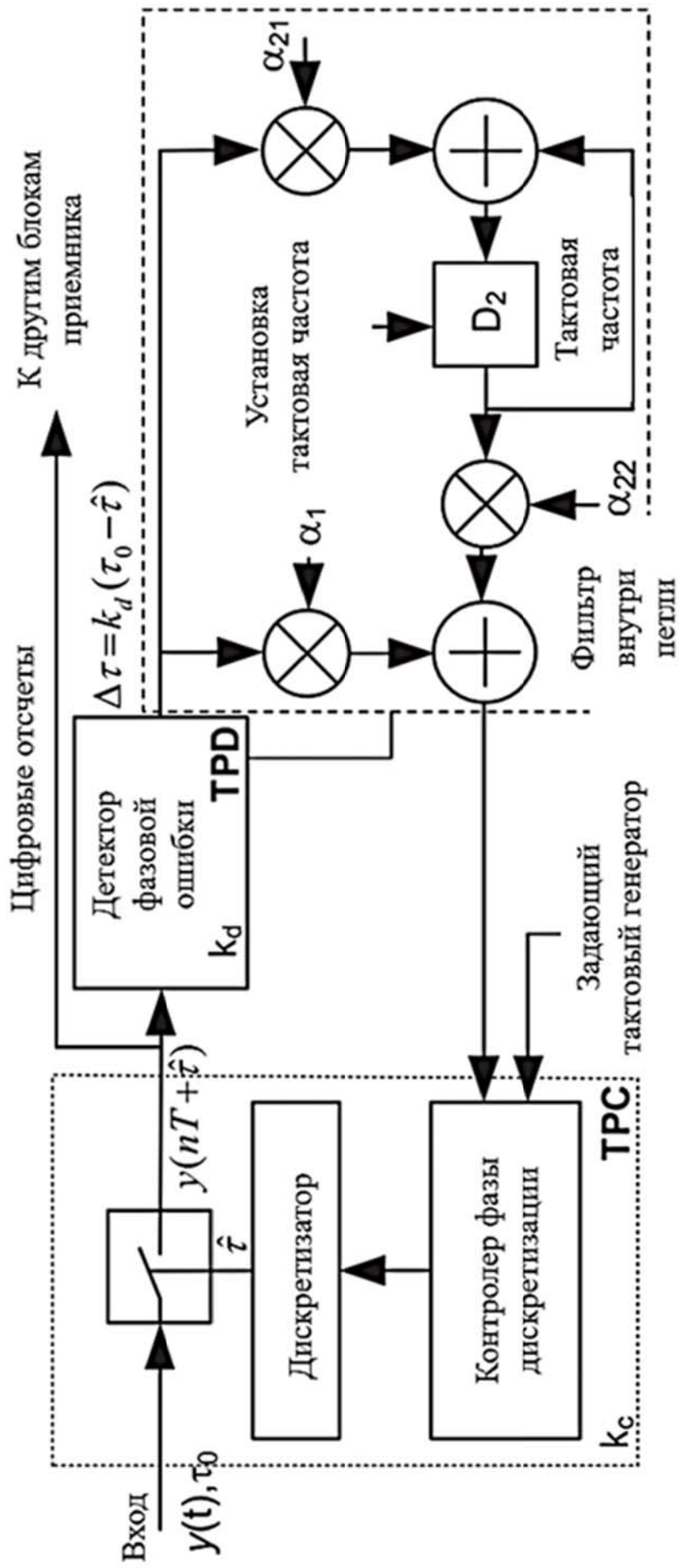


Рисунок 39 – Высокоуровневая структурная схема TPL

## Вопросы для самоконтроля

1. Что понимается под синхронизацией?
2. Сколько уровней в системе OSI?
3. На каких двух уровнях происходят кадровая, символьная, сетевая синхронизации и синхронизация несущей?
4. Чем определяется смещение тактовой частоты?
5. Чем определяется смещение несущей частоты?
6. За счет чего осуществляется синхронизация тактовой частоты?
7. Чем отличается PLL от TLL?
8. Что определяет значение  $\alpha_2$  в высокоуровневой схеме TLL?

## Тесты

1. Выберите уровень системы OSI, который НЕ относится к хост-слоям:
  - а) прикладной;
  - б) логический;
  - в) транспортный;
  - г) сетевой.
2. Выберите уровень систем OSI, который НЕ относится к медиа-слоям:
  - а) физический;
  - б) канальный;
  - в) сетевой;
  - г) все относятся к медиа-слоям.
3. Установите соответствия:
  - а) сетевая синхронизация;
  - б) символьная синхронизация;
  - в) синхронизация несущей;
  - г) кадровая синхронизация.
  - 1) использование блочного кода для реализации схемы прямой защиты от ошибок;

2) передача данных от базовой станции на приемник мобильного устройства;

3) выполнение операции когерентной демодуляции для восстановления когерентности;

4) создание опорной частоты синхронизации.

**4.** Что может являться источником тактового сигнала?

а) батарейка;

б) задающий генератор;

в) генератор переменного тока;

г) всё из вышеперечисленного.

**5.** В чем измеряется символьная скорость?

а) м/с;

б) бит/с;

в) бод;

г) бод/с.

**6.** Выделение тактовой частоты – это:

а) операция по определению тактовой частоты;

б) операция по заданию тактовой частоты;

в) операция по достижению тактовой синхронизации;

г) операция по отделению тактовой частоты от других частот.

**7.** Для канала, в котором отсутствуют межсимвольные помехи, средняя оценка максимального правдоподобия находится:

а) в минимуме функции  $\text{sinc } x$ ;

б) максимуме функции  $\sin x$ ;

в) максимуме функции  $\text{sinc } x$ ;

г) минимуме функции  $\sin(x)$ .

**8.** Какое устройство помогает улучшить выходное отношение сигнал/шум для достижения лучших характеристик приемника?

а) генератор;

б) мультиплексор;

в) дискретизатор;

г) эквалайзер.

**9.** Расширение спектра методом прямой последовательности (DSSS) и множественный доступ с кодовым разделением методом

прямой последовательности (DS-CDMA) относятся к методам связи с использованием:

- а) одной несущей частоты;
- б) нескольких несущих частот.

**10.** Сопоставьте термины и определения:

- а) тактовая частота;
- б) несущая частота.

- 1) частота синхронизирующих импульсов схемы;
- 2) частота сигнала, которая подвергается модуляции.

**11.** К какой из частот (несущей или тактовой) в большинстве случаев предъявляются более строгие требования?

- а) тактовой;
- б) несущей.

**12.** Для чего используют TLL вместо PLL?

- а) для синхронизации тактовой частоты;
- б) для синхронизации несущей частоты;
- в) для компенсации остаточного сдвига частоты синхронизации;
- г) нет верного ответа.

**13.** На основе каких компонентов может быть реализован TLL?

- а) аналоговых;
- б) цифровых;
- в) смешанных;
- г) все ответы верны.

**14.** В чем заключаются основные различия в реализации TLL в разных системах связи?

- а) в наличии или отсутствии АЦП;
- б) в наличии или отсутствии ЦАП;
- в) в реализации TRD (датчик фазы);
- г) в реализации TRC (автоматическая регулировка уровня передачи).

**15.** Что является петлевым усилением второго порядка?

- а)  $\alpha_2$ ;
- б)  $\alpha_{21}$ ;
- в)  $\alpha_{22}$ .

## Список обозначений и сокращений

- АЦП – аналого-цифровое преобразование
- ВОСП – волоконно-оптическая система передачи
- РЧ – радиочастотный
- ЦАП – цифроаналоговый преобразователь
- ЦВОСП – цифровые волоконно-оптические системы передачи
- A/D – Analog/Digital – аналого-цифровые
- ADD – Add and Drop Multiplexer – мультиплексор ввода-вывода
- ADPCM – Adaptive Differential Pulse Code Modulation – адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (АДИКМ)
- APD – Avalanche Photodiode – лавинный фотодиод
- APS – Automatic Protection Switching – автоматическое защитное переключение
- AT&T – American Telephone and Telegraph – американская телефонно-телеграфная компания
- AWGN – Additive White Gaussian Noise – аддитивный белый гауссовский шум
- BER – Bit Error Ratio – коэффициент битовых ошибок
- BLSR/2 – Two Fiber Bi-directional Line Switched Ring – двухволоконное двунаправленное кольцо с коммутацией трактов
- CAS – Channel Associated Signaling – сигнализация по выделенному каналу
- ССИТТ – фр. Comite Consultatif International Telephonique et Telegraphique – международный консультационный комитет по телефонии и телеграфии (МККТТ) или сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (ССЭ МСЭ). С 1995 года официальное английское название – ITU (англ. International Telecommunication Union – Telecommunication sector) – международный союз электросвязи (МСЭ)
- CCS – Common Channel Signaling – сигнализация по общему каналу
- CIR – Committed Information Rate – гарантированная полоса пропускания
- DFB – Distributed Feedback Laser – лазер с распределённой обратной связью



DS-CDMA – Direct-sequence Code Division Multiple Access – множественный доступ с кодовым разделением каналов методом прямой последовательности

DSSS – Direct-sequence Spread Spectrum – метод расширения спектра методом прямой последовательности

DSP – Digital Signal Processing – цифровая обработка сигналов

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – плотное мультиплексирование с разделением по длине волны

EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier – оптический усилитель на основе волокна легированного эрбием

FDM – Frequency Division Multiplexing – частотное разделение каналов

FMF – Few Mode Fiber – маломодовое волокно

FSE – Fractionally Spaced Equalizers – дробные эквалайзеры

G-PON – Gigabit-Passive Optical Network – гигабитная пассивная оптическая сеть

ISI – Intersymbol interference – межсимвольные помехи

ITU – International Telecommunication Union – международный союз электросвязи

I/Q – In-phase/Quadrature – синфазная/квадратурная составляющие сигнала

LED – Light Emittig Diode – светодиод

LO – Local Oscillator – гетеродин

MIMO – Multiple Input Multiple Output – метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, в котором передача данных и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн

ML – Maximum Likelihood – метод максимального правдоподобия

MMF – Multimode fiber – многомодовое волокно

NG-SDH – Next Generation Synchronous Digital Hierarchy – цифровая иерархия следующего поколения

NIT – Nippon Telegraph and Telephone – телекоммуникационная компания Японии

NNI – Network Node Interface – интерфейс сетевого узла

NRZ – Non Return to Zero – метод кодирования без возврата к нулю

SDH – Synchronous Digital Hierarchy – синхронная цифровая иерархия

SDM – Space Division Multiplexing – уплотнение каналов с пространственным разделением

SMF – Single Mode Fiber – одномодовое оптическое волокно

SNR – Signal to Noise Ratio – соотношение сигнал/шум

SONET – Synchronous Optical Network – синхронная оптическая сеть

STM – Synchronous Transport Module – синхронный транспортный модуль

OFDM – Orthogonal frequency-division multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов

OOK – On-Off-Keying – обозначает простейшую форму модуляции с амплитудно-сдвиговой манипуляцией

OSI – The Open Systems Interconnection model – модель взаимодействия открытых систем

OTDM – Optical Time Division Multiplexing – оптическое мультиплексирование с разделением по времени

OTN – Optical Transport Network – оптическая транспортная сеть

ppm – parts per million – частей в миллионе

PCM – Pulse-code modulation – импульсно-кодовая модуляция (ИКМ)

PDH – Plesiochronous Digital Hierarchy – плезиохронная цифровая иерархия

PDM – Polarization Division Multiplexing – мультиплексирование с разделением по поляризации

PIN-фотодиод – positive-intrinsic-negative – фотодиод, построенный на основе технологии слоев с положительной, собственной и отрицательной проводимостью

PLL – Phase Locked Loop – схема автоматической фазовой подстройки

PM – Phase Modulation – фазовая модуляция

POTS – Plain old telephone service – устаревшие телефонные службы – название телефонной сети (в сравнении с «новыми» технологиями VoIP, ATM, ISDN)

QAM – Quadrature Amplitude Modulation – квадратурная амплитудная модуляция  
RZ – Return to Zero – код с возвращением к нулю  
SDCC – Synchronous Digital Cross Connect – синхронное цифровое кросс-соединение  
SMF – Single Mode Fiber – одномодовое волокно  
SRE – Symbol Rate Equalizer – эквалайзер символьной скорости  
TDM – Time Division Multiplexing – мультиплексирование с разделением по времени  
TLL – Timing Locked Loop – схема автоматической подстройки тактовой синхронизации  
TM – Terminal Multiplexer – терминальный мультиплексор  
TPC – Transmit Power Control – контроль уровня передачи  
TPD – Timing Phase Detector – детектор фазовой синхронизации  
TW – Transmission Window – окно прозрачности  
UPSR – Unidirectional Path Switched Ring – однонаправленное кольцо с коммутацией трактов  
WDM – Wavelength Division Multiplexing – мультиплексирование с разделением по длине волны

## Литература

1. Holzmann G. J., Pehrson B. The early history of data networks. IEEE Computer Society Press, 1995.
2. Koenig D. Telegraphs and telegrams in revolutionary France // The Scientific Monthly. 1944. Vol. 59, No 6. P. 431–437.
3. Fibre Optic Communications: An Overview / P. Sharma [et al.] // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2013. Vol. 3, No 5. P. 474–479.
4. Jones A. Historical Sketch of the Electric Telegraph: Including Its Rise and Progress in the United States. New York: GP Putnam, 1852.
5. Patent No 174,465 U.S. / A. G. Bell. 1876.
6. Agrawal G. P. Optical communication: its history and recent progress // Optics in our time. Springer, Cham, 2016. P. 177–199.
7. An introduction to fiber optics / A. A. Ghatak [et al.]. Cambridge university press, 1998.
8. Joindot M., Gosselin S. Optical fiber transport systems and networks: fundamentals and prospects // Comptes Rendus Physique. 2008. – Vol. 9, No 9–10. P. 914–934.
9. Charlet G., Bigo S. Upgrading WDM submarine systems to 40-Gbit/s channel bitrate // Proceedings of the IEEE. 2006. Vol. 94, No 5. P. 935–951.
10. Arumugam M. Optical fiber communication – An overview // Pramana. 2001. Vol. 57, No 5. P. 849–869.
11. 172 Tb/s C+ L band transmission over 2040 km strongly coupled 3-core fiber / G. Rademacher [et al.] // Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2020. P. Th4C. 5.
12. Lowest-ever 0.1419-dB/km loss optical fiber / Y. Tamura [et al.] // Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2017. P. Th5D. 1.
13. Massa N. Fiber Optic Telecommunication // Fundamentals of Photonics. Springfield Technical Community College, 2008. P. 293–347.
14. Smith D. R. Digital transmission systems. Springer science & business media, 2012.
15. Recommendation C. Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies // ITU. 1988.

16. Dent P., Aboagye A. G. 726 Adaptive Differential Pulse Code Modulation (ADPCM) on the TMS320C54xDSP.
17. Manual I. Optical fibers, cables and systems. 2009.
18. Mazur M. High Spectral Efficiency Fiber-Optic Transmission Systems Using Pilot Tones. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2018.
19. Fibre Optic Communications: An Overview / P. Sharma [et al.] // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2013. Vol. 3, No 5. P. 474–479.
20. Panish M. B. Heterostructure injection lasers // Proceedings of the IEEE. 1976. Vol. 64, No 10. P. 1512–1540.
21. High-speed 850 nm VCSELs operating error free up to 57 Gbit/s / P. Westbergh [et al.] // Electronics Letters. 2013. Vol. 49, No 16. P. 1021–1023.
22. Ultra-high bandwidth integrated lithium niobate modulators with record-low  $V\pi$  / M. Zhang [et al.] // Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2018. P. Th4A. 5.
23. Low-loss high-speed silicon IQ modulator for QPSK/DQPSK in C and L bands / K. Goi [et al.] // Optics express. 2014. Vol. 22, No 9. P. 10703–10709.
24. Ultra-high bandwidth InP IQ modulator co-assembled with driver IC for beyond 100-GBd CDM / Y. Ogiso [et al.] // Optical Fiber Communication conference. Optical Society of America, 2018. P. Th4A. 2.
25. All-plasmonic Mach–Zehnder modulator enabling optical high-speed communication at the microscale / C. Haffner [et al.] // Nature Photonics. 2015. Vol. 9, No 8. P. 525–528.
26. Low-loss plasmon-assisted electro-optic modulator / C. Haffner [et al.] // Nature. 2018. Vol. 556, No 7702. P. 483–486.
27. Encyclopedia of laser physics and technology / R. Paschotta [et al.]. Berlin : Wiley-vch, 2008. Vol. 1.
28. Bhowmik T., Maity A. Design and analysis of broadband single-mode photonic crystal fiber for transmission windows of the telecom wavelengths // Optik. 2017. Vol. 139. P. 366–372.
29. Schubert C., Ludwig R., Weber H. G. High-speed optical signal processing using semiconductor optical amplifiers // Ultrahigh-speed

optical transmission technology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. P. 103–140.

30. Types of Optical Amplifiers. , Lecture 23: Introduction to Optical Amplifiers / OPTI 500 C. Spring, 2011.

31. Massa N. Fiber optic telecommunication // Fundamentals of photonics. 2000. P. 298.

32. Bylanski P., Ingram D. G. W. Digital transmission systems. 1976. 431 p.

33. Smith D. R. Digital Transmission Networks // Digital Transmission Systems. Springer, Boston, MA, 2004. P. 745–798.

34. Taylor V. L. Optimum pcm synchronization (Technique for optimum synchronization of pulse code modulated/PCM/ information) // National Telemetry Conference, Houston, TEX. 1965. P. 46–49.

35. Williard M. W. Refinements on analysis of PCM synchronization. International Foundation for Telemetry, 1966.

36. Barker R. H. Group synchronizing of binary digital sequences // Communication theory. 1953. P. 273–287.

37. Fraser A. G. Early experiments with asynchronous time division networks // IEEE Network. 1993. Vol. 7, No 1. P. 12–26.

38. Kherici C., Kandouci M. Contribution to the performances study of Optical Time Division Multiplexing OTDM and OTDM/WDM hybrid multiplexing at 160 Gbps // International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS). IEEE, 2019. P. 1–4.

39. OTDM to WDM format conversion based on cascaded SHG/DFG in a single PPLN waveguide / S. Liu [et al.] // Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference. IEEE, 2010. P. 1–3.

40. Petrillo K. G., Foster M. A. Full 160-Gb/s OTDM to 16x10-Gb/s WDM conversion with a single nonlinear interaction // Optics express. 2013. Vol. 21, No 1. P. 508–518.

41. ITU-T G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.

42. 1.28 Tbit/s single-polarisation serial OOK optical data generation and demultiplexing / H. C. H. Mulvad [et al.] // Electronics Letters. 2009. Vol. 45, No 5. P. 280–281.

43. 160 Gbit/s all-optical time-division demultiplexing utilising modified multiple-output OTDM demultiplexer (MOXIC) / K. Uchiyama [et al.] // *Electronics Letters*. 2002. Vol. 38, No 20. P. 1190–1191.
44. Mishra A., Mishra P. Optical communication with time division multiplexing (OTDM) and hybrid WDM/OTDM PON // *System*. 2014. Vol. 3. P. 4.
45. Kamatani O., Kawanishi S. Prescaled timing extraction from 400 Gb/s optical signal using a phase lock loop based on four-wave-mixing in a laser diode amplifier // *IEEE Photonics Technology Letters*. 1996. Vol. 8, No 8. P. 1094–1096.
46. 160 Gbit/s field transmission over 116 km standard single mode fibre using 160 Gbit/s OTDM and 40 Gbit/s ETDM demultiplexer / U. Feiste [et al.] // *IEE Proceedings-Optoelectronics*. 2001. Vol. 148, No 4. P. 171–175.
47. Nakazawa M., Yamamoto T., Tamura K. R. 1.28 Tbit/s–70 km OTDM transmission using third-and fourth-order simultaneous dispersion compensation with a phase modulator // *Electronics letters*. 2000. Vol. 36, No 24. P. 2027–2029.
48. 3 Tbit/s (160 Gbit/s/spl times/19 channel) optical TDM and WDM transmission experiment / S. Kawanishi [et al.] // *Electronics Letters*. 1999. Vol. 35, No 10. P. 826–827.
49. 320 Gb/s single-polarization OTDM transmission over 80 km standard transmission fiber / A. I. Siahlo [et al.] // *Optical Fiber Communication Conference*. Optical Society of America, 2005. P. OFF3.
50. Low-penalty 5x320 Gbit/s (1.6 Tbit/s) WDM DPSK transmission over 525 km using time-domain optical Fourier transformation / P. Guan [et al.] // *35th European Conference on Optical Communication*. IEEE, 2009. P. 1–2.
51. Advanced space division multiplexing technologies for optical networks / W. Klaus [et al.] // *Journal of Optical Communications and Networking*. 2017. Vol. 9, No 4. P. C1–C11.
52. Winzer P. J., Foschini G. J. MIMO capacities and outage probabilities in spatially multiplexed optical transport systems // *Optics express*. 2011. Vol. 19, No 17. P. 16680–16696.

53. Reception of mode and polarization multiplexed 107-Gb/s CO-OFDM signal over a two-mode fiber / A. Li [et al.] // Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2011. P. PDPB8.
54. Transmission at  $2 \times 100$  Gb/s, over two modes of 40km-long prototype few-mode fiber, using LCOS-based mode multiplexer and demultiplexer / M. Salsi [et al.] // National Fiber Optic Engineers Conference. Optical Society of America, 2011. P. PDPB9.
55. Ultra-low-crosstalk multi-core fiber feasible to ultra-long-haul transmission / T. Hayashi [et al.] // National Fiber Optic Engineers Conference. Optical Society of America, 2011. P. PDPC2.
56. 109-Tb/s ( $7 \times 97 \times 172$ -Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber / S. Jun [et al.] // National Fiber Optic Engineers Conference. 2011.
57. Shieh W. High spectral efficiency coherent optical OFDM for 1 Tb/s Ethernet transport // Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2009. P. OWW1.
58. Richardson D. J., Fini J. M., Nelson L. E. Space-division multiplexing in optical fibers // Nature photonics. 2013. Vol. 7, No 5. P. 354–362.
59. Ultra-high-density spatial division multiplexing with a few-mode multicore fibre / R. G.H. Van Uden [et al.] // Nature Photonics. 2014. Vol. 8, No 11. P. 865–870.
60. Mode coupling and its impact on spatially multiplexed systems / K. P. Ho [et al.] // Optical Fiber Telecommunications VI. 2013. Vol. 17. P. 1386–1392.
61. Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent  $6 \times 6$  MIMO processing / R. Ryf [et al.] // National Fiber Optic Engineers Conference. Optical Society of America, 2011. P. PDPB10.
62. Penalties from in-band crosstalk for advanced optical modulation formats / P. J. Winzer [et al.] // European Conference and Exposition on Optical Communications. Optical Society of America, 2011. P. Tu. 5. B. 7.
63. 109-Tb/s ( $7 \times 97 \times 172$ -Gb/s SDM/WDM/PDM) QPSK transmission through 16.8-km homogeneous multi-core fiber / S. Jun [et al.] // National Fiber Optic Engineers Conference. 2011.



64. 19-core fiber transmission of  $19 \times 100 \times 172$ -Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/s / J. Sakaguchi [et al.] // Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2012. P. PDP5C. 1.
65. 1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4-b/s/Hz aggregate spectral efficiency / H. Takara [et al.] // European Conference and Exhibition on Optical Communication. Optical Society of America, 2012. P. Th. 3. C. 1.
66. 2.15 Pb/s transmission using a 22 core homogeneous single-mode multi-core fiber and wideband optical comb / B. J. Puttnam [et al.] // European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2015. P. 1–3.
67. 2.05 Peta-bit/s super-nyquist-WDM SDM transmission using 9.8-km 6-mode 19-core fiber in full C band / D. Soma [et al.] // European Conference on Optical Communication (ECOC). IEEE, 2015. P. 1–3.
68. Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber / T. Hayashi [et al.] // Optics express. 2011. Vol. 19, No 17. P. 16576–16592.
69. Mizuno T., Miyamoto Y. High-capacity dense space division multiplexing transmission // Optical Fiber Technology. 2017. Vol. 35. P. 108–117.
70. CCITT Blue Book. General Aspects of Digital Transmission Systems, Terminal Equipments. Geneva: ITU, 1989. Vol. 1114.
71. CCITT Blue Book. Digital Networks, Digital Sections and Digital Line Systems. Geneva: ITU, 1989. Vol. III.5.
72. Babatunde O., Mbarouk S. A review of Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH) and Synchronous Digital Hierarchy (SDH) // arXiv preprint arXiv:1407.6112. 2014.
73. Jyothirmai N., Valli R. M., Krishna A. R. SDH and its future trends // Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng. 2012. Vol. 1, No 6. P. 74–78.
74. Ballart R., Ching Y. C. SONET: now it's the standard optical network // IEEE Communications Magazine. 2002. Vol. 40, No 5. P. 84–92.
75. Keiser G. E. A review of WDM technology and applications // Optical Fiber Technology. 1999. Vol. 5, No 1. P. 3–39.

76. Kartalopoulos S. V. Understanding SONETSDH and ATM: communications networks for the next millennium. IEEE press, 1999.
77. Palle A. V. SDH (Synchronous Digital Hierarchy) & Its Architecture // IJSRD–International Journal for Scientific Research & Development. 2013. Vol. 1, No 7. P. 1337–1381.
78. New transport services for next-generation SONET/SDH systems / D. Cavendish [et al.] // IEEE Communications Magazine. 2002. Vol. 40, No 5. P. 80–87.
79. Manke S., Khare K., Sapre S. D. 100Mbps Ethernet data transmission over SDH networks using Cross Virtual Concatenation // 16th IEEE International Conference on Networks. IEEE, 2008. P. 1–6.
80. CCITT Blue Book. General Aspects of Digital Transmission Systems; Terminal Equipment. Geneva: ITU, 1989. Vol. III.4.
81. Wu T. H., Lau R. C. A class of self-healing ring architectures for SONET network applications // IEEE Transactions on Communications. 1992. Vol. 40, No 11. P. 1746–1756.
82. Ling F. Synchronization in digital communication systems. Cambridge University Press, 2017. 379 p.
83. Grami A. Introduction to digital communications. Academic Press, 2015. 604 p.
84. Proakis J. G. Spread spectrum signals for digital communications // Wiley Encyclopedia of Telecommunications. 2003.
85. Gitlin R. D., Hayes J. F., Weinstein S. B. Data communications principles. Springer Science & Business Media, 2012.
86. Gitlin R. D., Weinstein S. B. Fractionally-spaced equalization: an improved digital transversal equalizer // Bell System Technical Journal. 1981. Vol. 60, No 2. P. 275–296.
87. Franks L. Carrier and bit synchronization in data communication—a tutorial review // IEEE Transactions on Communications. 1980. Vol. 28, No 8. P. 1107–1121.

**Перин Антон Сергеевич**  
**ОПТИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ**  
**СИСТЕМЫ: ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ**  
**И СИНХРОНИЗАЦИИ**  
Учебное пособие

Подписано в печать 03.09.2021. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 6,98. Тираж 150 экз. Заказ № 210.

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники.

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Тел. (3822) 533018.