

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра телекомунікаційних технологій

МУЛЬТИПЛЕКСНІ ТЕХНОЛОГІЇ
НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ПО ВИВЧЕННЮ ДИСЦИПЛІНИ

напряму підготовки: «Телекомунікації»
освітньо-кваліфікаційного рівня: бакалавр
спеціальності: ТСМ

Київ – 2015

1 ЧАСТОТНОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ И РАЗДЕЛЕНИЕ КАНАЛОВ

Формирование группового тракта системы с ЧРК; принципы построения аппаратуры ЧРК; основные характеристики групповых сообщений; искажения в групповых трактах систем передачи с ЧРК.

1.1 Формирование группового тракта системы с ЧРК

При частотном разделении каналов для передачи данных различных источников сообщений используются определенные поддиапазоны частот. Функциональная схема простейшей системы многоканальной связи с частотным разделением каналов (ЧРК) представлена на рисунке 1.1.

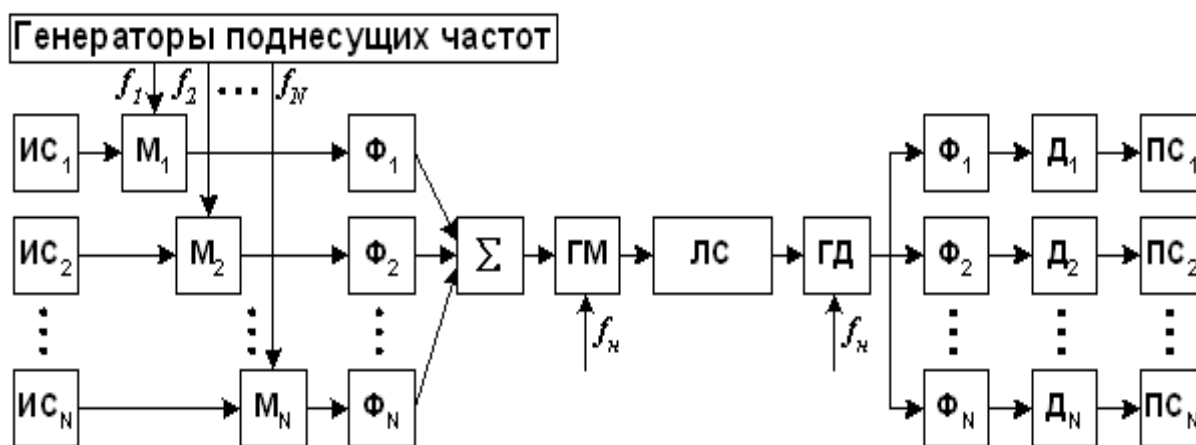


Рисунок 1.1 – Функциональная схема СЭС с ЧРК

Основные этапы образования спектра $A_{\Sigma}(f)$ группового сигнала показаны на рисунке 1.2. Пусть в СЭС осуществляется одновременная работа N корреспондентов. В соответствии с передаваемыми сообщениями первичные сигналы от источников сообщений, имеющие энергетические спектры $A_1(f)$ $A_2(f)$... $A_N(f)$ модулируют поднесущие частоты f_k каждого канала.

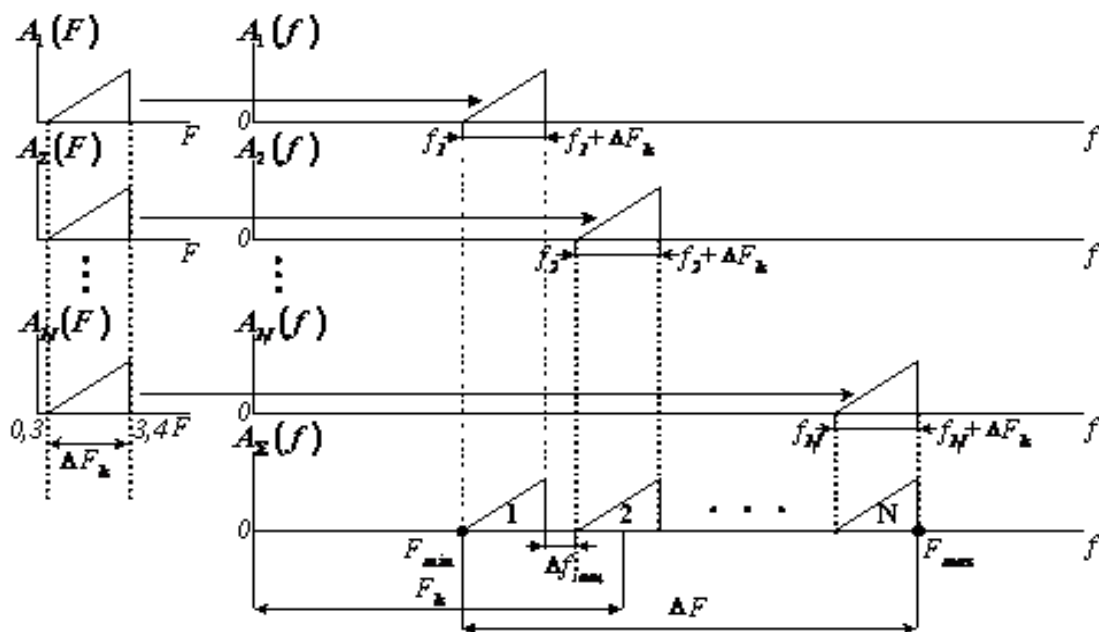


Рисунок 1.2 – Формирование группового спектра при ЧРК

Наиболее распространенный при ЧРК вариант - однополосная амплитудная модуляция. Полученные на выходе полосовых фильтров $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N$ каналные сигналы суммируются, и их совокупность $A_\Sigma(f)$ поступает на групповой модулятор. Здесь спектр $A_\Sigma(f)$ с помощью колебания несущей частоты f_n переносится в область частот, отведенную для передачи данной группы каналов, т. е. групповой сигнал преобразуется в так называемый линейный сигнал, передаваемый по линии связи – кабелю, радио, радиорелейной, спутниковой линии связи. При этом может использоваться любой вид модуляции. На приемном конце осуществляется вся совокупность обратных преобразований. Групповым демодулятором линейный сигнал преобразуется в групповой, из которого с помощью фильтров выделяются каналные сигналы. С помощью детекторов каналные сигналы преобразуются в первичные сигналы поступающие к получателям.

Полезными продуктами преобразования (модуляции) являются верхняя и нижняя боковые полосы. Для восстановления сигнала на приеме на вход демодулятора достаточно подать несущую частоту (ω_n) и одну из боковых полос.

В многоканальных системах передачи с частотным разделением каналов (МСП-ЧРК) по каналу передается только сигнал одной боковой полосы, а несущая частота берется от местного генератора. Таким образом, на выходе каждого каналного модулятора включается полосовой фильтр с полосой пропускания $\Delta\omega = \Omega_B - \Omega_n = 3,1$ кГц. Спектры $G_1(\omega), G_2(\omega) \dots G_N(\omega)$ после транспонирования (переноса) на различные частотные интервалы и инвертирования (эта операция в принципе необязательна, но обычно выполняется для упрощения оборудования) складываются и образуют групповой спектр $G_{гр}(\omega)$.

С целью уменьшения влияния соседних каналов (уменьшения переходных помех) обусловленного неидеальностью АЧХ фильтров, между спектрами сигнальных сообщений вводятся защитные интервалы. Для каналов ТЧ они равны 0,9 кГц. Таким образом, ширина полосы канала ТЧ с учётом защитного интервала равна 4 кГц (рисунок 1.3)

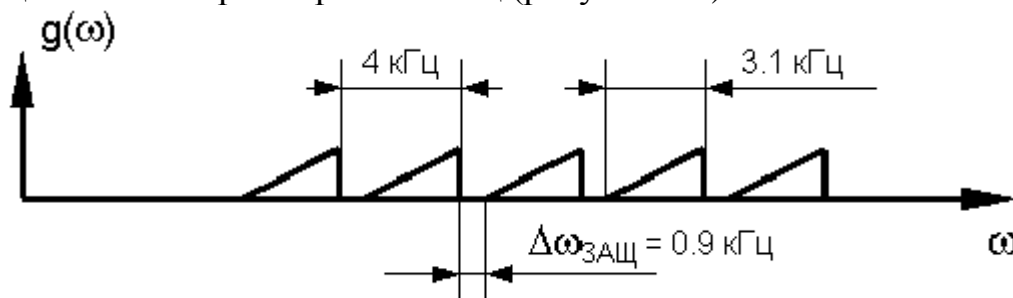


Рисунок 1.3 – Спектр группового сигнала с защитными интервалами

1.2 Принципы построения аппаратуры ЧРК

В системах ЧРК с числом каналов 12 и более реализуется принцип многократного преобразования частоты. В основу построения многоканальной системы положен стандартный канал тональной (ТЧ). В соответствии с рекомендациями МСЭ оконечное оборудование (включающее аппаратуру объединения и разделения каналов) строится с таким расчётом, чтобы на каждом этапе преобразования частоты с помощью унифицированных блоков формировались всё более и более укрупнённые группы каналов ТЧ. Причём в любой группе число каналов кратно 12.

Вначале каждый из каналов ТЧ "привязывается" к той или иной 12-канальной группе, называемой первичной группой (ПГ). Разнесение сигналов 12 различных телефонных сообщений по спектру (формирование ПГ) осуществляется с помощью индивидуального преобразования частоты в стандартном 12-канальном блоке. Эти блоки обеспечивают как прямую, так и обратную связь в каждом из 12 дуплексных каналов (рисунок 1.4, а).

Каждый канал содержит следующие индивидуальные устройства: на передаче ограничитель амплитуд ОА, модулятор М и полосовой фильтр ПФ; на приёме полосовой фильтр ПФ, демодулятор ДМ, фильтр нижних частот ФНЧ и усилитель низкой частоты УНЧ.

Для преобразования исходного сигнала на модуляторы и демодуляторы каждого канала подаются несущие частоты, кратные 4 кГц.

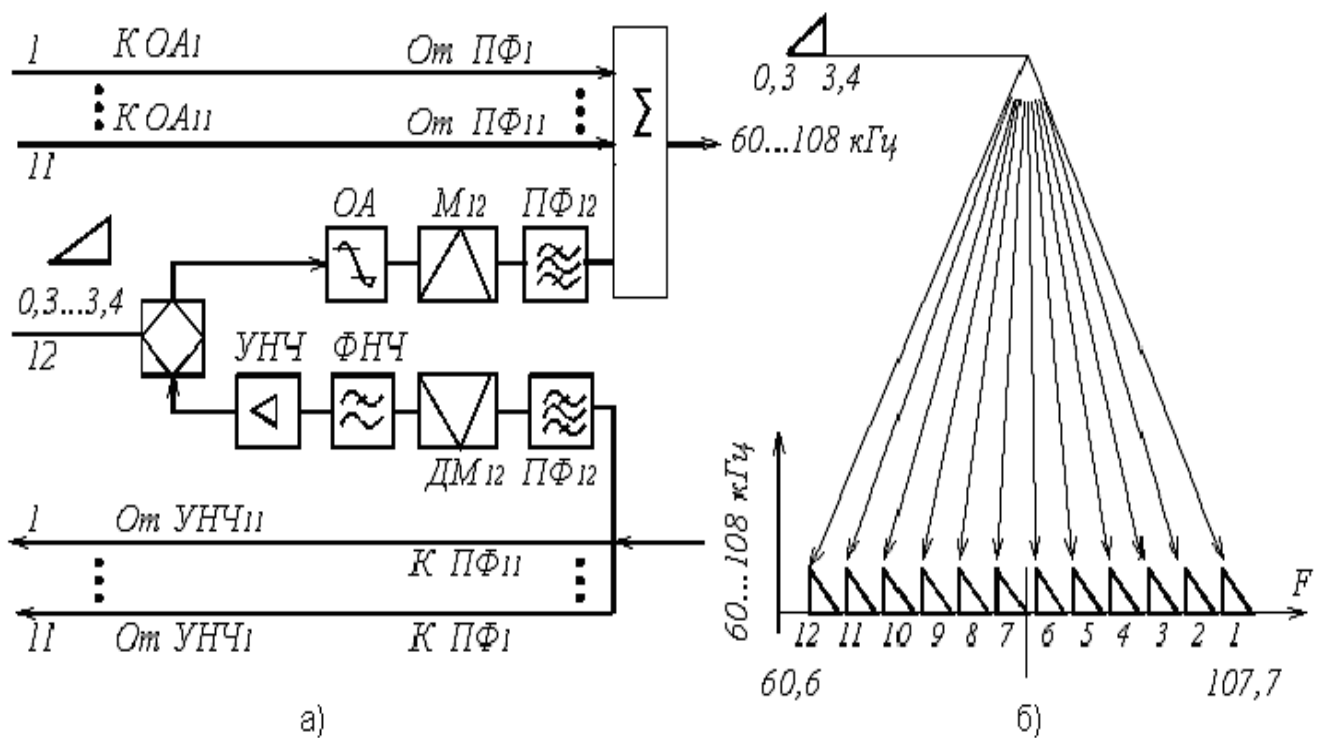


Рисунок 1.4 – Структурная схема блока индивидуального преобразования (а), схема формирования первичной группы (б) и спектр группового сигнала ПГ (б)

В приведенном варианте формирования ПГ использован принцип однократного преобразования спектра канала ТЧ (рисунок 1.5, а)

Поскольку индивидуальное оборудование во всех 12 каналах однотипно, на данном рисунке приведены лишь устройства, относящиеся к одному каналу (двенадцатому). Как отмечалось ранее, при организации телефонной связи можно использовать либо двухполосную двухпроводную, либо однополосную четырёхпроводную систему передачи. Схема, изображённая на рисунке 3.5, относится ко второму варианту. Здесь каждый канал имеет отдельный тракт передачи и тракт приёма (действующие в одной и той же полосе частот), то есть каждый канал является четырёхпроводным. Если канал используется для телефонной связи, то двухпроводный участок цепи от абонента соединяется с четырёхпроводным каналом через дифференциальную систему (ДС). В случае передачи других сигналов (телеграфных, данных, звукового вещания и тому подобное), для которых необходим один или несколько односторонних каналов, ДС отключается.

В режиме передачи сообщение от абонента (Аб) через ДС и амплитудный ограничитель (ОА) поступает на один из входов индивидуального преобразователя частоты (модулятор M_{12}). На другой вход M_{12} подаётся сигнал поднесущей с частотой F_{12} . В результате перемножения этих сигналов образуется сигнал, спектр которого состоит из двух боковых (относительно F_{12}) полос. Сигнал нижней из этих полос выделяется фильтром $ПФ_{12}$ и подаётся на один из входов сумматора. На другие входы сумматора

поступают сигналы с выхода аналогичных трактов передачи 11 других каналов.

Амплитудные ограничители предотвращают перегрузку групповых усилителей (а, следовательно, уменьшают вероятность возникновения нелинейных помех) в моменты появления пиковых значений напряжений нескольких речевых сигналов.

В режиме приёма каналный сигнал выделяется с помощью полосового фильтра ПФ₁₂ из спектра первичной группы (с полосой 60 ... 108 кГц) и подаётся на индивидуальный преобразователь ДМ₁₂. На другой вход ДМ₁₂ поступает тот же сигнал поднесущей частоты F₁₂, который питает и М₁₂. Спектр выходного сигнала ДМ₁₂ состоит из двух боковых (относительно F₁₂) полос. Сигнал нижней из этих полос выделяется ФНЧ, усиливается и через ДС поступает к абоненту. Приёмные тракты 11 других каналов построены аналогично. В аппаратуре с числом каналов 60 и более индивидуальное оборудование размещается в специальных стойках индивидуальных преобразователей СИП-60 или СИП-300.

На практике используется и другой вариант: формирование первичной группы из четырёх предварительных групп (рисунок 3.6), каждая из которых объединяет по три канала ТЧ. Здесь реализуется двухкратный принцип преобразования (рисунок 1.5, б)

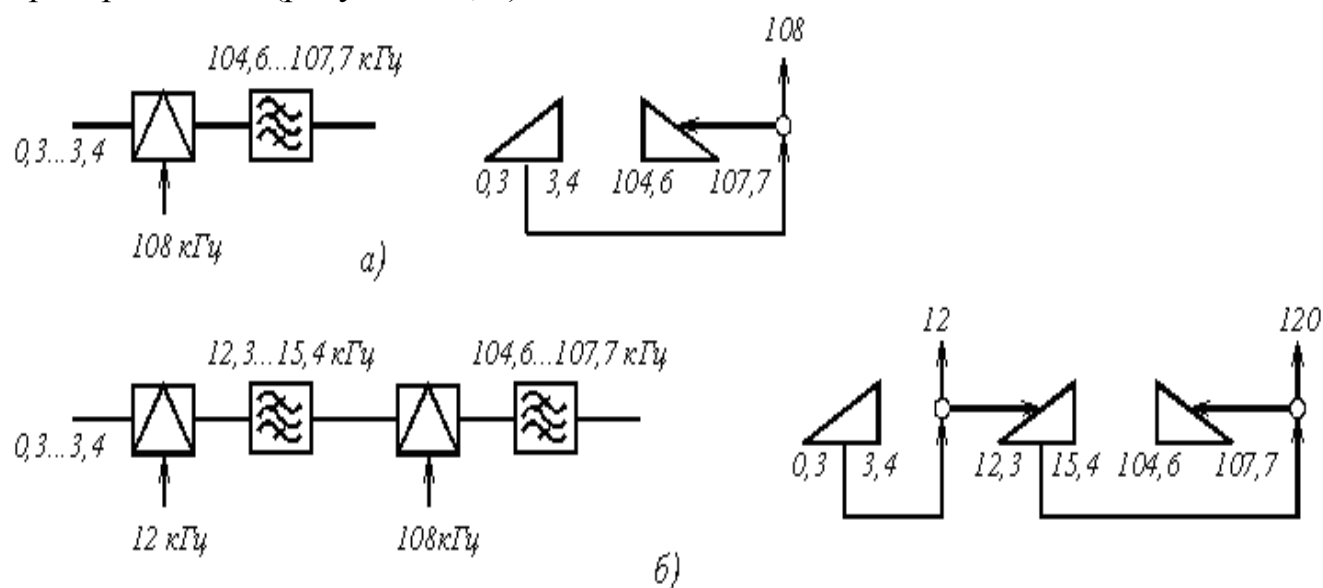


Рисунок 1.5 – структурные схемы и диаграммы однократного (а) и двухкратного (б) преобразования спектра канала ТЧ

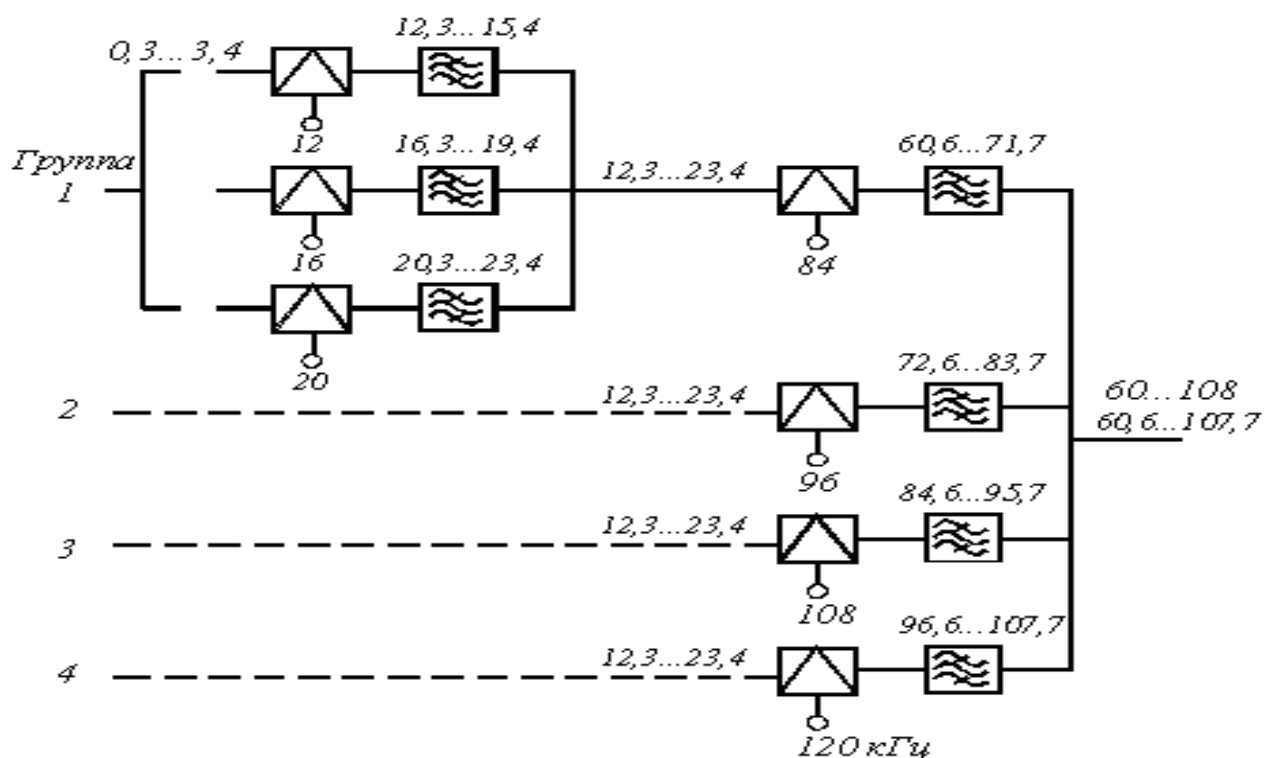


Рисунок 1.6 – Структурная схема формирования ПГ с использованием двухкратного преобразования

Дальнейший процесс укрупнения групп каналов происходит в групповом оборудовании, он поясняется рисунком 1.7. Одинаковые полосы частот пяти ПГ с помощью первичного группового преобразования разносятся по частоте в полосе 312 ... 552 кГц и образуют 60-канальную (вторичную) группу (ВГ). На рисунке 3.7 изображена упрощённая структурная схема группового оборудования ВГ. Сообщения пяти первичных групп ПГ₁ – ПГ₅ подаются на пять групповых преобразователей ГП₁ – ГП₅, на вторые входы которых из генераторного оборудования поступают сигналы поднесущих частот.

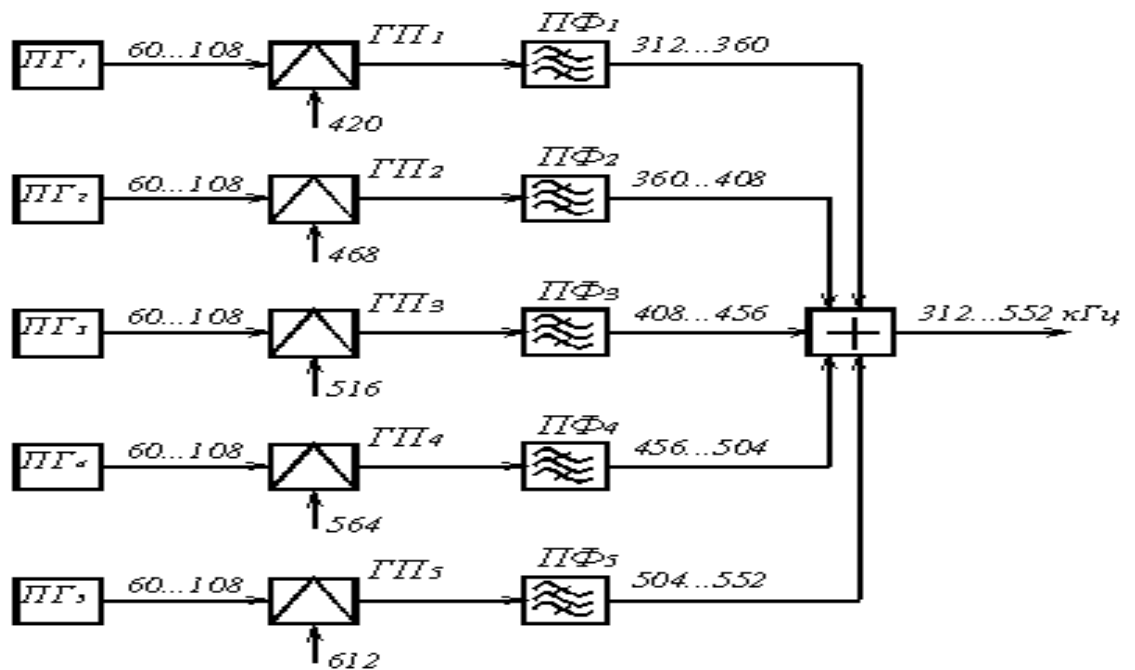


Рисунок 1.7 – Структурная схема группового оборудования ВГ

С помощью полосовых фильтров ПФ₁ – ПФ₅, подключенных к выходам групповых преобразователей, образуются сигналы вида ОБП с полосой частот 48 кГц каждый. В результате сложения этих неперекрывающихся по спектру пяти сигналов образуется спектр ВГ с полосой частот 240 кГц (312 ... 552 кГц).

Для снижения переходных влияний между сигналами ВГ, передаваемыми по смежным трактам, в спектре ВГ могут использоваться как прямые, так и инверсные спектры ПГ₂ – ПГ₅. В первом случае на ГП₂ – ГП₅ подаются несущие частоты 468, 516, 564, 612 кГц, а соответствующие полосовые фильтры выделяют нижние боковые полосы (как показано на рисунке 3.7). Во втором случае на ГП₂ – ГП₅ подаются несущие частоты 300, 348, 396, 444 кГц, а полосовыми фильтрами ПФ₂ – ПФ₅ выделяются верхние боковые полосы. Несущая частота для ПГ₁ в обоих случаях одинаковая (420 кГц), и спектр ПГ₁ не инвертируется. Оборудование первичного группового преобразования размещается в специальных стойках первичных преобразователей УСПП или СПП. Следующие ступени группового преобразования выполняются аналогично.

Аппаратура образования групповых трактов может состоять из различных комбинаций стандартных блоков, в которых осуществляется тот или иной этап преобразования частоты. Например, в широко используемой в 70-80 годы аппаратуре системы К-1920 каналы ТЧ объединяются в две 60-канальные группы (ВГ) и шесть 300-канальных групп (ТГ). При этом общее число каналов $N = 60 \cdot 2 + 300 \cdot 6 = 1920$.

После того как путём последовательного объединения достигается номинальное число каналов, обычно осуществляется ещё одно преобразование частоты: суммарный (групповой) спектр преобразуется в линейный спектр, то есть в ту полосу частот, в которой многоканальный

сигнал этой системы передаётся по линии. При этом учитываются особенности каждой линии.

Если индивидуальное и групповое преобразование обычно осуществляется в типовых блоках и стойках, то сопряжение этой аппаратуры (в частности, формирование линейного спектра) с линейным трактом выполняется в оборудовании, специфичном для каждой данной проводной или радиосистемы.

1.3 Основные характеристики групповых сообщений

При проектировании и разработке многоканальных систем передачи возникает необходимость количественной оценки параметров групповых сообщений на различных ступенях преобразования, в частности сигналов на входе линейного тракта. Эти параметры, как и для любых сигналов связи, определяются соответствующими частотными, информационными и энергетическими характеристиками.

По рекомендации МККТТ средняя мощность сообщения в активном канале в точке с нулевым относительным уровнем устанавливается равной 88 мкВт0 (– 10,6 дБм0). Однако при расчёте P_{cp} МККТТ рекомендует принимать величину $P_1 = 31.6$ мкВт0 (– 15 дБм0) (при этом кроме активности каналов учитываются и другие факторы, например, организация в некоторых ТЧ каналах каналов ТТ, неидеальность индивидуального оборудования и тому подобное). Если $N \geq 240$, то средняя мощность группового сообщения в точке нулевого относительного уровня $P_{cp} = 31,6N$, мкВт, а соответствующий уровень средней мощности $p_{cp} = -15 + 10 \lg N$, дБм0.

По нормам, принятым в Украине при $N \geq 240$

$$P_1 = 50 \text{ мкВт0 (– 13 дБм0); } p_{cp} = -13 + 10 \lg N, \text{ дБм0. (4.6)}$$

Если $N < 240$, то приходится учитывать существенную зависимость коэффициента активности от N . В этом случае P_1 представляют как функцию N , и уровень средней мощности группового сообщения определяют иначе:

$$P_{cp} = -1 + 4 \lg N, \text{ дБм0. (4.7)}$$

дВм0 (русское **дБм0**) — опорная мощность в дБм в точке нулевого относительного уровня. «Абсолютный уровень мощности относительно 1 мВт в точке линии передачи с нулевым уровнем».

Чтобы управлять остаточным затуханием линий связи, уровни передачи на различных участках системы передачи определяют, исходя из уровня некоторой контрольной точки (точки отсчета). МККТТ рекомендовал называть эту точку точкой относительного нулевого уровня: эквивалентный термин, принятый в странах Северной Америки—«точка нулевого уровня передачи» (0-TLP). Точка отсчета может не быть доступной для контроля, но обычно рассматривается как точка на передающем оконечном устройстве двухпроводной системы коммутации. В странах Северной Америки уровень передачи на передающем конце исходящих линий четырех-проводной

системы коммутации равен — 2дБ TLP. Следовательно, точка 0-TLP является лишь гипотетической точкой четырехпроводной цепи. Тем не менее бывает полезно соотнести уровень сигнала в одной точке цепи с уровнем сигнала в другой точке этой же цепи. Если контрольный сигнал с уровнем 0 дБм (1мВт) приложить к точке нулевого уровня передачи 0-TLP, то уровень мощности сигнала в любой другой точке цепи можно непосредственно определить как значение уровня сигнала TLP в этой точке. Однако следует подчеркнуть, что значения уровней TLP не определяют уровней мощности, но лишь затухание или усиление в данной точке по отношению к точке отсчета.

Некоторые параметры и область применения типовой аппаратуры кабельных систем передачи с ЧРК приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры типовой аппаратуры кабельных систем передачи с ЧРК

Система передачи	Область применения	Тип кабеля	Кол-во каналов	Длина ус. участка	Линейный спектр, кГц
К-60П	Внутрizonовая	Симметричн.	60	19	12-252
К-120	Внутрizonовая	Коаксиальн.	120	10	60-552; 812-1304
К-300	Магистр., зонав.	Коаксиальн.	300	6	60-1300
К-1920П	Магистральная	Коаксиальн.	1920	6	312-8544
К-3600	Магистральная	Коаксиальн.	3600	3	812-17596
К-5400	Магистральная	Коаксиальн.	5400	3	4300-31000
К-10800	Магистральная	Коаксиальн.	10800	1,5	4300-60000

В настоящее время на магистральных линиях аналоговые системы передачи не применяются; они еще сохранились кое-где на зонавых сетях и местных линиях, однако, и там они заменяются на цифровые системы.

2 ОПТИЧЕСКОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПО ДЛИНЕ ВОЛНЫ

Особенности волнового мультиплексирования в оптическом диапазоне; классификация WDM-систем; типы WDM-систем: узкополосные и широкополосные WDM-системы; системы "грубого" спектрального уплотнения — CWDM; каналный план и его стандартизация; элементы WDM-систем; техническая реализация WDM-систем; промышленные WDM-системы

2.1 Общие положения

Оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны (Wavelength Division Multiplexing, WDM) - сравнительно новая технология оптического (или спектрального) уплотнения, которая была предложена в 1980 г. Дж. П. Лауде (компания Instruments SA). В настоящее время WDM играет в оптических синхронных системах ту же роль, что и мультиплексирование с частотным разделением (Frequency Division Multiplexing, FDM) в аналоговых системах передачи данных. По этой причине WDM-системы часто называют системами оптического мультиплексирования с частотным разделением (Optical FDM, OFDM), однако по сути своей технологии FDM и OFDM имеют мало общего.

Различия между ними не сводятся к тому, что в OFDM-системах используются оптические, а не электрические сигналы. При обычном частотном мультиплексировании применяется механизм амплитудной модуляции с одной боковой полосой и определенной системой поднесущих, модулирующие сигналы которых одинаковы по структуре, так как они аналогичны сигналам в стандартных каналах ТЧ. При OFDM механизм модуляции, необходимый в FDM для сдвига несущих, вообще не используется; несущие генерируются отдельными источниками (лазерами), сигналы которых затем объединяются мультиплексором в единый многочастотный сигнал. Его составляющие могут передавать потоки цифровых сигналов, сформированные на основе различных синхронных технологий - ATM, SDH, PDH и т. д. Для этого несущие модулируются цифровым сигналом, соответствующим передаваемому трафику.

2.2 Классификация WDM-систем

В настоящее время принято выделять три типа WDM-мультиплексоров: обычные (WDM), плотные (DWDM), высокоплотные (HDWDM). Хотя точные границы между этими классами пока четко не определены можно предложить вариант классификации, основанный на исторической практике разработки WDM-систем и стандарте G.692 с его канальным планом:

- WDM-системы - имеют частотный разнос каналов не менее 200 ГГц, сейчас позволяют мультиплексировать не более восьми каналов;
- DWDM-системы - обеспечивают разнос каналов не менее 100 ГГц и дают возможность мультиплексировать не более 32-40 каналов;
- HDWDM-системы - поддерживают разнос каналов 50 ГГц и менее, в настоящее время позволяют мультиплексировать не менее 40 каналов.
- CWDM-системы ("грубое" спектральное уплотнение) – разнос каналов 20 нм (2500 ГГц) для третьего окна прозрачности.

2.3 Типы WDM-систем: узкополосные и широкополосные WDM-системы

Оптическое волокно характеризуется широкой полосой пропускания, однако, затухание в пределах общей полосы неравномерно, поэтому вся полоса пропускания поделена на ряд полос, которые называются окнами прозрачности. Кроме того, для волоконных световодов с улучшенными характеристиками (без "водяных пиков" и примесного поглощения), определены оптические диапазоны волн передачи (таблица 2.1). Зависимость затухания в диапазонах показана на рисунках 2.1, 2.2.

Таблица 2.1 - Оптические диапазоны улучшенного стекловолокна G.652

Условное обозначение диапазона	Длины волн, нм	Название
O	1260 – 1360	Основной
E	1360 – 1460	Расширенный
S	1460 – 1530	Коротковолновый
C	1530 – 1565	Стандартный
L	1565 – 1625	Длинноволновый
U	1625 – 1675	Сверхдлинноволновый

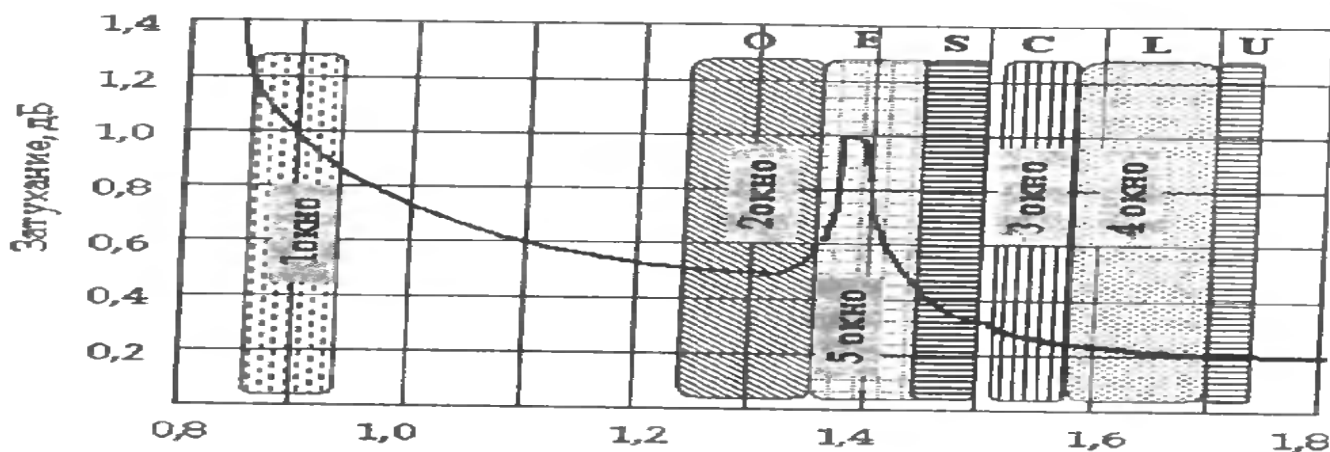


Рисунок 2.1 – Затухание в современных оптических волокнах

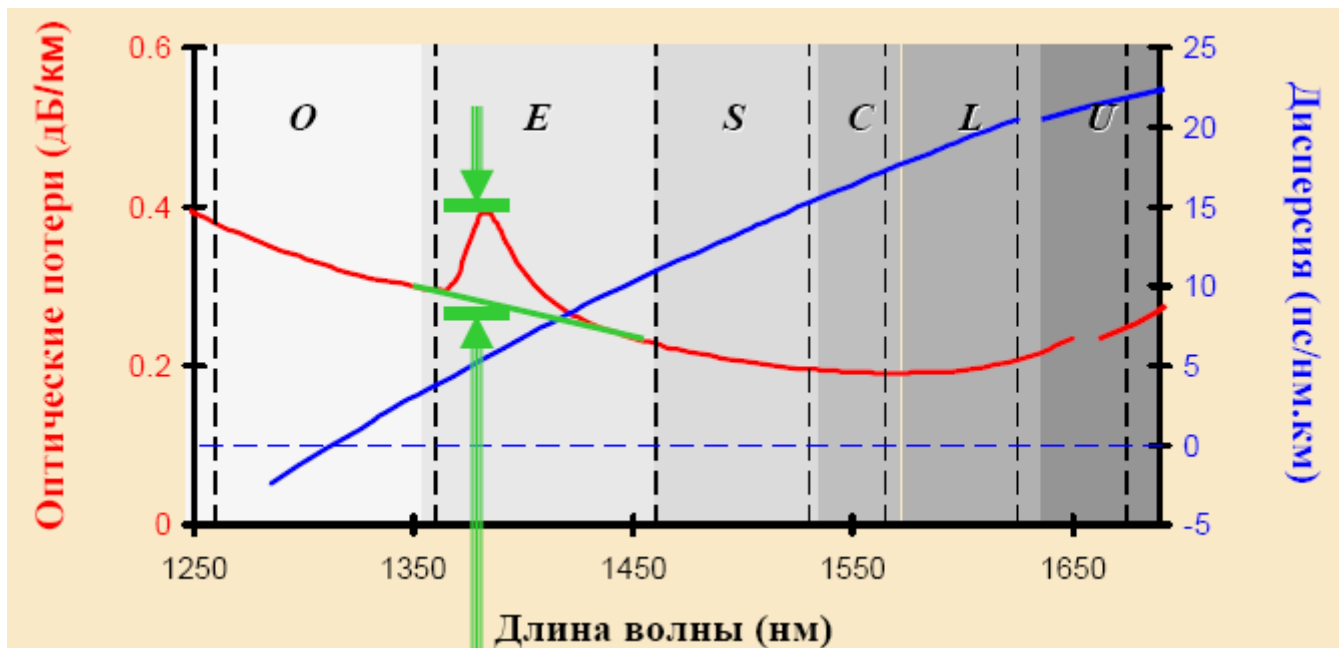


Рисунок 2.2 – Затухание в современных оптических волокнах с улучшенными характеристиками (G.652)

Волновое мультиплексирование используется уже более десяти лет и первоначально было направлено на объединение двух несущих (1310 и 1550 нм) в одном оптоволокне, что позволяло удвоить емкость системы. Этот подход оправдывал себя в течение всей истории развития ВОЛС и в настоящее время применяется во многих стандартных системах SDH. Такие системы иногда называют широкополосными WDM-системами (разнос по длине волны составляет 240 нм) в противоположность узкополосным, где разнос был на порядок ниже (12-24 нм), так что в окне прозрачности 1550 нм удавалось разместить четыре канала. На рисунке 2.3 показан пример мультиплексирования двух несущих для организации связи в двух направлениях, а на рисунке 2.4 – спектр системы.

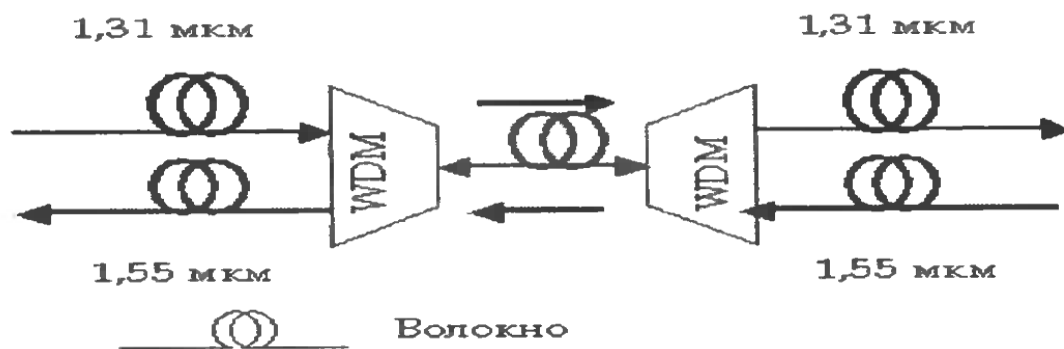


Рисунок 2.3 – Схема организации двусторонней связи по одному волокну

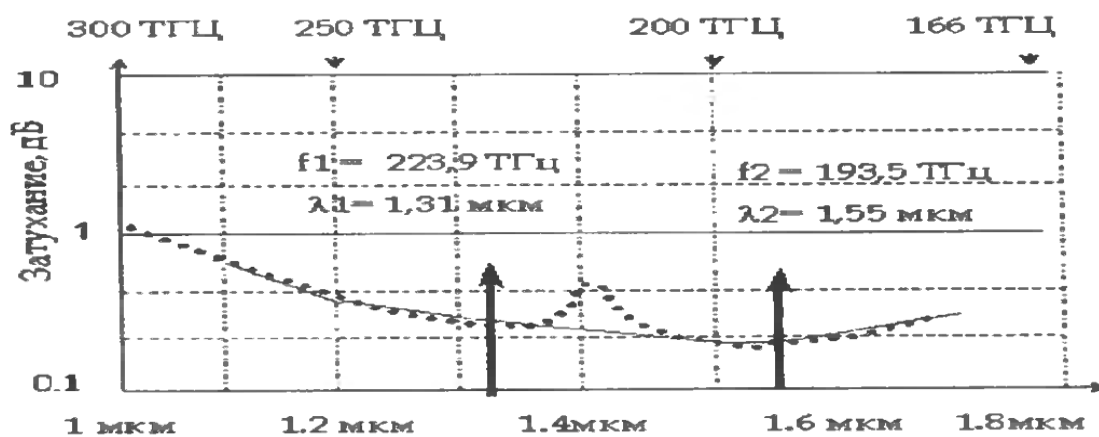


Рисунок 2.4 – Спектр двухканальной системы мультиплексирования

Сегодня подобное деление выглядит не совсем корректным, поскольку на самом деле у "широкополосных" WDM-систем спектр не был сплошным, а состоял из двух изолированных полос. Кроме того, сейчас формируется класс действительно широкополосных DWDM-систем, перекрывающих в смежных окнах прозрачности (третьем и четвертом) полосу 1528-1612 нм. Если ориентироваться на характеристики лучших разработок в этой области с использованием волокна с устраненным пиком поглощения в пятом окне прозрачности (~ 1400 нм), - то можно ожидать, что в будущем системы данной категории смогут покрыть полосу от 1280 до 1620 нм.

2.4 Системы "грубого" спектрального уплотнения — CWDM

Ключевое отличие DWDM-систем от CWDM заключается в положении информационных каналов в спектре рабочих длин волн волоконно-оптической системы связи. В DWDM-системах спектры соседних информационных каналов расположены очень близко. Согласно рекомендациям Международного телекоммуникационного союза (ITU), расстояние между соседними DWDM-каналами равно 100 ГГц, что соответствует расстоянию 0,8 нм на длине волны.

В CWDM-системах спектры соседних информационных каналов расположены на гораздо большем расстоянии, обычно равном 20 нм (2500 ГГц) для третьего окна прозрачности.

Неплотное расположение спектрально разделенных каналов в CWDM-системах обеспечивает очень значительное снижение стоимости сети связи, по сравнению со стоимостью сетей, использующих DWDM-системы. Поскольку в нынешних экономических условиях операторы связи выбирают наиболее экономичные решения для удовлетворения своих текущих потребностей в увеличении пропускной способности систем передачи информации, то CWDM-системы стали широко использоваться в локальных сетях, сетях доступа и городских информационных сетях. Только в системах дальней связи DWDM-технология прочно удерживает свои позиции.

Основная цель CWDM-технологии состоит в том, чтобы обеспечить требуемое расширение информационной емкости оптической линии связи за очень низкую цену (в сравнении с DWDM). Эта цель достигается использованием широких спектральных промежутков между каналами.

Большинство современных CWDM-устройств перекрывают С- и L-диапазоны и частично занимают S-диапазон. Для обеспечения совместимости оборудования Международный телекоммуникационный союз (ITU) определил "гребенку" длин волн и спектральные полосы CWDM-каналов. Предполагается расширение рабочей области на О- и Е-диапазоны. Кроме того, более ранние системы начали использовать CWDM в многомодовых волоконных линиях связи, работающих вблизи длины волны 800 нм. Однако такие системы поддерживают только два или четыре канала и обеспечивают скорость передачи информации менее 500 Мбит/с при дальности менее 2 км.

2.5 Канальный план и его стандартизация

Хотя рассчитывать на полную совместимость DWDM-систем разных производителей не приходится, но необходимо стандартизировать номинальный ряд несущих - канальный план, чтобы дать компаниям ориентир на будущее, а также позиционировать уже существующие WDM- и DWDM-системы. Эту задачу в решил Международный союз электросвязи (ITU), выпустив стандарт ITU-T Rec. G.692.

Таблица 2.2. Стандартный канальный план (разнос каналов 100 ГГц)

Частота, ТГц	Длина волны, нм
196,1	1528,77
196,0	1529,55
195,9	1530,33
...	...
191,2	1567,95
191,1	1568,77
191,0	1569,59

В основу стандарта положен канальный план с равномерным расположением несущих частот с минимальным разносом каналов (шагом) 100 ГГц. Выбранная область частот покрывает стандартизированный диапазон шириной 5,1 ТГц и практически соответствует диапазону длин волн амплитудно-волновой характеристики (АВХ) широко используемых оптических усилителей (1528,77-1569,59 нм). При выборе постоянного шага $h = 100$ ГГц в данном диапазоне можно разместить 51 канал с несущими, указанными в левом столбце табл. 2.2; при этом шаг по длине волны изменяется от 0,780 до 0,821 нм, в среднем он равен 0,8 нм. При использовании шагов 200, 400 ГГц и больше можно получить производные

таблицы. Изготовители используют и меньший шаг (50 ГГц), хотя он еще не стандартизирован.

WDM-системы ведущих производителей соответствуют каналному плану ITU-T, так как не используют шага меньше 100 ГГц. Кроме того, оказывается, что стандартизированный диапазон поделен на два поддиапазона. Выбор того или иного поддиапазона диктуется достижимой в нем равномерностью АВХ. Анализ АВХ оптических усилителей показывает, что более предпочтителен в этом смысле поддиапазон L, позволяющий получить приемлемую равномерность даже со стандартными оптическими усилителями без специального выравнивания.

Оценив число каналов в указанном диапазоне, нетрудно заметить следующее. Во-первых, схема каналного плана с числом каналов, кратным двум, которой придерживается ряд производителей, нерациональна с точки зрения использования выровненной полосы оптического усилителя. Во-вторых, каналный план стандарта G.692 допускает формирование не более 51 канала, а этот показатель уже перекрыт рядом компаний, производящих 64- и 80-канальные системы.

2.6 Перспективный каналный план

Увеличения числа каналов можно достичь следующими двумя путями. Уменьшение шага до 50 ГГц дает возможность довести число каналов до 102. Продолжение стандартизированной полосы вправо до частот порядка 186 ТГц (1612 нм) позволяет удвоить ее ширину, доведя ее до 10,2 ТГц (84 нм) за счет частичного использования четвертого окна прозрачности (область вблизи 1620 нм). Эксплуатация вдвое большей полосы требует применения специальных сверхширокополосных оптических усилителей (UltraWide Bandwidth Amplifier, UWBA) с АВХ, охватывающей полосу 10,2 ТГц; однако она дает возможность увеличить число каналов до 102 при шаге 100 ГГц и до 204 при шаге 50 ГГц.

При создании таких усилителей общую полосу обычно разбивают на две, по терминологии Bell Labs называемые C-Band (обычная полоса) и L-Band (длинноволновая полоса). В результате для WDM-систем можно предложить перспективную схему каналного плана на 102 канала с шагом 100 ГГц.

2.7 Основные характеристики WDM-систем

Вносимое затухание

$$a = -10 \lg(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}),$$

где $P_{\text{вых}}$, $P_{\text{вх}}$ – мощности на выходе и входе устройства.

Для устройств оптического мультиплексирования определяются составляющие вносимого затухания a_{ijk} , где i – номер входного порта, j – номер выходного порта, k – номер длины волны.

Полоса пропускания или рабочая полоса определена как $\lambda_i \pm \Delta\lambda/2$. Она включает весь диапазон длин волн, необходимых для передачи с учетом возможного дрейфа длин волн, точности установки центральной длины волны. Это полоса частот, в которой вносимое затухание не превышает заданное значение.

Затухание отражения характеризует величину энергии, возвращаемой от входа порта к источнику

$$A_{\text{отр}} = -10\lg(P_{\text{отр}}/P_{\text{вх}}),$$

где $P_{\text{вх}}$ – оптическая мощность, излучаемая во входной порт, $P_{\text{отр}}$ – оптическая мощность, принятая обратно из этого порта.

Для устройств оптического мультиплексирования определяются составляющие затухания отражения A_{ij} , где i – номер входного порта, j – номер длины волны.

Затухание изоляции между соседними каналами определяется как величина потерь на частоте пика пропускания соседнего канала

$$A_{i,i+1} = a_{i+1}(\lambda_i) - a_i(\lambda_i),$$

где a_i – вносимое затухание i -го канала, a_{i+1} – вносимое затухание $(i+1)$ -го канала, λ_i – центральная длина волны i -го канала (рисунок 2.5).

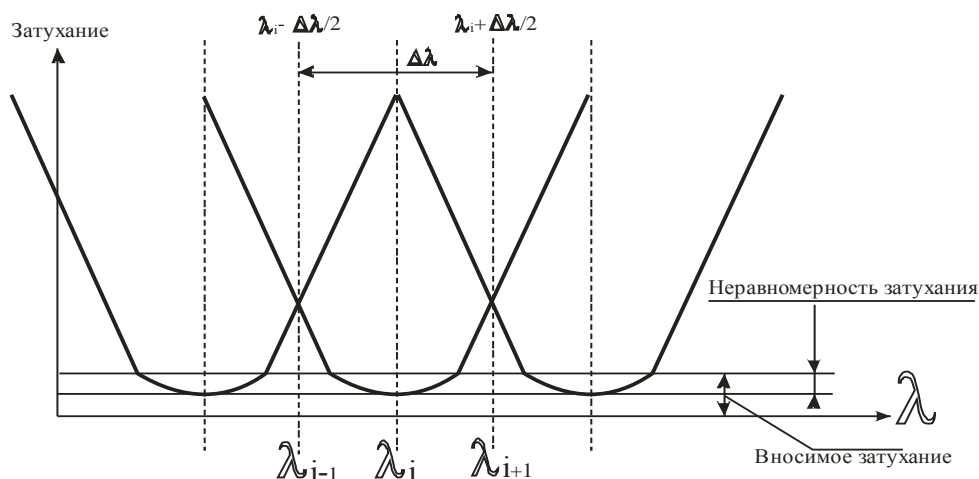


Рисунок 2.5 – Зависимости затухания в каналах WDM

Понятие изоляции эквивалентно понятию защищенности для систем связи с медными проводниками.

2.8 Элементы WDM-систем

Мультиплексоры — демультиплексоры

При создании системы волнового уплотнения недостаточно иметь несколько десятков лазеров, генерирующих на различных длинах волн. Необходимо их излучение объединить и ввести в одно волокно, причем сделать это с минимальными потерями и перекрестными искажениями. Как уже отмечалось, первые мультиплексоры, рассчитанные на объединение излучения двух длин волн, были достаточно просты. Например, это может

быть полупрозрачное зеркало, на которое нанесено покрытие эффективно отражающее излучение одной длины волны. Однако с увеличением количества суммируемых каналов конструкция мультиплексоров менялась.

Наиболее простым примером мультиплексора/демультиплексора (МП/ДМП) является обычная треугольная призма. Все не раз наблюдали ее действие как демультиплексора при падении на одну из ее граней белого света. Радужный спектр, наблюдаемый на выходе другой грани, — это демультиплексированный световой поток. Призма — взаимное устройство (т.е. его свойства в обоих направлениях идентичны), и если направить на одну из ее граней всю гамму цветов спектра под теми же углами, на выходе другой грани получим белый свет — произойдет мультиплексирование. Но призмы не используются в системах DWDM. Их разрешающая способность мала, и если на основе призмы сделать мультиплексор с разрешением 0,8 нм, то получится устройство очень больших размеров. В системах DWDM используются приборы, основанные на других принципах.

В настоящее время известно большое число чувствительных к длине волны устройств, на основе которых могут быть реализованы оптические фильтры и мультиплексоры. К ним относятся интерференционные фильтры, дифракционная решетка, периодическая волноводная решетка, волоконно-оптические и акустооптические фильтры, а также резонаторы Фабри-Перо.

Интерференционные фильтры

Они известны достаточно давно и широко используются в высококачественных объективах фотоаппаратов и других оптических приборах (так называемое просветление оптики). Действие фильтров основано на явлении интерференции — взаимодействии волн. Если, например, две волны равны по частоте и когерентны, то при сложении в фазе, их амплитуда возрастает вдвое, а в противофазе — равна нулю. Интерференционный фильтр представляет собой несколько слоев прозрачного диэлектрика, толщина и коэффициенты отражения и преломления которых подбираются таким образом, чтобы при отражении от них условие сложения в фазе выполнялось только для излучения определенной длины волны. Принцип его действия иллюстрирует рисунок 2.6, где изображена пластина из трех слоев, на которую падает поток излучения на четырех длинах волн — 11-14.

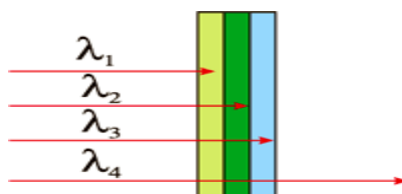


Рисунок 2.6 – Интерференционная пластина-фильтр

Коэффициенты отражения поверхностей пластин выбраны такими, что каждый из них имеет максимум только для определенной длины. А толщина

слоев подбирается таким образом, чтобы падающая и отраженные волны на поверхность первой пластины падали в противофазе и взаимно уничтожались. И только излучение с длиной волны λ проходит все слои практически без поглощения. Но для того, чтобы разделить несколько десятков оптических несущих необходима система фильтров.

Система фильтров строится на основе трехполосного делителя (непоглощающего интерференционного фильтра), работающего при углах падения луча до 45° , с тем чтобы можно было использовать как передаваемый, так и отраженный свет. При таких значениях угла падения пропускание и отражение сигнала обычно превышает 85% и 98% соответственно, что достаточно для обеспечения низких потерь WDM и сохранения присущих интерференционному фильтру высоких характеристик на границе разделения длин волн.

На рисунке 2.7 показаны два варианта фильтра-демультиплексора WDM, один из которых представляет собой односторонний фильтр, и другой — двухсторонний.

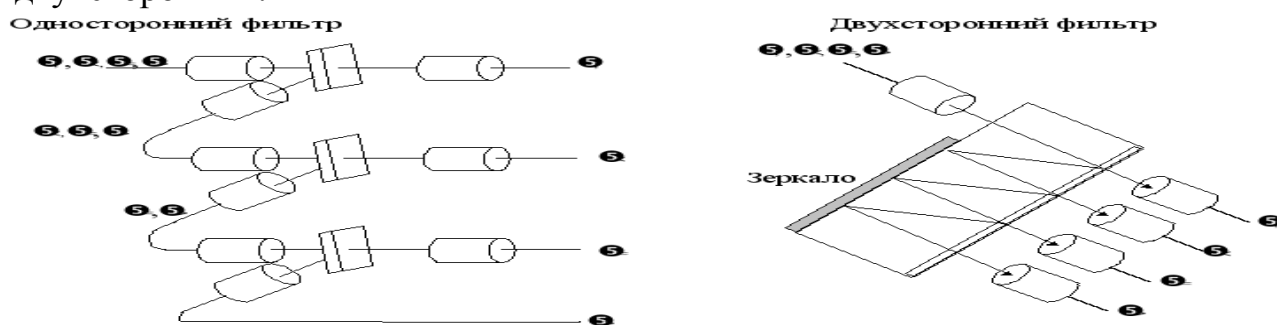


Рис. 18.7 WDM интерференционные фильтры

Рисунок 4.7 – Фильтры-демультиплексоры WDM

На вход каждого фильтра-пластины поступает широкополосный сигнал (широкий диапазон длин волн), фильтр пропускает узкий диапазон (определенную длину волны), остальные длины волн отражаются и поступают на следующий фильтр).

Второй вариант соответствует классическому WDM, который передает или подавляет оптический сигнал в узкой полосе длин волн и часто используется для выбора одного канала.

Дифракционные решетки

Брэгговская дифракционная решетка. Вторым типом спектрально-селективных элементов, используемых в системах DWDM, являются дифракционные решетки, чаще всего брэгговские дифракционные решетки. Вообще то, дифракция Брэгга — это дифракция на стоячей ультразвуковой волне, возбужденной в прозрачном твердом материале (рисунок 2.8). При этом в нем возникают чередующиеся максимумы и минимумы коэффициента преломления, которые могут играть роль дифракционной решетки. Период решетки пропорционален длине ультразвуковой волны, чем меньше длина волны, тем меньше период решетки, тем выше ее разрешающая способность,

тем лучше она может разделить близко стоящие по длине волны. В дальнейшем брэгговскими стали называть решетки на основе структуры с периодически изменяющимся коэффициентом преломления, вне зависимости от того, каким путем эти изменения созданы. Это может быть участок материала специального состава, облученный, например, ультрафиолетовым излучением. Таким путем можно сформировать решетки со значительно меньшим периодом, нежели механическим путем (гравировкой) или путем химического травления через специальную маску.

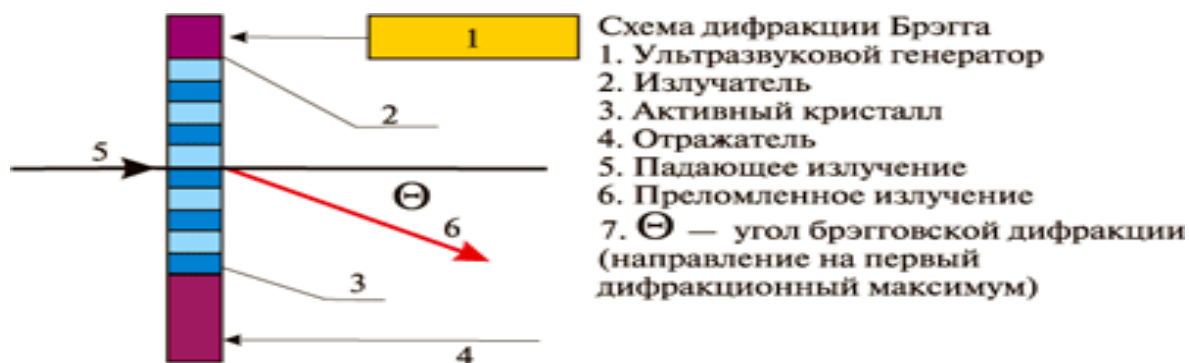


Рисунок 2.8 – Схема дифракции Брегга

Величина угла Θ (угла дифракции) зависит от длины волны падающего излучения, и если на решетку направить световой поток излучения нескольких длин волн, то после прохождения решетки он разделится на отдельные составляющие, каждую из которых можно наблюдать под своим углом.

Выше было рассмотрено явление дифракции в случае, когда излучение падает нормально к плоскости решетки. Однако эффект спектральной селекции можно наблюдать и если излучение направить вдоль структуры с периодическим изменением показателя преломления (рисунок 2.9).

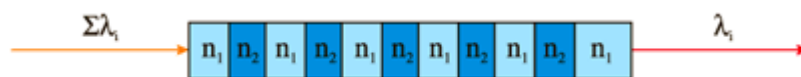


Рисунок 4.9 – Схема продольной дифракции Брегга

На границе сред с различным коэффициентом преломления всегда происходит отражение излучения. Подбирая шаг решетки в направлении распространения и материал среды, можно добиться или того, что только излучение с определенной длиной пройдет через решетку или же того, что только это излучение отразится от нее. (Фактически добиваются того, чтобы падающее и отраженное излучения со всеми другими длинами волн приходили к концу или началу решетки в противофазе). Рабочая полоса частот такого фильтра определяется длиной решетки. Поскольку и шаг и

длина зависят от температуры материала, то необходимо принимать специальные меры для поддержания температуры решетки постоянной, помещая ее в термостат.

Волоконная брэгговская решетка может использоваться как оптический фильтр в устройствах мультиплексирования и демультиплексирования как компенсатор хроматической дисперсии или в комбинации с оптическими циркуляторами в мультиплексорах ввода/вывода каналов. Для компенсации хроматической дисперсии в линейном волокне применяются брэгговские решетки с изменяющимся периодом

Используя брэгговскую решетку и оптический циркулятор, можно сделать устройство ввода/вывода излучения одного канала в групповой поток (рисунок 2.10). (Оптический циркулятор — это невзаимное устройство, по-разному воздействующее на излучение, в зависимости от направления его распространения).

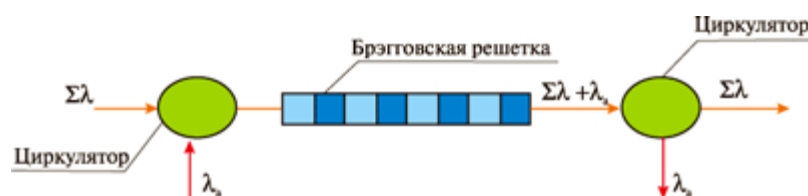


Рисунок 2.10 – Устройство ввода/вывода излучения

В мультиплексорах/демультиплексорах систем DWDM могут использоваться и обычные, привычные нам со школьных уроков физики, дифракционные решетки, только значительно более высокого качества. Они дороги в производстве, однако потери в них практически не зависят от числа каналов.

Мультиплексоры на основе технологий интегральной оптики

Они основаны на использовании интерференции световых потоков с разными фазовыми сдвигами после прохождения волоконных световодов разной длины. Эти устройства чаще всего используются в качестве коммутаторов, когда необходимо перераспределить каналы с одной длиной волны в другие световоды или ввести в магистральное волокно дополнительные каналы.

Дифракционная решетка на массиве волноводов (AWG - Arrayed Waveguide Gratings) является интегрированным подходом к проблеме демультиплексирования. Решетка состоит из фазированного массива оптических волноводов, работающих как дифракционная решетка. Интегральная оптика применяется для создания решеток на основе массива планарных волноводов (более 100) различной длины между двумя планарными линзами смесителями.

Этот тип решетки можно изготовить, используя технологию InGaAsP/InP, позволяющую интегрировать такие типы направляющих волноводов с передатчиком или приемником WDM. Иллюстрацией AWG является рисунок 2.11.

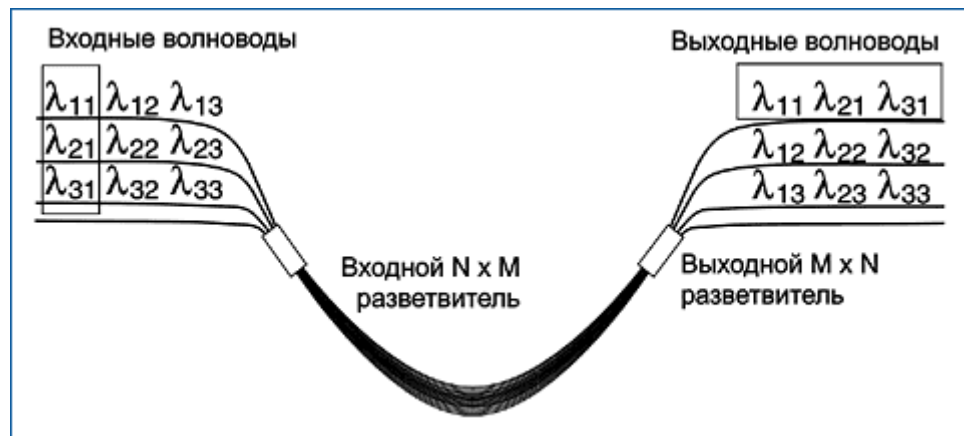


Рисунок 2.11 – Схема демультимплексора на основе решетки волноводов

Входной сигнал, который содержит излучение разных длин волн, попадает во входной разветвитель. Там он расщепляется на N оптических лучей, каждый из которых попадает в отдельный волноводный канал. Все N волноводных каналов, образующих волноводную матрицу, имеют разную длину и вносят в сигнал разные фазовые сдвиги, зависящие от длины волны. Учитывая частотную зависимость постоянной распространения моды, фазовый сдвиг оказывается зависимым от длины волны. После прохождения волноводной матрицы световые пучки из отдельных волноводных каналов вновь объединяются в выходном разветвителе и интерферируют таким образом, что излучение разных длин волн попадает в разные выходные волноводы.

Решетки на основе массива волноводов AWG используются для того, чтобы перераспределять сигналы различных длин волн (каналы) между двумя наборами волокон или выделить (демультимплексировать) отдельные каналы составного сигнала в отдельные волокна. Эта технология сейчас становится основной для производителей мультиплексоров и демультимплексоров систем DWDM. Благодаря легко масштабируемой структуре, она может широко применяться в системах с сотнями каналов.

Интегральные оптические устройства мультиплексирования и демультимплексирования – это оптический эквивалент интегральных схем в электронике. Оптические волноводы в несколько слоев помещаются на подложку из кремния или ниобата лития. В таком небольшом блоке содержится множество оптических компонентов, взаимосвязанных друг с другом. При использовании современного полностью автоматизированного оборудования возможно массовое производство таких блоков.

Решетки AWG еще также называют “драконовыми маршрутизаторами” (Dragon Routers), фазовыми матрицами или фазарами.

AWG работает как обычная дифракционная решетка. Ее эффективность при надлежащем проектировании может достигать 100%. Используя эту технологию, можно изготовить ряд элементов системы WDM, например, маршрутизатор на волноводной решетке.

На рисунке 2.12 показано типичное применение AWG, используемого в качестве оптического мультиплексора ввода-вывода.

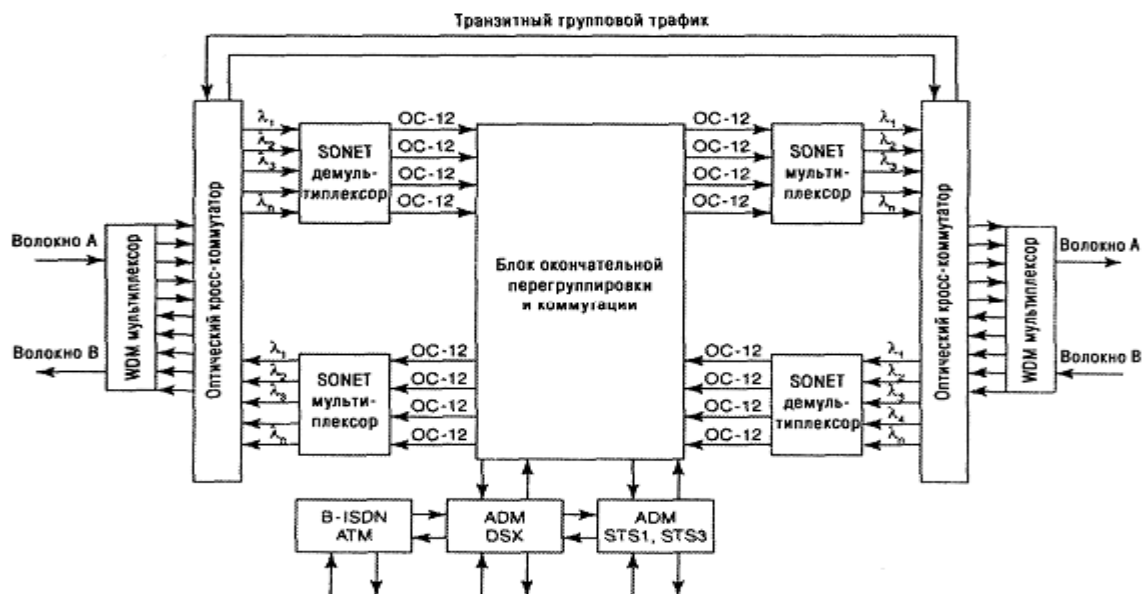


Рисунок 2.12 - Типичная архитектура передачи, использующая мультиплексор-демультиплексор и конфигурацию ввода-вывода

В качестве мультиплексоров/демультиплексоров могут использоваться планарные световоды, изготовленные по схеме **интерферометра Маха — Цандера**. Цепочку таких соединенных последовательно световодов применяют для ввода — вывода сигналов отдельных каналов. Достоинство их в том, что матрица мультиплексора может быть изготовлена методом интегральной оптики на одной подложке.

Принцип интерферометра Маха-Цандера используется в простейшем биконический разветвителе FBT (Fused Biconic Tapered). Он представляет собой пару одномодовых оптических волокон, на определенном участке сваренных друг с другом по длине. Основная мода волокна, которая распространяется по сердцевине одного из оптических волокон, при прохождении области сварки преобразуется в моды оболочки. Когда волокна снова разделяются, моды оболочки снова преобразуются в моды волокна, распространяющиеся по сердцевине каждого из выходных волокон. В результате получается разветвитель, практически не вносящий потерь. Выходные сигналы не обязательно имеют равную мощность, соотношение их мощностей определяется интерференцией в области сварки волокон и зависит от длины этой области.

Если два таких разветвителя расположены последовательно (рисунок 2.13), и два рукава имеют разные оптические пути между местами сварки, то такая комбинация действует подобно интерферометру Маха-Цандера. Мощность входного сигнала распределяется между выходными волноводами в зависимости от длины волны с определенной периодичностью. Если составной входной сигнал содержит оптические каналы двух различных длин

волн, то при определенном подборе параметров эти каналы на выходе окажутся в разных выходных волокнах. Второе входное волокно не используется



Рисунок 2.13 – Распределение входного сигнала между двумя выходами

Если на вход поступает составной сигнал, который содержит большое количество каналов на разных частотах (с одинаковыми расстояниями между ними), на выходе в каждом волокне будет по половине каналов с расстоянием между частотами в два раза больше. Используя последовательно несколько разветвителей, можно вывести каждый канал в отдельное волокно.

Массивы таких устройств, отдельные секции которых иногда заменены брэгговскими решетками, используются для выделения каналов определенной частоты из многоканальных систем WDM и DWDM или для добавления каналов в каком-либо узле оптической сети. Поскольку они являются полностью пассивными устройствами и имеют низкие потери, допустимо применение достаточно больших наборов таких устройств.

Волновые конвертеры

В ряде случаев, помимо фильтрации и мультиплексирования сигналов различных длин волн, возникает необходимость преобразования одной длины волны в другую длину волны, что называется конвертированием длины волны. Принцип действия устройств, осуществляющих данное преобразование, основан на использовании нелинейного эффекта в оптических волокнах, например в волокнах со смещенной нулевой дисперсией DSF, который, как известно, приводит к явлению четырехволнового смешивания. В этом случае длина волны накачки определяется из выражения

$$\lambda_n = \lambda_c \lambda_d / (2\lambda_c - \lambda_d),$$

где λ_c и λ_d - соответственно длина волны основного и дополнительного сигналов.

Так как конвертирование достигается при наличии максимального нелинейного эффекта, который имеет место в точке нулевой дисперсии подокна, для получения необходимого результата для тех или иных длин волн сигнала и накачки требуется изготовление специального волокна.

Другой принцип реализации оптического конвертера основан на эффектах нелинейного взаимодействия двух оптических сигналов различной длины волны, в результате которого образуется сигнал новой длины волны. Так как данное преобразование осуществляется только на оптическом уровне, оно не ограничивается рабочими частотами электронных

компонентов и поэтому применяется в полностью оптических сетях. Один из путей построения волновых конвертеров согласно данному принципу основан на использовании ферроэлектрического кристалла с созданной в нем периодической поляризацией, обеспечивающей усиленное взаимодействие оптических волн (рисунок 2.14).

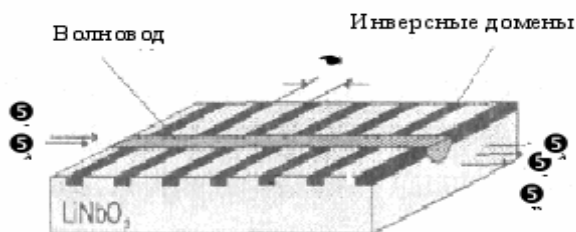


Рисунок 4.14 – Структура оптического конвертера

В этом случае при одновременном коллинеарном распространении в кристалле основного и дополнительного оптических сигналов на его выходе формируется световое излучение с длиной волны, равной

$$\lambda_p = \lambda_c \lambda_d / (\lambda_c - \lambda_d).$$

На основе оптических конвертеров строится оптический транспондер.

Оптический транспондер – устройство, обеспечивающее интерфейс между оборудованием оконечного доступа и линией WDM. Согласно рекомендациям МСЭ G.957 для систем СЦИ (SDH) допустимые значения спектральных параметров на выходных оптических интерфейсах имеют следующие значения: ширина спектральной линии $\Delta\lambda \approx \pm 0,5$ нм (для STM - 16), а центральная длина волны может иметь любое значение в пределах диапазона 1530... 1565 нм. На входы оптического мультиплексора должны поступать оптические сигналы, спектральные параметры которых, должны строго соответствовать стандартам, определённым рекомендацией ИТУ-Т G.692 (Рисунок 2.15).

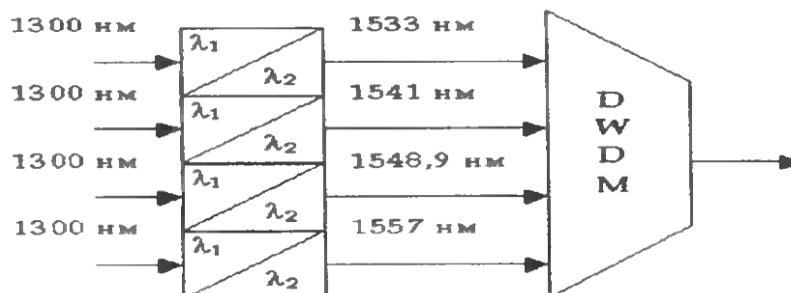


Рисунок 2.15 – Применение транспондера на базе конвертеров длин волн

Очевидно, что если на оптические входы мультиплексоров подать сигналы с выходов оптических передатчиков SDH, то мультиплексирование осуществлено не будет. Необходимое соответствие достигается благодаря применению в аппаратуре WDM специального преобразователя длин волн - транспондера. Это устройство может иметь различное количество оптических входов и выходов. Но если на любой вход транспондера может быть подан оптический сигнал, параметры которого определены рекомендации G.957, то выходные его сигналы должны по параметрам соответствовать рекомендации G.692. При этом, если уплотняется m оптических сигналов, то на выходе транспондера длина волны каждого канала должна соответствовать только одному из них в соответствии с сеткой частотного плана ITU.

Кроме устройств, перечисленных выше в системах WDM применяются волоконно-оптические усилители.

2.9 Варианты технической реализации WDM-систем

Первые мультиплексоры класса WDM использовались для мультиплексирования двух несущих из второго и третьего окон прозрачности - 1310 нм и 1550 нм, значительное расстояние между которыми позволяло обойтись без специальных фильтров для их разделения. Дальнейшие усилия, направленные на улучшение селективности (уменьшение разноса каналов) при использовании традиционной технологии оптических фильтров на базе дискретной оптики, привели к следующим результатам: разнос каналов 20-30 нм, переходное затухание между каналами 20 дБ, уровень вносимых потерь 2-4 дБ.

Это позволило с 1987 г. до середины 90-х гг. формировать не более четырех каналов во втором окне. В 1996-1998 гг. произошел существенный прорыв в технологии мультиплексирования, обусловленный, с одной стороны, переходом к интегральным оптическим технологиям, а с другой - к миниатюризацией и повышением качества элементов традиционной дискретной оптики.

В настоящее время используются три конкурирующие технологии выделения каналов (демультиплексирования). Две из них, основанные на применении интегральной оптики (интегральных оптических микросхем), выделяют каналы с помощью волновых фильтров на решетке массива волноводов (Array Waveguide Gratings, AWG) либо вогнутой дифракционной решетки (Concave Gratings, CG); третья, базирующаяся на миниатюрной дискретной оптике, выделяет их с помощью трехмерного оптического мультиплексирования (3-D Optics WDM).

4.10 Промышленные WDM-системы

Сейчас все еще применяются WDM-системы первого поколения, мультиплексирующие два канала с несущими 1310 нм и 1550 нм. Кроме того, они предлагаются в качестве опций при поставке ряда коммерческих систем SDH/SONET. Эксплуатируется и достаточное количество четырех- и восьмиканальных систем, которые условно можно отнести к системам второго поколения. Бурное развитие WDM/DWDM-систем пришлось на 1997-1998 гг., когда были разработаны системы третьего поколения, основанные на стандартизированном канальном плане и имеющие минимум 16 каналов.

Изготовителей соответствующего оборудования можно разделить на две группы: фирмы, традиционно выпускающие системы PDH/SDH и сопутствующие устройства (Alcatel, ECI, Lucent, NEC, Nokia, Nortel, Pirelli, Siemens) и "новые" производители (ADVA, Cambrian, Ciena, Eonyx, IBM, Osicom). Первые разрабатывали WDM-системы как транспортные средства для глобальных сетей SDH/SONET, вторые - как транспортные средства для локальных или, в крайнем случае, городских сетей (так называемый класс Metro).

У наиболее продвинутых компаний первой группы общая емкость систем в расчете на одно волокно составляет в настоящее время 160-400 Гбит/с, что превышает аналогичный показатель для систем производителей второй группы. Лидерами здесь являются фирмы Alcatel и Lucent (400 Гбит/с).

Представители второй группы предлагают, как правило, более простые и дешевые решения, рассчитанные на использование одной секции (или одного перекрытия в секции) и не имеющие возможности оптического ввода/вывода отдельных каналов на промежуточных узлах (в силу отсутствия последних). Однако они могут иметь больше логических интерфейсов, позволяют работать с пакетами различных форматов (ATM, Ethernet, включая Fast Ethernet и Gigabit Ethernet, FDDI) и широко применяют интерфейсы Fibre Channel и ESCON. Среди таких систем нельзя не упомянуть удачные разработки компаний Cambrian, IBM, Osicom и Ciena. Система Sentry последней фирмы выделяется не только по расстоянию, перекрываемому ее секцией (500-800 км), но и по числу задействуемых каналов (40).

Тип системы. Дуплексные, или двунаправленные, системы (D) используют две оптические несущие на канал, а симплексные (S) - одну несущую. Многие производители сообщают число каналов без указания типа системы, тогда считается, что она может работать как симплексная с n каналами или как дуплексная с $n/2$ каналами.

Код. Как правило, широко используются два типа линейного кодирования - Non-Return-to-Zero (NRZ) и Return-to-Zero (RZ). Первый обеспечивает большую плотность эквивалентных бит на секундный интервал

и предпочтительнее в SDH-системах верхних уровней иерархии. Второй широко применяется в DWDM-системах в силу специфики работы модуляторов.

Число каналов ввода/вывода. Реализовать ввод/вывод трибов (электрических или оптических), участвующих в схеме первичного электрического или оптического SDH-мультиплексирования, в оптический канал, представленный отдельной оптической несущей, или из него в схему вторичного оптического WDM-мультиплексирования достаточно сложно (особенно для оптических трибов). Поэтому в ряде WDM-систем эта опция вообще не реализована (обеспечивается лишь работа в режиме "точка-точка") либо ограничено число каналов, для которых она разрешена (например, 4 из 16, 8 из 40, 12 из 64). Мало того, число каналов вообще может быть ограничено снизу на уровне виртуального контейнера VC-4.

Топология. В порядке возрастания сложности в WDM-системах могут быть реализованы следующие топологии: "точка-точка" без возможности ввода/вывода трибов SDH; линейная цепь с возможностью ввода/вывода трибов SDH; "звезда" или "точка-много точек", реализуемые с помощью концентратора; "кольцо" (одинарное без защиты, двойное с защитой или счетверенное с полной дуплексной защитой); ячеистая сеть с возможностью динамической маршрутизации.

Секция. Это участок пути, перекрываемый в результате компенсации потерь от затухания сигнала за счет запаса по усилению (бюджета секции) или работы оптических усилителей. Секции могут быть короткими (50-90 км; как правило, они не содержат оптических усилителей), средними (80-150 км; обычно содержат бустеры и предусилители) и длинными (500-700 км; состоят из нескольких участков перекрытия и, как правило, содержат мощный усилитель-бустер, несколько линейных усилителей и предусилитель). Секции ограничены терминальными мультиплексорами.

Дальность. Максимальное расстояние, на которое могут быть переданы данные. Она определяется числом секций и длиной одной секции, а также возможным наличием регенераторов. С учетом того, что секции зачастую содержат оптические усилители разных типов, дистанция, перекрываемая одной секцией, может иметь длину 500-700 км. Секции могут стыковаться без использования регенераторов - путем соединения терминальных мультиплексоров (back-to-back). Регенераторы применяются для восстановления оригинальной формы сигнала после прохождения им секционного блока (например, в системе WL8 компании Siemens использование одного регенератора позволяет удвоить общую дистанцию передачи сигнала).

Скорость входных данных и тип поддерживаемых логических интерфейсов. Указаны границы диапазона скоростей, которые определяются, в частности, наличием поддержки того или иного логического интерфейса (или формата данных) для взаимодействия с сетями разных типов.

Канал управления. Имеется в виду оптический канал супервизорного управления (Optical Supervision Channel, OSC). Этот канал организуется на дополнительной оптической несущей, которая лежит за пределами фактически используемой полосы. В то же время он может принадлежать полосе, занимаемой стандартизированным канальным планом, либо соответствовать некоторым стандартным (но не применяемым для основной полосы) несущим или частотам накачки лазеров в оптических усилителях.

Управление. Характеризует возможность управления системой в целом, включая управление SDH/SONET-мультиплексорами и оборудованием сети, с которой стыкуется аппаратура WDM. В этом смысле управление разбивается на традиционное для систем SDH/SONET полноценное управление на основе TMN с помощью интерфейсов Q и F и на супервизорное управление с использованием агента SNMP. Возможно также применение специально разработанной системы управления сетью WDM, включающей в себя систему мониторинга волоконно-оптических каналов.

Важным параметром является *допуск на дисперсию*. Он указывает, какую максимальную дисперсию, накопленную на длине одной секции, способна преодолеть WDM-система без потери качества сигнала, определяемого уровнем ошибок (BER). Эта величина используется для проверки способности системы (секции) покрывать определенную дистанцию. Зная конкретный тип волокна и соответствующее ему значение дисперсионного параметра D , определяемого для граничной длины волны в занимаемой полосе, можно подсчитать фактически накопленную дисперсию путем умножения D на длину секции. Если фактический допуск меньше предельного, система работоспособна при использовании данного волокна, если нет - требуется использовать другое волокно, уменьшить длину секции либо (когда последнее нежелательно или невозможно) применить компенсаторы дисперсии.

Тем не менее уже эти данные позволяют получить представление о современном состоянии соответствующего сектора телекоммуникационной индустрии и спрогнозировать его стремительное развитие в ближайшие годы.

Настоящий этап развития волоконно-оптических систем связи характеризуется как этап поиска путей повышения эффективности систем передачи. Выполнение данной задачи происходит за счет снижения стоимости строящихся систем в основном регионального, городского масштаба и локальных ВОСП. Учитывая массовость этих дешевых и эффективных ВОСП, можно обеспечить большую загрузку магистральных DWDM-систем. Один из вариантов такого подхода — системы с "грубым" спектральным уплотнением — CWDM (Coarse Wave Division Multiplexing).

3- Мультиплексные технологии цифровых абонентских линий

Особенности технологий xDSL; общее описание технологии ADSL; технология HDSL; технологии кодирования, применяемые в HDSL: кодирование 2B1Q и CAP; многочастотный алгоритм модуляции DMT

3.1 Общие положения

xDSL (*digital subscriber line*, цифровая абонентская линия) — семейство технологий, позволяющих значительно повысить пропускную способность абонентской линии телефонной сети общего пользования путём использования эффективных линейных кодов и адаптивных методов коррекции искажений линии на основе современных достижений микроэлектроники и методов цифровой обработки сигнала. Эта технология использует частотное разделение каналов.

Технологии xDSL появились в середине 90-х годов как альтернатива цифровому абонентскому окончанию ISDN (Integrated Services Digital Network - обеспечивает организацию 2 каналов по 64 кбит/с + канал управления 16 кбит/с).

В аббревиатуре xDSL символ «x» используется для обозначения первого символа в названии конкретной технологии, а DSL обозначает цифровую абонентскую линию DSL (есть другой вариант названия — Digital Subscriber Loop — цифровой абонентский шлейф). Технологии xDSL позволяют передавать данные со скоростями, значительно превышающими те скорости, которые доступны даже самым лучшим аналоговым и цифровым модемам. Эти технологии поддерживают передачу голоса, высокоскоростную передачу данных и видеосигналов, создавая при этом значительные преимущества как для абонентов, так и для провайдеров. Многие технологии xDSL позволяют совмещать высокоскоростную передачу данных и передачу голоса по одной и той же медной паре. Существующие типы технологий xDSL различаются в основном по используемой форме модуляции и скорости передачи данных.

Службы xDSL разрабатывались для достижения определенных целей: они должны работать на существующих телефонных линиях, они не должны мешать работе различной аппаратуры абонента, такой как телефонный аппарат, факс и т. д., скорость работы должна быть выше теоретического предела в 56 Кбит/с, и они должны обеспечивать постоянное подключение.

К основным типам xDSL относятся ADSL, HDSL, IDSL, MSDSL, PDSL, RADSL, SDSL, SHDSL, UADSL, VDSL. Все эти технологии обеспечивают высокоскоростной цифровой доступ по абонентской телефонной линии. Некоторые технологии xDSL являются оригинальными разработками, другие представляют собой просто теоретические модели, в то время как третьи уже стали широко используемыми стандартами. Основным различием данных

технологий являются методы модуляции, используемые для кодирования данных.

5.2 Общее описание технологии ADSL

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line — Асимметричная цифровая абонентская линия) входит в число технологий высокоскоростной передачи данных, имеющих общее обозначение xDSL. Общее название технологий DSL возникло в 1989 году, когда впервые появилась идея использовать аналого-цифровое преобразование на абонентском конце линии, что позволило бы усовершенствовать технологию передачи данных по витой паре медных телефонных проводов. Технология ADSL была разработана для обеспечения высокоскоростного доступа к интерактивным видеослужбам (видео по запросу, видеоигры и т.п.) и передачи данных (доступ в Интернет, удаленный доступ к ЛВС и другим сетям).

Прежде всего, ADSL является технологией, позволяющей превратить витую пару телефонных проводов в тракт высокоскоростной передачи данных. Линия ADSL соединяет два модема ADSL, которые подключены к каждому концу витой пары телефонного кабеля (рисунок 3.1). При этом организуются три информационных канала — «нисходящий» поток передачи данных, «восходящий» поток передачи данных и канал обычной телефонной связи (POTS – Plain Old Telephone Service) (рисунок 3.2). Канал телефонной связи выделяется с помощью фильтров, что гарантирует работу телефона даже при аварии соединения ADSL.

POTS предоставляет:

- полнодуплексную передачу звуковых данных с диапазоном частот от 300 до 3400 Гц
- возможность принятия сигнала вызова
- возможность передачи номера абонента для установления связи (набор номера)
- (возможно) предоставление дополнительных сервисов с переадресацией

Достоинства:

- Низкая стоимость оконечных терминалов (телефонных аппаратов)
- Широкий спектр оборудования с общеупотребительными стандартами (модемная связь, факсимильная, голосовая)
- Отсутствие необходимости обучения сотрудников
- Низкие требования к качеству кабельных систем
- Возможность использования общей «земли» в многопарных кабелях

Ключевые недостатки:

- Линия POTS предоставляет возможность одного соединения в один момент времени

- Длительный период установления связи и вызова
- Низкая скорость передачи (порядка 64 кбит/с)
- Высокая стоимость подключения и обслуживания (1 пара для каждого канала)
 - Отсутствие коррекции ошибок (в случае голосового трафика), амплитудная модуляция, чувствительная к наводкам
 - Высокое напряжение вызова, ощущаемое человеком в случае контакта с проводами
 - Несимметричный сигнал, осложняющий гальваническую развязку

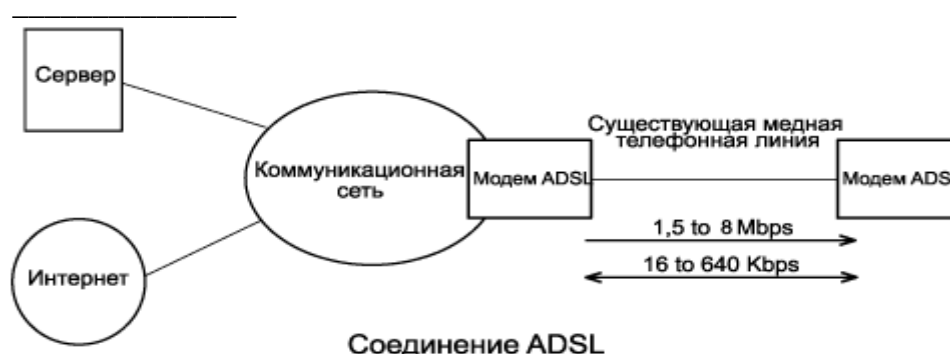


Рисунок 3.1 – Место ADSL в телефонной сети



ADSL является асимметричной технологией — скорость «нисходящего» потока данных (данных, которые передаются в сторону конечного пользователя) выше, чем скорость «восходящего» потока данных (передаваемого от пользователя в сторону сети). Скорость передачи данных от пользователя (более «медленное» направление передачи данных) все равно значительно выше, чем при использовании аналогового модема. Фактически она также значительно выше, чем ISDN (Integrated Services Digital Network — Интегральная цифровая сеть связи).

Для сжатия большого объема информации, передаваемой по витой паре, в технологии ADSL используется цифровая обработка сигнала и

специально созданные алгоритмы, усовершенствованные аналоговые фильтры и аналого-цифровые преобразователи. Телефонные линии большой протяженности могут ослабить передаваемый высокочастотный сигнал (например, на частоте 1 МГц, что является обычной скоростью передачи для ADSL) на величину до 90 дБ. Это заставляет аналоговые системы модема ADSL работать с достаточно большой нагрузкой, позволяющей иметь большой динамический диапазон и низкий уровень шумов. На первый взгляд система ADSL достаточно проста — создаются каналы высокоскоростной передачи данных по обычному телефонному кабелю. Но, если детально разобраться в работе ADSL, можно понять, что данная система относится к серьезным достижениям современной технологии.

Технология ADSL использует метод разделения полосы пропускания медной телефонной линии на несколько частотных полос. Это позволяет одновременно передавать несколько сигналов по одной линии. Точно такой же принцип лежит в основе кабельного телевидения, когда каждый пользователь имеет специальный преобразователь, декодирующий сигнал и позволяющий видеть на экране телевизора разные программы. При использовании ADSL разные несущие одновременно переносят различные части передаваемых данных. Этот процесс известен как частотное уплотнение линии связи (Frequency Division Multiplexing — FDM) (рисунок 3.2). При FDM один диапазон выделяется для передачи «восходящего» потока данных, а другой диапазон для «нисходящего» потока данных. Диапазон «нисходящего» потока в свою очередь делится на один или несколько высокоскоростных каналов и один или несколько низкоскоростных каналов передачи данных. Диапазон «восходящего» потока также делится на один или несколько низкоскоростных каналов передачи данных.

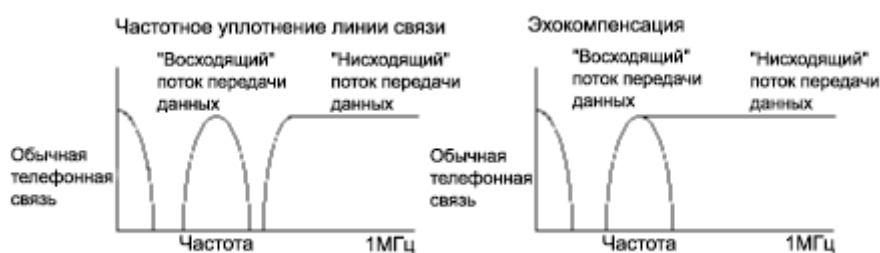


Рисунок 3.3 – Применение эхокомпенсации для экономии частотного ресурса

Кроме этого может применяться технология эхокомпенсации (Echo Cancellation), при использовании которой диапазоны «восходящего» и «нисходящего» потоков перекрываются (рисунок 3.3) и разделяются средствами местной эхокомпенсации. В системе предусмотрено две скорости передачи данных: в «нисходящем» потоке (передача данных от сети к компьютеру) скорость передачи больше, чем в «восходящем» потоке

(передача данных от компьютера в сеть).

Именно таким образом ADSL может обеспечить одновременную высокоскоростную передачу данных, передачу видеосигнала и передачу факса без прерывания обычной телефонной связи, для которой используется та же телефонная линия. Технология предусматривает резервирование определенной полосы частот для обычной телефонной связи (или POTS — Plain Old Telephone Service). Удивительно, как быстро телефонная связь превратилась не только в «простую» (Plain), но и в «старую» (Old); получилось что-то вроде «старой доброй телефонной связи». Разработчики новых технологий, все же оставили телефонным абонентам узенькую полоску частот для живого общения. При этом телефонный разговор можно вести одновременно с высокоскоростной передачей данных, а не выбирать одно из двух. Более того, даже если отключится электричество, то обычная «старая добрая» телефонная связь будет работать по-прежнему. Обеспечение такой возможности было одним из разделов оригинального плана разработки ADSL. Даже одна эта возможность дает системе ADSL значительное преимущество перед ISDN, которая полностью зависит от внешнего электропитания.

Одним из основных преимуществ ADSL над другими технологиями высокоскоростной передачи данных является использование обычных витых пар медных проводов телефонных кабелей. Очевидно, что таких пар проводов насчитывается гораздо больше, чем кабелей, проложенных специально для кабельных модемов. ADSL образует, если можно так сказать, «наложенную сеть». При этом дорогостоящей и отнимающей много времени модернизации коммутационного оборудования (как это необходимо для ISDN) не требуется.

Факторами, влияющими на скорость передачи данных, являются состояние абонентской линии (диаметр проводов, наличие кабельных отводов и т.п.) и ее длина. Затухание сигнала в линии увеличивается при увеличении длины линии и возрастании частоты сигнала, и уменьшается с увеличением диаметра провода. Фактически функциональным пределом для ADSL является абонентская линия длиной 3,5 — 5,5 км при толщине проводов 0,5 мм. В настоящее время ADSL обеспечивает скорость «нисходящего» потока данных в пределах от 1,5 Мбит/с до 8 Мбит/с и скорость «восходящего» потока данных от 640 Кбит/с до 1,5 Мбит/с. Общая тенденция развития данной технологии обещает в будущем увеличение скорости передачи данных, особенно в «нисходящем» направлении. Укртелеком предлагает максимум: ОГО! Ультра до 20 Мбит/с нисходящий поток 3 –восходящий за 130 грн/мес.

Для того, чтобы оценить скорость передачи данных, обеспечиваемую технологией ADSL, необходимо сравнить ее с той скоростью, которая может быть доступна пользователям, использующим другие технологии. Аналоговые модемы позволяют передавать данные со скоростью от 14,4 до 56 Кбит/с. ISDN обеспечивает скорость передачи данных 64 Кбит/с на канал

(обычно пользователь имеет доступ к двум каналам, что в сумме составляет 128 Кбит/с). Различные технологии DSL дают возможность передавать данные с различными скоростями (Таблица 3.1).

Кабельные модемы имеют скорость передачи данных от 500 Кбит/с до 10 Мбит/с (следует учитывать, что полоса пропускания кабельных модемов делится между всеми пользователями, одновременно имеющими доступ к данной линии, поэтому число одновременно работающих пользователей оказывает значительное влияние на реальную скорость передачи данных каждого из них). Цифровые линии E1 и E3 имеют скорость передачи данных 2,048 Мбит/с (E1) и 34 Мбит/с (E3).

Таблица 3.1 – Скорости передачи в различных технологиях xDSL

Наименование технологии DSL	Скорость передачи в потоках, Мбит/с	
	Нисходящий	Восходящий
IDSL основана на ISDN	0,144	0,144
HDSL	2,048	1,544
ADSL	1,5 — 8	0,64 — 1,50
VDSL	13 — 52	1,5 — 2,3

При использовании технологии ADSL полоса пропускания линии, с помощью которой пользователь связан с магистральной сетью, принадлежит этому пользователю всегда и целиком. Рассмотрим некоторые преимущества ADSL.

Скорость передачи данных. Скорости, указанные в таблице не являются пределом. В стандарте ADSL 2 реализованы скорости 10 Мбит/с для «нисходящего» и 1 Мбит/с «восходящего» потока при дальности до 3 км, а в технологии ADSL 2+, фигурируют скорости «нисходящего» потока в 20, 30 и 40 Мбит/с (соответственно по 2,3 и 4 парам проводов).

Полоса пропускания линии принадлежит пользователю целиком в отличие от кабельных модемов, которые допускают разделение полосы пропускания между всеми пользователями. Технология ADSL предусматривает использование линии только одним пользователем.

Ресурсы линии при использовании технологии ADSL используются полностью. При обычной телефонной связи используется около одной сотой пропускной способности телефонной линии. Технология ADSL устраняет этот «недостаток» и использует оставшиеся 99% для высокоскоростной передачи данных. При этом для различных функций используются различные полосы частот. Для телефонной (голосовой) связи используется область самых низких частот всей полосы пропускания линии (приблизительно до 4 кГц), а вся остальная полоса используется для высокоскоростной передачи данных.

Экономичность. Технология ADSL эффективна потому, что не требует прокладки специальных кабелей, а использует уже существующие

двухпроводные медные телефонные линии. Для того, чтобы линия ADSL работала, необходимо немного оборудования. На обоих концах линии устанавливаются модемы ADSL: один на стороне пользователя (дома или в офисе), а другой на стороне сети (у провайдера Интернет или на телефонной станции). Кроме того, пользователю для того, чтобы модем ADSL работал, необходимо иметь компьютер и интерфейсную плату.

3.3 Технология HDSL (*High Data Rate Digital Subscriber Line*) — высокоскоростная цифровая абонентская линия

Это первая технология высокоскоростной передачи данных (ПД) по скрученным медным парам телефонных кабелей, использующая высокие частоты. Была разработана в США в конце 80-х годов как более высокоскоростная, синхронная технология для организации каналов передачи не только данных, но и голосовых каналов, используя T1/E1.

HDSL может оперировать как скоростью T1 (1,544 Мбит/с) или E1 (2 Мбит/с). Более низкие скорости обслуживаются использованием каналов 64 Кбит/с, внутри T1/E1 пакета. Это обычно называется потоком T1/E1, и используется для предоставления низкоскоростных каналов пользователям. В таких случаях, скорость канала будет полной (T1/E1), но абонент получит только ограниченную скорость 64 Кбит/с (или несколько по 64 Кбит/с) со своей стороны.

Из-за необходимости обеспечения симметричной ПД максимальная скорость ПД поддерживается только на расстоянии не более 4,5 км при использовании одной или двух скрученных пар кабеля. Возможна ПД на большие расстояния, при условии использования регенераторов. Данные кодируются методом 2B1Q (два бита (2B) в один из четырех уровней напряжения (1Q)), используется дуплекс, а, следовательно, методы эхокомпенсации.

Технология VDSL (Very-high data rate Digital Subscriber Line, сверхвысокоскоростная цифровая абонентская линия) — самое современное на 2001-2006 года xDSL решение, продукт эволюции и конвергенции технологий ADSL и G.SHDSL.

По сравнению с ADSL, VDSL имеет значительно более высокую скорость передачи данных: от 13 до 52 Мбит/с в направлении от сети к пользователю (Downstream) и до 11 Мбит/с от пользователя к сети (Upstream) при работе в асимметричном режиме; максимальная пропускная способность линии VDSL при работе в симметричном режиме составляет примерно 26 Мбит/с в каждом направлении передачи. В зависимости от требуемой пропускной способности и типа кабеля длина линии VDSL лежит в пределах от 300 метров до 1,3 км.

Предоставление пользователю столь высоких пропускных способностей возможно только в смешанной *медно-оптической* сети доступа, к которой традиционная сеть доступа на металлических кабелях

будет мигрировать по мере появления новых приложений и связанного с этим увеличения числа пользователей, нуждающихся в столь высоких пропускных способностях технологии VDSL.

SHDSL (англ. *Single-pair High-speed + DSL*), G.shdsl, ITU G.991.2 — одна из xDSL технологий, обеспечивает симметричную дуплексную передачу данных сигнала по паре медных проводников. Используется преимущественно для соединения абонентов с узлом доступа провайдера (так называемая последняя миля). Основные идеи взяты из технологии HDSL2.

По стандарту технология SHDSL обеспечивает симметричную дуплексную передачу данных со скоростями от 192 Кбит/с до 2.3 Мбит/с (с шагом в 8 Кбит/с) по одной паре проводов, соответственно от 384 кбит/с до 4,6 Мбит/с.м. по двум парам. При использовании методов кодирования TC-PAM128, стало возможным повысить скорость передачи до 15,2 Мбит/сек по одной паре и до 30,4 Мбит/сек по двум парам.

3.4 Технологии кодирования, применяемые в HDSL

Наиболее широко сейчас применяются: технология ADSL для создания индивидуальных линий и технология HDSL для создания групповых линий. Как уже отмечалось, главной идеей технологии HDSL является использование существующего металлического кабеля для безрегенераторной передачи цифровых потоков 2 Мбит/с на большие расстояния. Оборудование HDSL применимо для работы по кабелю любого типа — симметричному городскому (ТПП), зонному (КСПП, ЗКП) и даже коаксиальному (после некоторой переработки линейных согласующих блоков).

Главные факторы, влияющие на качество работы оборудования HDSL — параметры линии связи.

1. *Ослабление сигнала.* Затухание сигнала в кабельной линии зависит от типа кабеля, его длины и частоты сигнала. Чем длиннее линия и выше частота сигнала, тем выше затухание.

2. *Нелинейность АЧХ.* Кабельная линия связи представляет собой фильтр нижних частот.

3. *Перекрестные помехи на ближнем и дальнем концах (FEXT, NEXT).*

4. *Радиочастотная интерференция.*

5. *Групповое время задержки.* Скорость распространения сигнала в кабеле зависит от его частоты, таким образом, даже при равномерной АЧХ форма импульса при передаче искажается.

Основу оборудования HDSL составляет линейный тракт, то есть способ кодирования (или модуляции) цифрового потока для его передачи по медной линии. Технология HDSL предусматривает использование двух технологий линейного кодирования — 2B1Q (2 binary, 1 quartenary; 2 бита 4-мя уровнями

- квартой) и CAP (Carrierless Amplitude and Phase Modulation). Обе технологии основаны на цифровой обработке передаваемого и принимаемого сигналов сигнальным процессором и обладают рядом общих принципов. Так, для снижения частоты линейного сигнала, а следовательно, повышения дальности работы, в технологии HDSL применена адаптивная эхокомпенсация. Суть ее состоит в том, что прием и передача ведутся в одном спектральном диапазоне, разделение сигналов осуществляет микропроцессор. Приемник модема HDSL как бы вычитает из линейного сигнала сигнал собственного передатчика и его эхо (сигнал, отраженный от дальнего конца кабеля или от места сочленения составного кабеля). Настройка системы HDSL под параметры каждой линии происходит автоматически, оборудование динамически адаптируется к параметрам каждого кабеля, поэтому при установке аппаратуры или ее переносе с одного участка на другой не требуется проведения каких-либо ручных настроек или регулировок.

Применение эхокомпенсации позволило вести не только в одном кабеле, но и по одной паре передачу в обоих направлениях, что также является ключевым преимуществом технологии HDSL перед применяемыми ранее методами линейного кодирования HDB3. Напомним, что построенные до появления технологий DSL тракты T1 или E1, помимо установки множества линейных регенераторов (через каждые 1000—1500 м), требовали прокладки двух кабелей, в одном из которых все пары задействовались под передачу, а в другом под прием.

Теперь рассмотрим более подробно каждый из методов кодирования HDSL.

3.5 Кодирование 2B1Q

Первой была разработана технология 2B1Q, которая остается широко распространенной в странах Западной Европы и США. Технология 2B1Q изначально использовалась в сетях ISDN для передачи потока 144 кбит/с (2B+D, BR ISDN). Затем она была модернизирована для передачи более высокоскоростных потоков. Код 2B1Q представляет собой модулированный сигнал, имеющий 4 уровня, то есть в каждый момент времени передается 2 бита информации (4 кодовых состояния). Спектр линейного сигнала симметричный и достаточно высокочастотный (рисунок 3.4), присутствуют также низкочастотные и постоянная составляющие.

Код 2B1Q передает пару бит за один битовый интервал. Каждой возможной паре в соответствие ставится свой уровень из четырех возможных уровней потенциала. Паре 00 соответствует потенциал $-2,5$ В, 01 соответствует $-0,833$ В, 11 — $+0,833$ В, 10 — $+2,5$ В.



Достоинство метода 2B1Q: сигнальная скорость у этого метода в два раза ниже, чем у кодов NRZ и AMI, а спектр сигнала в два раза уже. Следовательно с помощью 2B1Q-кода можно по одной и той же линии передавать данные в два раза быстрее. Недостаток метода 2B1Q: Реализация этого метода требует более мощного передатчика и более сложного приемника, который должен различать четыре уровня.

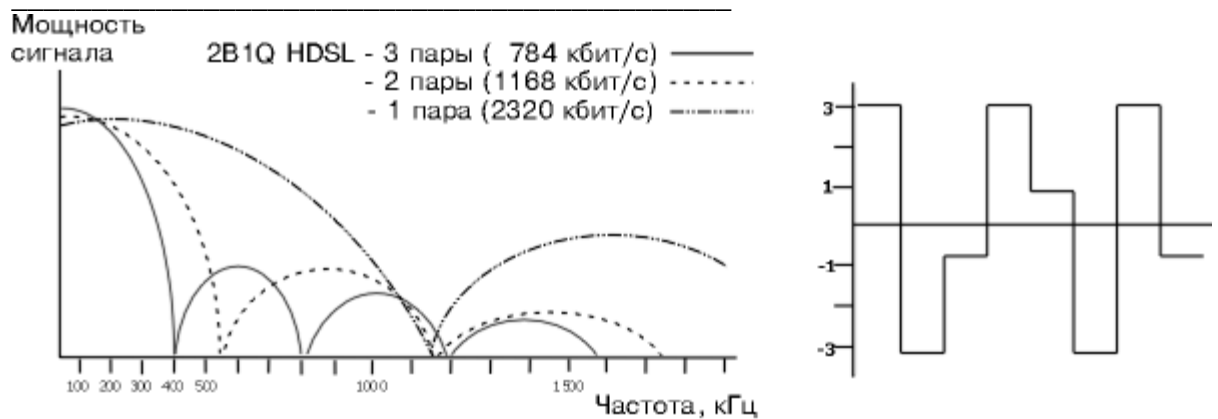


Рисунок 3.4 – Частотное и временное представление кода 2B1Q

На передачу кода 2B1Q оказывают влияние различные факторы. В городских условиях создается большое количество низкочастотных наводок, например при пуске мощных электрических машин (метро, трамваи и т.д.), электросварке, кроме того, в кабелях связи создается большое количество импульсных помех (набор номера, передача сигналов сигнализации и т.д.). Комплекты БИС (больших интегральных схем), реализующих технологию 2B1Q, используют достаточно сложные методы коррекции искажений в низкочастотной области спектра и обеспечивают удовлетворительное качество передачи. Вместе с тем кодирование 2B1Q все же остается чувствительным к искажениям, так как сигнал имеет постоянную составляющую, и более того, максимум энергетического спектра приходится на низкие частоты.

Большой разброс частот в спектре сигнала 2B1Q ведет к возникновению трудностей, связанных с групповым временем задержки. Микропроцессорная обработка, помогает решить эти проблемы, но алгоритм обработки сигнала существенно усложняется.

Серьезное влияние на передачу оказывает радиочастотная интерференция. Радиопередачи в диапазонах длинных и средних волн, работа мощных радиорелейных линий вызывают наводки на кабельную линию и мешают передаче кода 2B1Q, если имеют совпадающие участки спектров. Этот фактор особенно негативно сказывается при использовании аппаратуры HDSL для соединения студий и радиопередающих центров, а также при монтаже оборудования в помещениях или в непосредственной близости телерадиоцентров.

Спектр кода 2B1Q содержит высокочастотные составляющие, максимум энергии передается в первом "лепестке", ширина его пропорциональна скорости на линии. Затухание сигнала в кабеле растет с увеличением его частоты, поэтому в зависимости от требуемой дальности применяется одна из трех скоростей линейного сигнала (784, 1168 или 2320 кбит/с). Технология 2B1Q для передачи потока 2 Мбит/с использует одну, две или три пары медного кабеля. По каждой из пар передается часть потока (рисунок 5.4) с вышеупомянутыми скоростями. Наибольшая дальность работы достигается при использовании трех пар (около 4 км по жиле 0,4 мм), наименьшая — при работе по одной паре (менее 2 км).

Ввиду того, что дальность работы систем HDSL (кодирование 2B1Q), использующих одну пару, не удовлетворяет базовым требованиям по дальности, такие системы не нашли широкого распространения. Системы, работающие по трем парам, до сих пор достаточно широко используются, однако постепенно вытесняются системами, применяющими технологию кодирования CAP и обеспечивающими ту же дальность по двум парам. Из систем с кодированием 2B1Q наибольшее распространение имеют системы, работающие по двум парам. Их дальность работы (около 3 км по жиле 0,4 мм) обеспечивает подавляющее большинство задач доступа в странах Западной Европы и США, где длина АЛ в 80% случаев (данные Schmid Telecom AG) не превышает 3 км.

По мнению большинства экспертов, с технической точки зрения технология 2B1Q несколько уступает более поздней технологии линейного кодирования — CAP. Однако в мире до сих пор производится большое количество оборудования, использующего 2B1Q, потому что: *во-первых*, длина абонентских линий в США и Западной Европе, как правило, небольшая, так что дальности 2B1Q вполне достаточно, качество кабеля в вышеупомянутых регионах также высокое, что снижает влияние различных мешающих факторов; *во-вторых*, важным достоинством технологии 2B1Q является ее дешевизна. Около десяти крупных производителей БИС поставляют комплексные решения для создания оборудования HDSL по технологии 2B1Q. Наличие конкуренции, естественно, положительно сказывается на цене микросхем и готовых модулей приемопередатчиков. По мнению зарубежных экспертов, технология 2B1Q становится все более и более "доступной": многие компании, даже не специализирующиеся на производстве оборудования xDSL, получают возможность быстро и дешево

разработать собственное устройство или блок HDSL с использованием готовых решений (иногда целых HDSL модулей) от поставщиков БИС, таких, как Metalink, Brooktree (Rockwell), PairGain Technologies и др.

3.6 Кодирование CAP

В странах Восточной Европы, Южной Америки, Азии из-за большей длины абонентских и соединительных линий, более низкого качества проложенных кабелей, большим спросом пользуются системы HDSL, базирующиеся на технологии CAP (Carrierless Amplitude and Phase Modulation) — амплитудно-фазовой модуляции без передачи несущей. Разработчик технологии — компания GlobeSpan (бывшая AT&T) — поставила себе целью создать узкополосную технологию линейного кодирования, нечувствительную к большинству внешних помех, что, как показывает опыт внедрения систем HDSL CAP в мире, вполне удалось. Алгоритм CAP модуляции является разновидностью QAM модуляции.

Квадратурная (амплитудная) модуляция (КАМ; *Quadrature Amplitude Modulation (QAM)*) — разновидность амплитудной модуляции сигнала, которая представляет собой сумму двух несущих колебаний одной частоты, но сдвинутых по фазе относительно друг друга на 90° , каждое из которых модулировано по амплитуде своим модулирующим сигналом:

$$S(t) = I(t) \cos(2\pi f_0 t) + Q(t) \sin(2\pi f_0 t),$$

где $I(t)$ и $Q(t)$ — модулирующие сигналы, f_0 — несущая частота.

При использовании КАМ-модуляции передаваемая информация кодируется одновременными изменениями амплитуды и фазы несущего колебания.

Модуляция CAP сочетает в себе последние достижения модуляционной технологии и микроэлектроники. При CAP модуляции сигнала несущая частота модулируется по амплитуде и фазе, создавая кодовое пространство с 64 или 128 состояниями, при этом перед передачей в линию сама несущая, не передающая информацию, но содержащая наибольшую энергию, "вырезается" из сигнала, а затем восстанавливается микропроцессором приемника. Соответственно 64-позиционной модуляционной диаграмме сигнал CAP-64 передает 6 бит информации в каждый момент времени, то есть в 16 раз больше по сравнению с 2B1Q. Модуляция CAP-128, применяемая в системах SDSL (2 Мбит/с по одной паре), имеет 128-позиционную модуляционную диаграмму и, соответственно, передает 7 бит за один такт. Итогом повышения информативности линейного сигнала является существенное снижение частоты сигнала и ширины спектра, что, в свою очередь, позволило избежать диапазонов спектра, наиболее подверженных различного рода помехам и искажениям. На рисунке 3.5 показаны спектр и модуляционная диаграмма сигнала CAP.

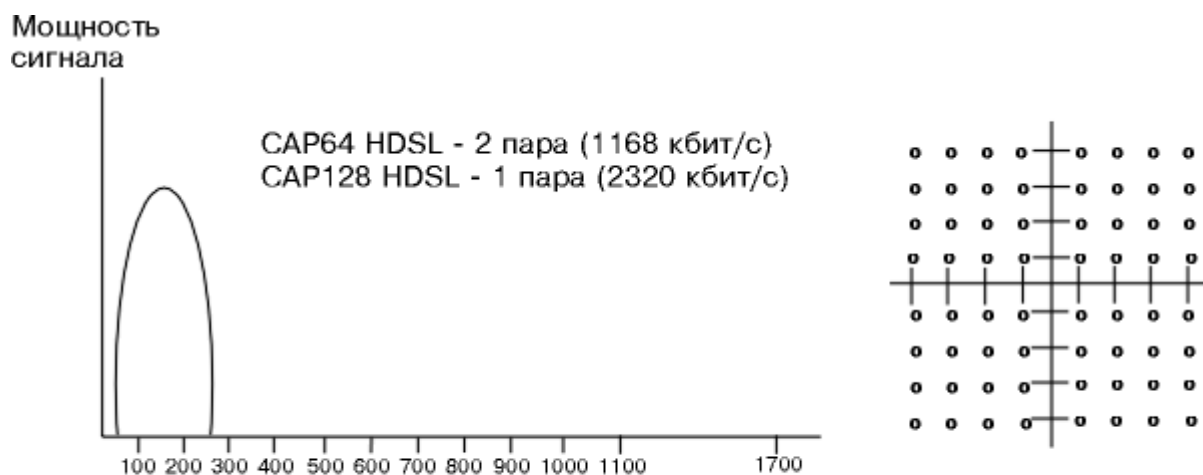
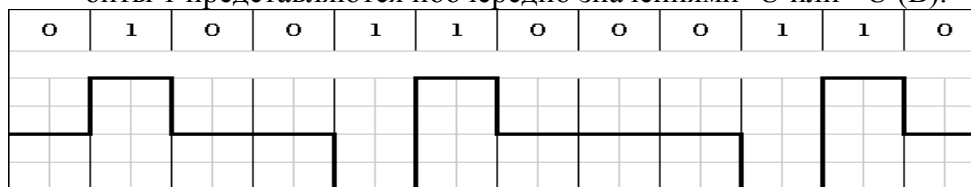


Рисунок 3.5 – Спектр и модуляционная диаграмма технологии CAP

Для иллюстрации достоинств модуляции CAP на рисунке 3.6 показаны спектры сигналов с кодом HDB3 (технология, применяемая ранее для линий E1, в частности, используемая в линейных тактах систем типа ИКМ-30), 2B1Q и CAP.

AMI-код использует следующие представления битов:

- биты 0 представляются нулевым напряжением (0 В);
- биты 1 представляются поочередно значениями $-U$ или $+U$ (В).



AMI-код обладает хорошими синхронизирующими свойствами при передаче серий единиц и сравнительно прост в реализации. Недостатком кода является ограничение на плотность нулей в потоке данных, поскольку длинные последовательности нулей ведут к потере синхронизации. Используется в телефонии уровня передачи данных, когда используются потоки мультиплексирования.

Код HDB3 – то же что и AMI, только кодирование последовательностей из четырех нулей заменяется на код $-V, 0, 0, -V$ или $+V, 0, 0, +V$ — в зависимости от предыдущей фазы сигнала.

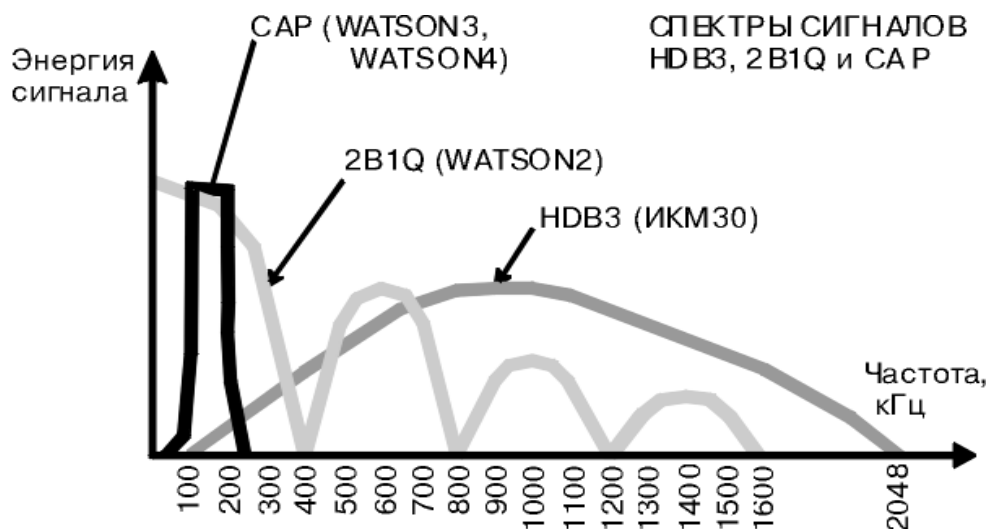


Рисунок 3.6 - Спектры сигналов HDB3, 2B1Q, CAP

Из сравнительного анализа спектров вытекают положительные особенности систем HDSL, основанных на CAP модуляции: дальность работы; помехоустойчивость; малый уровень создаваемых помех, что обеспечивает совместимость с аппаратурой уплотнения, работающей по соседним парам.

1. Дальность работы аппаратуры

Затухание в кабеле пропорционально корню из частоты сигнала, поэтому сигнал CAP, спектр которого не имеет составляющих выше 260 кГц, распространяется на большее расстояние, чем сигнал с кодом 2B1Q или HDB3. Выходная мощность в системах HDSL ограничена стандартами (+13,5 дБ), а чувствительность приемника из-за шумов не может превышать -43 дБ, поэтому снижение частоты линейного сигнала увеличивает дальность работы систем CAP по сравнению с 2B1Q. Для систем, работающих по двум парам, выигрыш составляет 15—20% (для жилы 0,4—0,5 мм), для систем SDSL (работающих по одной паре) — 30...40%. Дальность передачи (без регенераторов), достигаемая в HDSL CAP, выше дальности работы линейного тракта ИКМ-30 (HDB-3) на 350—400% (в 4-5 раз).

2. Высокая помехоустойчивость и нечувствительность к групповому времени задержки

Из-за отсутствия в спектре высокочастотных (свыше 260 кГц) и низкочастотных (ниже 40 кГц) составляющих, технология CAP нечувствительна к высокочастотным наводкам (перекрестные помехи, радиоинтерференция) и импульсным шумам, так же как и к низкочастотным наводкам и искажениям, например, при пуске мощных электрических машин (ж/д, метро) или электросварке. Поскольку ширина спектра составляет лишь 200 кГц, не проявляются эффекты, вызываемые групповым временем задержки.

3. Минимальный уровень помех и наводок на соседние пары.

Сигнал CAP не вызывает интерференции (взаимовлияния) и помех в спектре обычного (аналогового) телефонного сигнала, так как в спектре нет составляющих ниже 4 кГц. Это снимает ограничения на использование соседних пар для обычных (аналоговых) абонентских или межстанционных соединений.

4. Совместимость с аппаратурой уплотнения, работающей по соседним парам.

Большинство аналоговых систем уплотнения абонентских и соединительных линий используют спектр до 1 МГц. Системы с модуляцией CAP могут вызывать наводки на частотные каналы в диапазоне 40—260 кГц, однако остальные каналы не подвергаются какому-либо влиянию, следовательно, есть возможность использования аппаратуры HDSL CAP в одном кабеле с аналоговой аппаратурой уплотнения. Системы же HDSL с модуляцией 2B1Q вызывают наводки фактически на все частотные каналы аналоговых систем уплотнения, нагружающих соседние пары, поэтому, как правило, не могут быть использованы в одном кабеле с аналоговой аппаратурой уплотнения.

В таблице 3.1 представлены типовые значения дальности работы оборудования HDSL WATSON (производство Schmid Telecom AG, Швейцария) различных серий. Оборудование WATSON 2 использует кодирование 2B1Q и работает по двум парам, WATSON 3 использует CAP-64 и работает также по двум парам, а работающая по одной паре аппаратура WATSON 4 применяет модуляцию CAP-128. Приведенные в таблице данные являются лишь типовыми значениями, измеренными на определенных кабелях при заданных уровнях шумов (в соответствии со стандартами ETSI). В случае, когда приведенная в таблице дальность оказывается недостаточной (длина линии, на которой необходимо организовать цифровой тракт, превышает типовые значения), применяется регенератор. Его организуют из двух блоков HDSL, соединенных "спина к спине", или выполняют в специальном корпусе в качестве особого устройства. Регенератор удваивает рабочую дистанцию, на одной линии теоретически возможно использование до 7—8 регенераторов.

Таблица 3.1. Характерная дальность работы систем HDSL и SDSL WATSON

Диаметр жилы	Допустимая длина линии без регенераторов		
	WATSON 2 (2B1Q)	WATSON 3 (CAP-64)	WATSON 4 (CAP-128)
0,4 мм	до 4 км	4-5 км	3,0 км
0,6 мм	до 6 км	6-7 км	4,2 км
0,8 мм	до 9 км	до 9 км	6,3 км

При проектировании сети важно на практике определить пригодность кабельных пар к работе оборудования HDSL. Приблизительно оценить возможность применения системы HDSL поможет таблица 5.1. Чтобы

получить более точные результаты, следует провести ряд измерений (определить NEXT, FEXT – некоторые аналоги переходных затуханий на ближнем и дальнем концах линии), с помощью специального тестера, позволяющего генерировать характерные для HDSL значения перекрестных помех и проверить затухание в линии на характерных частотах. Часто бывает значительно проще и дешевле проверить кабельные пары пробным включением пары модемов HDSL, обеспечивающих полную диагностику в соответствии с рекомендацией ITU-T G.826. Такой подход позволит не только на 100% определить, пригодна ли линия для аппаратуры конкретного типа (2B1Q, CAP-64 или CAP-128), но и измерить большое количество качественных характеристик полученного цифрового тракта (BER и др.).

3.7 Многочастотный алгоритм модуляции DMT

Основные положения этого алгоритма модуляции были сформулированы и запатентованы специалистами Amati Communications (в настоящий момент эта компания является частью Texas Instruments Internet Access group) в начале 90-х годов. В 1993 году технология была выбрана ANSI (American National Standards Institute – институт стандартов) в качестве алгоритма линейного кодирования для перспективных систем передачи данных. Сложность технической реализации данного алгоритма на первоначальном этапе развития DSL-технологий ограничивала область его применения. В настоящий момент алгоритм DMT имеет многочисленные технические реализации и является одним из основных алгоритмов модуляции для наиболее перспективных технологий ADSL, HDSL и VDSL.

Алгоритм DMT построен по принципиально иной по сравнению с CAP схеме. Данный алгоритм использует не одну частоту, а группу несущих частот. При использовании этого алгоритма модуляции весь расчетный диапазон частот линии делится на несколько участков шириной по 4,3125 кГц. Каждый из этих участков используется для организации независимого канала передачи данных (Рисунок 3.7).

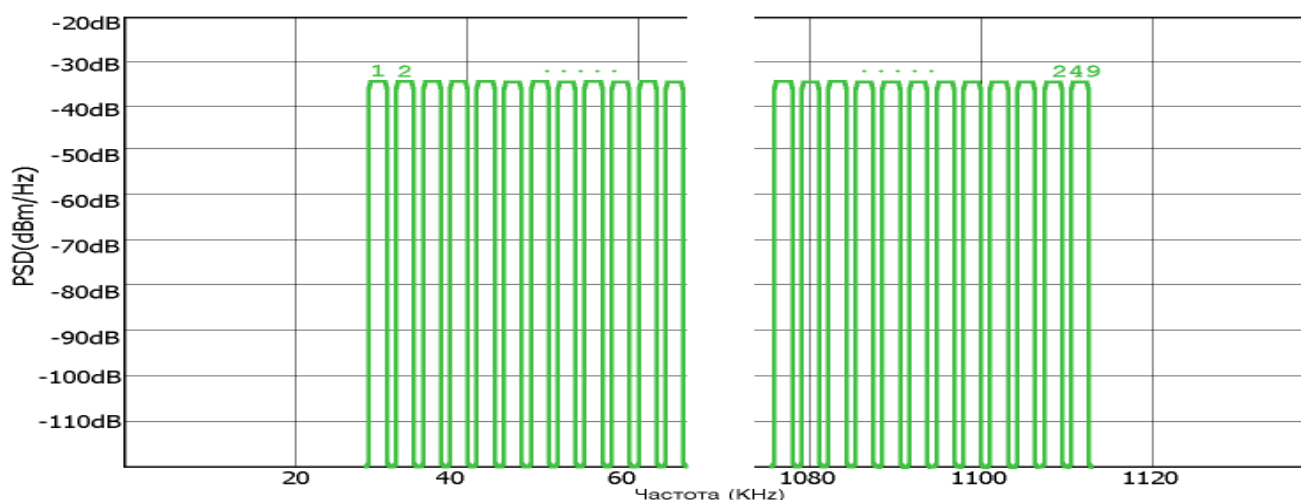


Рисунок 5.7 – Структура нисходящего потока при DMT-модуляции

На рисунке представлен вариант частотной организации нисходящего потока стандарта G.DMT для варианта с подавлением эхо-сигналов (echo cancellation). Для данного варианта в направлении абонента организуется 249 частотных каналов. Кроме того, для этого варианта характерно перекрытие частотных диапазонов, которые используются для входящего и исходящего информационных потоков. На рисунке 3.8 представлен вариант частотной организации восходящего потока G.DMT.

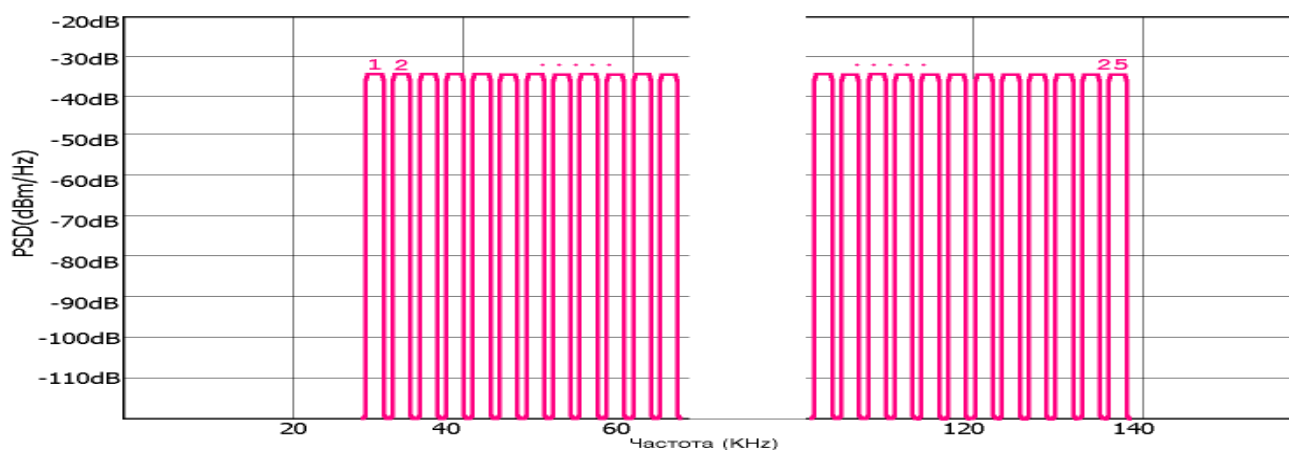


Рисунок 3.8 – Структура восходящего потока при DMT-модуляции

На этапе проверки качества линии передатчик, исходя из уровня помех в частотном диапазоне участка, для каждого из каналов выбирает подходящую модуляционную схему. На чистых каналах с малым уровнем шумов могут быть использованы алгоритмы с большими значениями индекса модуляции, например, QAM 64, в то время, как на более зашумленных участках могут применяться более простые алгоритмы модуляции. Очевидно, что использование такого принципа регулирования скорости передачи данных, позволяет наиболее точно согласовать параметры модулированного сигнала с параметрами линии, по которой сигнал будет передаваться. При передаче данных информация распределяется между независимыми каналами пропорционально их пропускной способности, приемник выполняет операцию демультимплексирования и восстанавливает исходный информационный поток. На рисунке 3.9 показан пример адаптации системы к конкретной линии.

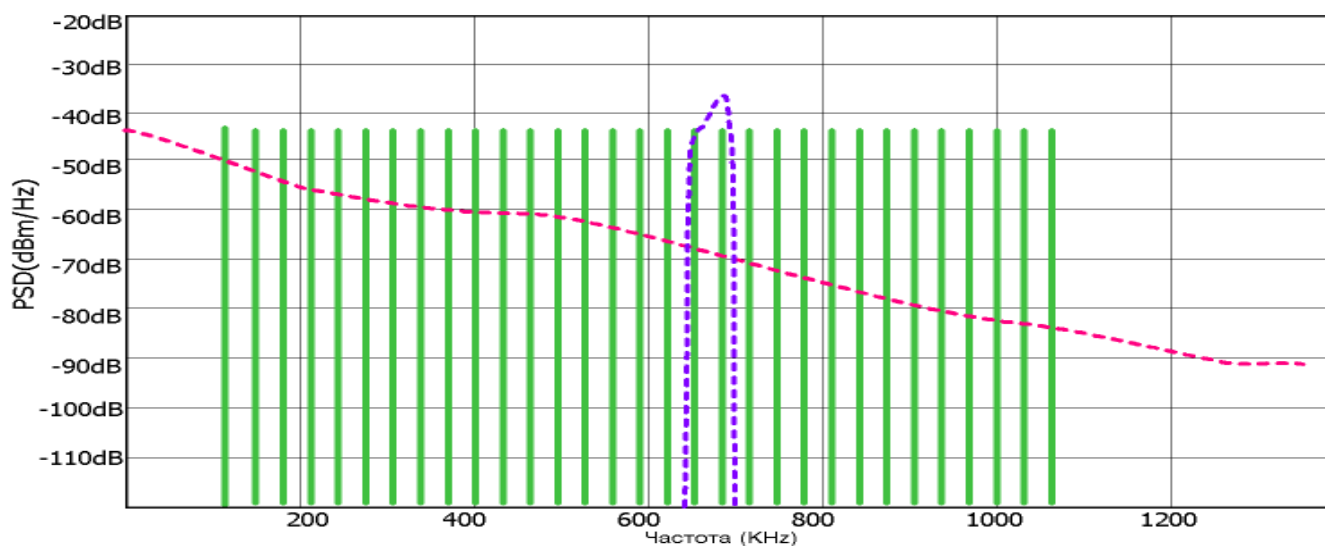


Рисунок 3.9 – Пример адаптации характеристики DMT-передатчика

На рисунке 3.9 зеленым цветом обозначена неадаптированная частотная характеристика DMT-передатчика. Красным цветом выделена кривая зависимости затухания в линии от частоты передаваемого сигнала. Линией синего цвета обозначена частотная помеха, которая постоянно действует в сравнительно небольшом участке в пределах рабочего диапазона частот передатчика.

На рисунке 3.10 приведена адаптированная характеристика DMT-передатчика.

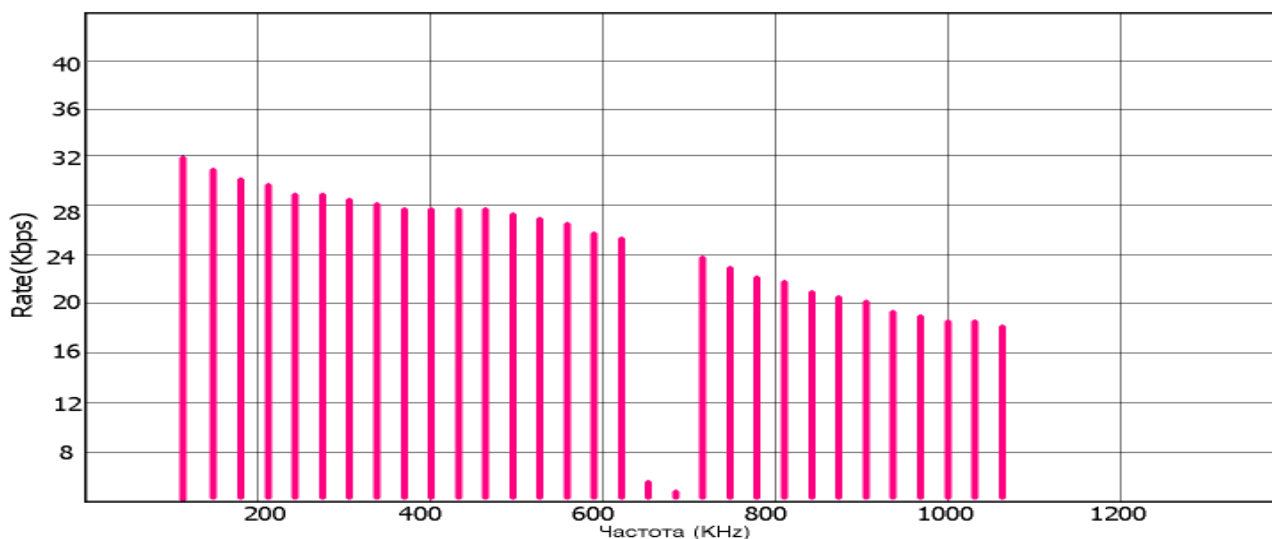


Рисунок 3.10 - Адаптированная характеристика DMT-передатчика

После выполнения операций согласования пропускной способности элементарных каналов с приведенными частотными характеристиками линии зависимость скоростей передачи данных от частотного номера элементарного канала будет соответствовать кривым, которые приведены на рисунке 3.10.

Достоинства алгоритма

Алгоритм модуляции DMT представляет собой дальнейшее развитие идеи, которая была положена в основу алгоритмов QAM. В силу этого он, безусловно, способен обеспечить высокую скорость и надежность передачи данных. К дополнительным достоинствам этого алгоритма относятся возможность оперативной и точной адаптации приемо-передающих устройств к характеристикам линии и практически повсеместное признание этого алгоритма стандартизирующими организациями (в первую очередь ANSI).

Недостатки алгоритма

К недостаткам алгоритма модуляции DMT относятся его громоздкость и недостаточная технологичность. Алгоритм DMT является самым сложным для аппаратной реализации среди всех алгоритмов, которые в настоящее время используются для формирования линейного кода устройств DSL. Тем не менее этот алгоритм утвержден ANSI в качестве основного алгоритма линейного кодирования для ADSL и VDSL.

4 МЕТОДЫ КОДОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ КАНАЛОВ

Классификация систем передачи, использующих единый ресурс (мультиплексирование и множественный доступ); принцип и основная характеристика CDMA; прямое расширение спектра; многоканальное расширение спектра; расширение спектра скачкообразным изменением частоты; расширение спектра скачкообразным изменением частоты; порядок прохождения речевых данных в мобильной станции до момента отправки в эфир; эволюция систем сотовой связи, использующих технологию CDMA.

4.1 Классификация систем передачи, использующих единый ресурс

Любой сигнал занимает определенную полосу частот, существует некоторое время, обладает ограниченной энергией и распространяется в определенной области пространства. В соответствии с этим выделяют четыре вида ресурса канала: частотный, временной, энергетический и пространственный.

Проблема эффективного использования ресурса общего канала обострилась из-за необходимости обеспечения связи в условиях неравномерности и непредсказуемости запросов потребителей во времени. При решении этой проблемы применяются методы мультиплексирования и множественного доступа (multiple access). Понятия «мультиплексирование» и «множественного доступа» сходны тем, что они предполагают распределение ресурса между пользователями. В то же время между ними есть существенные различия. При мультиплексировании ресурс канала связи распределяется через общее оконечное оборудование, формирующее

групповой сигнал $S_{\Sigma}(t)$. При *множественном доступе*, $S_{\Sigma}(t)$ образуется в результате сложения сигналов пользователей непосредственно в канале (рисунок 4.1). На этом рисунке ИС – источник сообщения, ПРД - передатчик, ПРМ - приемник, ПС – получатель сообщения). Множественный доступ характерен для спутниковых каналов, радиоканалов, каналов мобильной связи.

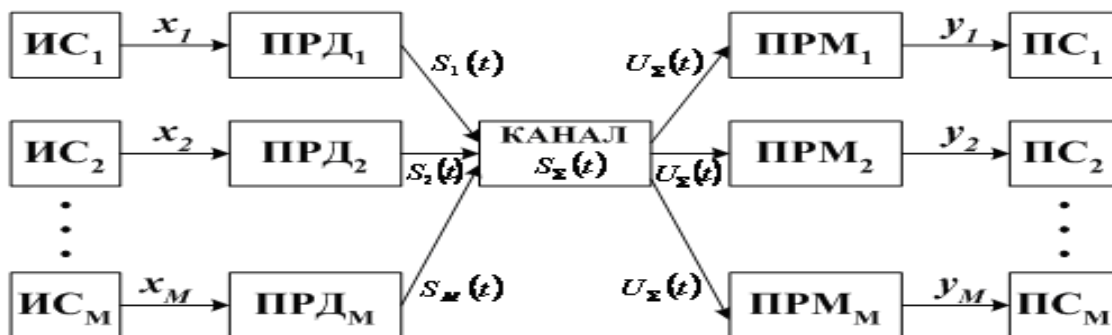


Рисунок 4.1 – Система передачи с множественным доступом

Мультиплексирование основано на общем аппаратном обеспечении, а множественный доступ (МД) использует определенные процедуры (протоколы), реализуемые с помощью программного обеспечения, хранящегося в памяти каждого терминала. На рисунке 4.2 представлены методы мультиплексирования.

В большинстве случаев для мультиплексирования канала источнику сообщений выделяется специальный сигнал, называемый канальным. Промодулированные сообщениями канальные сигналы объединяются, в результате чего образуется групповой сигнал $S_{гр}(t)$. Если операция объединения линейна, то $S_{гр}(t) = S_{\Sigma}(t)$ будет линейным групповым сигналом. Он, как правило, образуется линейным суммированием промодулированных канальных сигналов.



Рисунок 4.2 - Методы мультиплексирования

В системах так называемого комбинационного уплотнения групповой сигнал формируется посредством определенной логической (нелинейной) обработки, в результате которой каждый элемент сформированного сигнала отображает информацию (комбинацию символов) от всех ИС. Классическим примером такой системы является система двукратного частотного телеграфирования. Для передачи четырех комбинаций символов двух каналов используется четыре частоты: $f_1 - 00, f_2 - 01, f_3 - 10, f_4 - 11$.

Устройство разделения линейного группового сигнала $S_2(t)$ представляет собой набор линейных избирательных цепей, каждая из которых выделяет только свой каналный сигнал и в идеальном случае совсем не реагирует на другие каналные сигналы. Для осуществления подобного идеального разделения необходимо и достаточно, чтобы промодулированные каналные сигналы составляли ансамбль линейно независимых сигналов. В качестве таких сигналов обычно используют ансамбли ортогональных сигналов.

В классе линейного уплотнения по виду отличительного признака каналного сигнала различают временное разделение каналов (ВРК), частотное (ЧРК) и разделение каналов по форме сигналов, называемое кодовым разделением каналов (КРК). Вместо термина «разделение» применяют и термин «уплотнение». При ЧРК полоса частот общего канала Δf разделяется на несколько более узких полос Δf_i , каждая из которых образует канал ИС. При ВРК вся полоса Δf предоставляется поочередно через определенные интервалы времени различным источникам для передачи сообщений. При КРК нет деления общего канала между ИС ни по частоте, ни по времени. Канальные сигналы различных ИС, перекрываясь по времени и частоте, остаются ортогональными за счет различия формы, что и обеспечивает их разделение.

Возможны варианты комбинирования указанных методов. Так, в мобильной связи в качестве метода множественного доступа широко используются комбинации ЧРК и ВРК, ВРК и КРК. В первой комбинации каждый частотный канал предоставляется нескольким пользователям на определенные промежутки времени. При второй комбинации в полосе частот Δf формируют каналы с временным разделением, которые предоставляются нескольким пользователям на принципах КРК.

При организации многоканальной передачи информации, каналные сигналы могут быть заранее определенным образом распределены между источниками сообщений. Такое уплотнение называется уплотнением с закрепленными каналами. Соответствующая ему многоканальная система передачи также будет называться системой с *закрепленными каналами*. Возможна и такая организация многоканальной передачи информации, когда каналные сигналы не распределяются заранее между источниками, а выделяются каждому источнику по мере необходимости. Такое уплотнение называется уплотнением с *незакрепленными каналами*. Очевидно, для правильного разделения каналов в системах с незакрепленными каналами

необходимо каким-либо образом передать на приемную сторону адресную информацию.

Основные понятия и определения, введенные для *многоканальных систем*, применимы и для систем *множественного доступа* (МД). К настоящему времени изучено и предложено большое число разнообразных методов МД. Они различаются способом распределения коллективного ресурса канала (фиксированный или динамический), природой процессов принятия решения (централизованные или распределенные), а также степенью адаптации режима доступа к изменяющимся условиям.

Множественный доступ характерен для спутниковых каналов (в этом случае применяют термин «многостанционный доступ»), радиоканалов (пакетная радиосвязь), каналов мобильной связи, а также для многоточечных телефонных линий, локальных сетей.

Все существующие методы МД можно сгруппировать и выбрать в качестве основания классификации способ управления распределением ресурса общего канала (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 - Методы множественного доступа

Протоколы случайного доступа. При случайном МД весь ресурс канала связи представляется как один канал, доступ в который происходит случайно, в результате чего возможно столкновение пакетов передаваемой информации. Корреспондентам предлагается совершить определенную последовательность действий с целью разрешения конфликта. Каждый пользователь при необходимости может передавать данные в канал, не выполняя явного согласования с другими пользователями. Наличие обратной связи позволяет взаимодействующим корреспондентам контролировать прохождение передаваемой информации.

Возможны два варианта реализации стратегии случайного доступа: без контроля несущей и с контролем несущей.

Случайный доступ *без контроля несущей* состоит в том, что при необходимости передать данные, терминал пользователя сразу начинает передачу пакетов. Поскольку пакеты передаются без синхронизации между

собой, возможно их наложение, что вызывает взаимные помехи. При возникновении такого конфликта, подтвержденного сигналом обратной связи, терминалы повторяют передачу искаженных пакетов. Во избежании повторения конфликтов промежутки времени до начала повторной передачи на каждом терминале выбираются случайно.

Случайный доступ с контролем несущей предполагает возможность контролировать наличие передачи информации другими корреспондентами. В случае отсутствия передачи данных незанятые временные промежутки имеются для передачи своей информации. В случае столкновения пользователи задерживают передачу пакетов на интервал времени Δt . В настоящее время существуют две разновидности протокола: *настойчивый и ненастойчивый*. Различие заключается в том, что в первом случае пользователи подвижных объектов, обнаруживая столкновения, начинают передачу сразу, а при втором через определенный интервал времени.

Протоколы фиксированного закрепления ресурса канала обеспечивают статическое распределение ресурса канала между пользователями. Наиболее типичными представителями протоколов данного типа являются многостанционный доступ с частотным разделением (FDMA), многостанционный доступ с временным разделением (TDMA), многостанционный доступ с кодовым разделением (CDMA).

Фиксированное закрепление ресурса канала не может обеспечить динамически изменяющиеся требования пользователей сети, т.е. имеет жесткое управление.

Методы *назначения ресурса по требованию* позволяют избавиться от недостатков, присущих вышеперечисленным методам, но предполагают подробную и четкую информацию о требованиях пользователей сети. По природе процессов принятия решения методы назначения ресурса по требованию подразделяют на *централизованные* и *распределенные*.

Централизованные методы назначения ресурса по требованию, характеризуются наличием запросов на передачу со стороны терминалов источника сообщения. Принятие решения о предоставлении ресурса осуществляется центральной станцией. Соответствующие протоколы отличаются наличием жестко закрепленных за каждым подвижным объектом каналов резервирования и наличием центральной станции управления. Протоколы характеризуются высоким значением коэффициента использования пропускной способности базовой станции, однако критичны к нарушениям функционирования системы управления.

Распределенные методы назначения ресурса по требованию отличаются тем, что все пользователи производят одни и те же операции, не прибегая к помощи центральной станции, и используют дополнительную служебную информацию, которой обмениваются друг с другом. Все алгоритмы с распределенным управлением требуют обмена управляющей информацией между пользователями. Протоколы характеризуются жестким закреплением каналов резервирования за подвижным объектом. При этом на

каждом объекте имеется таблица закрепления запросных каналов, следовательно, любой подвижный объект в любой момент времени имеет информацию о состоянии всей сети.

Комбинированные методы представляют собой комбинации предыдущих методов распределения ресурса, и реализуют стратегии, в которых выбор метода является адаптивным для различных пользователей с целью получения характеристик используемого ресурса канала, близких к оптимальным. В качестве критерия оптимальности, как правило, принимается коэффициент использования пропускной способности канала. На основе протоколов данного типа осуществляется подстройка параметров под конкретную обстановку в сети.

Таким образом, каждый из рассмотренных способов распределения ресурса обладает достоинствами и недостатками. На практике целесообразно иметь всю совокупность методов и осуществлять адаптивный переход от одного метода к другому при определенных изменениях рабочих условий.

6.2 Принцип и основная характеристика CDMA

Популярно принцип работы систем сотовой связи (ССС) с кодовым разделением каналов можно пояснить следующим примером. Предположим, что вы сидите в зале ожидания вокзала. На каждой скамейке находится два человека. Одна пара разговаривает между собой на английском языке, другая на русском, третья на немецком и т.д. Таким образом, в зале все разговаривают в одно и то же время в одном диапазоне частот (речь от 3 кГц до 20 кГц), при этом вы, разговаривая со своим оппонентом, понимаете только его, но слышите всех.

Принципы кодового разделения каналов связи CDMA основаны на использовании широкополосных сигналов (ШПС), полоса которых значительно превышает полосу частот, необходимую для обычной передачи сообщений, например, в узкополосных системах с частотным разделением каналов (FDMA). Основной характеристикой ШПС является **база сигнала**, определяемая как произведение ширины его спектра **F** на его длительность **T**:

$$B = F * T$$

В результате перемножения сигнала источника псевдослучайного шума с информационным сигналом энергия последнего распределяется в широкой полосе частот, т. е. его спектр расширяется. В радиоустройствах, построенных по технологии Spread Spectrum (распределенный спектр), расширение спектра передаваемого сигнала осуществляется при помощи псевдослучайной последовательности (Pseudorandom Number, PN), задающей алгоритм распределения. Каждое приемное устройство для декодирования сообщения должно знать кодирующую последовательность. Устройства, имеющие различные PN, фактически не "слышат" друг друга. Так как мощность сигнала распределяется по широкой полосе, сам сигнал

оказывается "спрятанным" в шумах и по своим спектральным характеристикам также напоминает шум в радиоканале.

Метод широкополосной передачи подробно описан К. Шенноном, который ввел понятие пропускной способности канала и установил связь между возможностью осуществления безошибочной передачи информации по каналу с заданным отношением сигнал/шум и полосой частот, отведенной для передачи информации. Для любого заданного отношения сигнал/шум малая частота ошибок при передаче достигается при увеличении полосы частот, отводимой для передачи информации.

В цифровых системах связи, передающих информацию в виде двоичных символов, длительность ШПС T и скорость передачи сообщений C связаны соотношением $T = 1/C$. Поэтому база сигнала $B = F/C$ характеризует расширение спектра ШПС ($S_{шпс}$) относительно спектра сообщения. Ширина спектра определяется минимальной длительностью импульса (t_0), т.е. $F=1/t_0$ и $B = T/t_0 = F/\Delta f$ (Δf – ширина спектра информационного сигнала).

Расширение спектра частот передаваемых цифровых сообщений может осуществляться разными методами и/или их комбинацией. Перечислим основные:

- прямым расширением спектра частот (**DSSS-CDMA**);
- с многоканальным расширением спектра частот (**MC-CDMA**)
- скачкообразным изменением частоты несущей (**FHSS-CDMA**).

6.3 Прямое расширение спектра - DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Каналы трафика при таком способе разделения среды создаются применением широкополосного кодо-модулированного радиосигнала — шумоподобного сигнала, передаваемого в общий для других аналогичных передатчиков канал, в едином широком частотном диапазоне. В результате работы нескольких передатчиков эфир в данном частотном диапазоне становится ещё более шумоподобным. Каждый передатчик модулирует сигнал с применением присвоенного в данный момент каждому пользователю отдельного числового кода, приёмник, настроенный на аналогичный код, выделяет из общего радиосигнала ту часть, которая предназначена данному приёмнику. В явном виде отсутствует временное или частотное разделение каналов, каждый абонент постоянно использует всю ширину канала, передавая сигнал в общий частотный диапазон, и принимая сигнал из общего частотного диапазона. При этом широкополосные каналы приёма и передачи находятся на разных частотных диапазонах и не мешают друг другу. Полоса частот одного канала очень широка, разговоры абонентов накладывается друг на друга, но, поскольку их коды модуляции сигнала отличаются, они могут быть дифференцированы аппаратно-программными средствами приёмника.

Техника расширения спектра позволяет увеличить пропускную способность при неизменной мощности сигнала. Передаваемые данные комбинируются с более быстрым шумоподобным псевдослучайным сигналом с использованием операции побитового взаимоисключающего ИЛИ (хор – сложение по модулю 2) (рисунок 4.4). Сигнал данных с длительностью импульса T_b комбинируется при помощи операции ИЛИ (складывается по модулю 2) с кодом сигнала, длительность импульса которого равна T_c (ширина полосы пропускания пропорциональна $1/T$, где T - время передачи одного бита), следовательно ширина полосы пропускания сигнала с данными равна $1/T_b$, а ширина полосы пропускания получаемого сигнала равна $1/T_c$. Так как T_c намного меньше T_b , ширина полосы частот получаемого сигнала намного больше, чем таковая оригинального сигнала передаваемых данных. Величина T_b/T_c является базой сигнала и, в какой-то мере, определяет верхний предел числа пользователей, поддерживаемых базовой станцией одновременно.

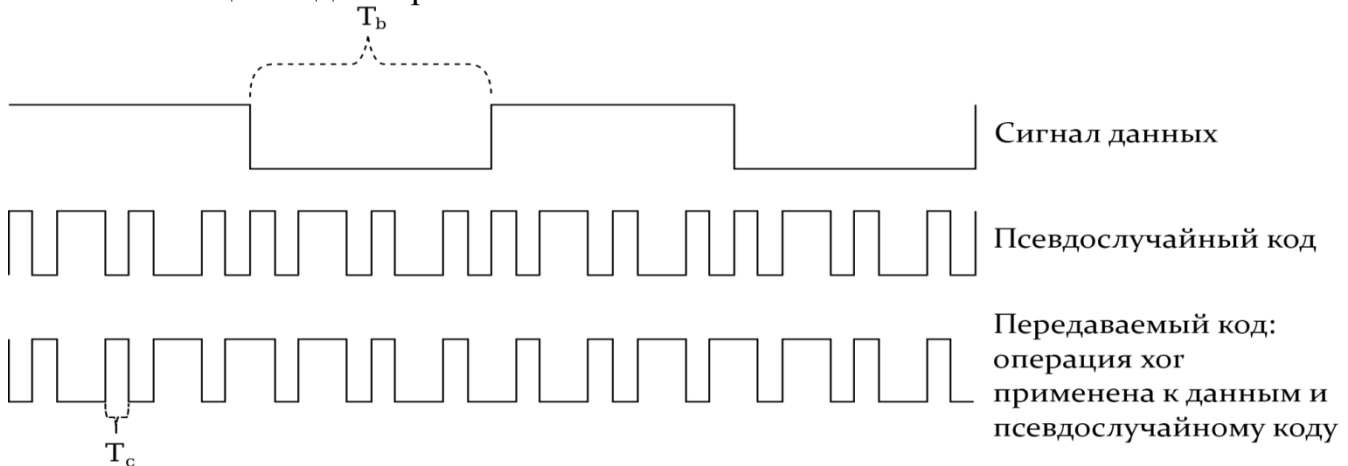


Рисунок 4.4 – Кодовое кодирование дискретного сигнала (временная область)

При использовании метода **DSSS-CDMA** узкополосный сигнал (рисунок 6.5) умножается на псевдослучайную последовательность (ПСП) с периодом повторения T , включающую N бит последовательности длительностью t_0 каждый. В этом случае база ШПС численно равна количеству элементов ПСП $B=N*t_0/t_0=N$.

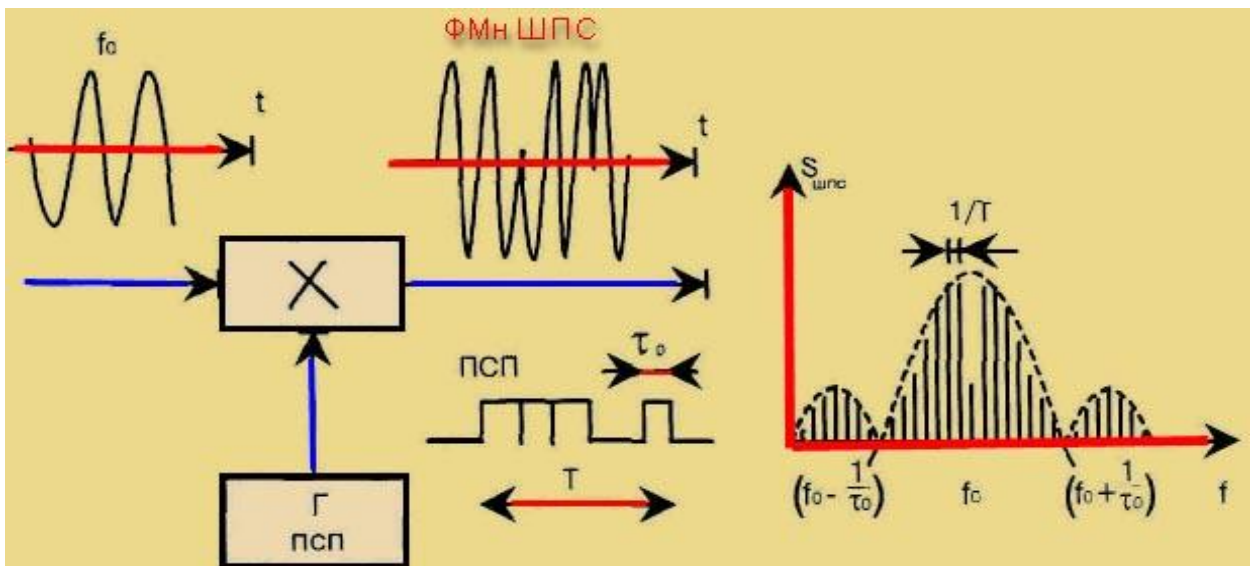


Рисунок 4.5 – Структурная схема кодового кодирования и спектр сигнала

Таким образом, для сдвига фазы несущей при фазовой манипуляции используется быстрый поток бит. Полоса расширяется искусственно за счет увеличения скорости передачи данных (увеличения количества передаваемых бит). Это сделано посредством замены каждого информационного бита пачкой из десяти или больше бит, называемых "чипами". При этом пропорционально расширяется и полоса частот. Такие битовые последовательности называются шумоподобными или **PN**. Эти двоичные последовательности специально генерируются таким образом, чтобы в них количество нулей и единиц было приблизительно равно. Каждый из нулевых битов информационного потока заменяется PN-кодом, а единицы - инвертированным PN-кодом. Эта модуляция называется модуляцией с разрядной инверсией. В результате этого смешивания получается PN-сигнал. В корреляторе неинвертированный PN-код, близко совпадающий с локальным PN-кодом, генерирует бит информации "0". В то же время последовательность, соответствующая "1", приводит к полной декорреляции, так как для этого информационного бита PN-код инвертирован. Таким образом, коррелятор будет производить поток единиц для инвертированной PN-последовательности и поток нулей - для неинвертированной, что и будет означать восстановление переданной информации. Иногда для передачи результирующего битового потока используется фазовый сдвиг 180 градусов, который называется двоичной фазовой модуляцией (манипуляцией) (binary phase-shift keying - BPSK). Или же (чаще всего) передача реализуется квадратурно-фазовой модуляцией (quadrature phase-shift keying - QPSK), то есть одновременно передается по два бита (число от 0 до 4), закодированных четырьмя различными сдвигами фаз несущей частоты. Передатчик с одним PN-кодом не может создать точно те же боковые полосы (спектральные составляющие) как другой передатчик, использующий другой PN-код.

Прием ШПС осуществляется оптимальным приемником, который для сигнала с полностью известными параметрами вычисляет корреляционный интеграл

$$z = \int x(t)u(t)dt,$$

где $x(t)$ - входной сигнал, представляющий собой сумму полезного сигнала $u(t)$ и помехи $n(t)$ (в случае белый шум). Затем величина z сравнивается с порогом Z . Значение корреляционного интеграла находится с помощью коррелятора или согласованного фильтра. Коррелятор осуществляет "сжатие" спектра широкополосного входного сигнала путем умножения его на эталонную копию $u(t)$ с последующей фильтрацией, что и приводит к улучшению отношения сигнал/шум на выходе коррелятора в B раз по отношению ко входу.

Результирующий выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе приемника есть функция отношения ширины полос широкополосного и базового сигналов: чем больше расширение спектра, тем больше выигрыш. Во временной области - это функция отношения скорости передачи цифрового потока в радиоканале к скорости передачи базового информационного сигнала. Для стандарта IS-95 (первый стандарт CDMA) отношение составляет 128 раз, или 21 дБ. Это позволяет системе работать при уровне интерференционных помех, превышающих уровень полезного сигнала на 18 дБ, так как обработка сигнала на выходе приемника требует превышения уровня сигнала над уровнем помех всего на 3 дБ. В реальных условиях уровень помех значительно меньше. Кроме того, расширение спектра сигнала (до 1,23 МГц) можно рассматривать как применение методов частотного разнесения приема. Сигнал при распространении в радиотракте подвергается замираниям вследствие многолучевого характера распространения. В частотной области это явление можно представить как воздействие режекторного фильтра с изменяющейся шириной полосы режекции (обычно не более чем на 300 кГц). В стандарте AMPS (аналоговый стандарт мобильной связи) это соответствует подавлению десяти каналов, а в системе CDMA подавляется лишь около 25% спектра сигнала, что не вызывает особых затруднений при восстановлении сигнала в приемнике (рисунок 4.6). В стандарте AMPS ширина полосы одного канала 30 кГц, в GSM – 200 кГц).

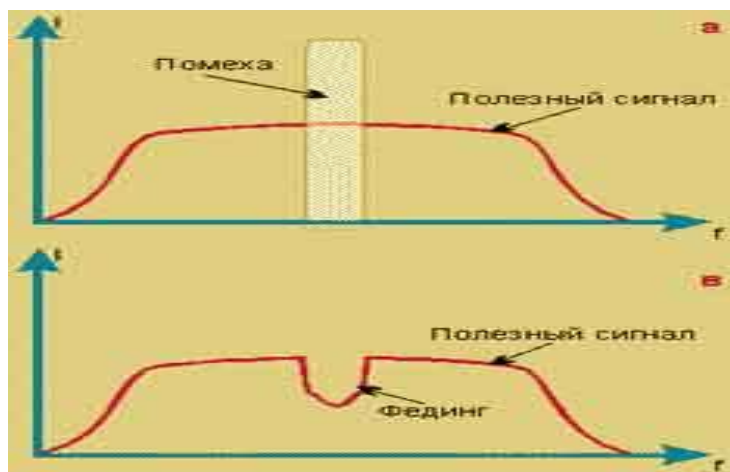


Рисунок 4.6 - Воздействие узкополосных помех (а) и федингов (б) на широкополосный сигнал.

Чрезвычайно полезное свойство DSSS-устройств заключается в том, что благодаря очень низкому уровню мощности *своего* сигнала они практически *не создают помех обычным радиоустройствам* (узкополосным большой мощности), так как эти последние принимают широкополосный сигнал за шум в пределах допустимого. С другой стороны - обычные устройства не мешают широкополосным, так как их сигналы большой мощности "шумят" каждый только в своем узком канале и не могут заглушить широкополосный сигнал весь целиком. Это как если бы тонким карандашом, но крупно написанная буква была бы заштрихована жирным фломастером - если штрихи легли не подряд, мы сможем прочесть букву.

В результате можно сказать, что использование широкополосных технологий дает возможность использовать один и тот же участок радиоспектра *дважды* - обычными узкополосными устройствами и "поверх них" - широкополосными.

Суммируя, можно выделить следующие важные свойства ШПС-технологии, по крайней мере для метода прямой последовательности:

- помехозащищенность;*
- малые помехи другим устройствам;*
- конфиденциальность передач;*
- экономичность при массовом производстве;*
- возможность повторного использования одного и того же участка спектра.*

4.4 Многоканальное расширение спектра MC-CDMA (Multi Carrier)

Данный метод является разновидностью DSSS. В 1993 г., Институт Технологий Связи (Institute for Communications Technology) представил новую синхронную схему совместного доступа. Предложенная схема объединяет преимущества метода DS-CDMA с эффективным Ортогональным

Мультиплексированием с Разделением Частоты (**OFDM**). Новая схема совместного доступа упоминается как многочастотная CDMA (**MC-CDMA**) или как **OFDM-CDMA**, и характеризуется высокой гибкостью и эффективностью использования частотного диапазона, сравнимой с DS-CDMA.

В системе MC-CDMA биты после канального кодирования преобразуются в **чипы** путем перемножения с кодовой последовательностью разделения пользователей, что необходимо для минимизации интерференции между абонентам. Для формирования этих кодов используется ортогональные функции Уолша. Ключевое свойство системы MC-CDMA в том, что все чипы, сопоставленные одному биту кода, передаются параллельно в узкополосных подканалах, с применением OFDM.

Наглядно это можно представить, рассмотрев эту технологию на основе стандарта 802.11(Radio Ethernet). Представим, что вся "широкая" полоса частот делится на некоторое число подканалов - (по стандарту 802.11 - 11каналов). Каждый передаваемый бит информации превращается, по определенному алгоритму, в последовательность из 11 бит, эти 11 бит передаются одновременно и параллельно, используя все 11 подканалов. При приеме, полученная последовательность бит декодируется с использованием того же алгоритма, что и при кодировке. Другая пара приемник-передатчик может использовать другой алгоритм кодировки-декодировки, и таких различных алгоритмов может быть очень много.

Очевидный результат применения этого метода - защита передаваемой информации от подслушивания ("чужой" приемник использует другой алгоритм и не сможет декодировать информацию не от своего передатчика). Но более важным оказалось другое свойство описываемого метода. Оно заключается в том, что благодаря 11-кратной *избыточности* передачи можно обойтись *сигналом очень маленькой мощности* (по сравнению с уровнем мощности сигнала при использовании обычной узкополосной технологии), *не увеличивая при этом размеров антенн*. При этом сильно уменьшается отношение уровня передаваемого сигнала к уровню *шума*, (т.е. случайных или преднамеренных помех), так что передаваемый сигнал уже как бы неразличим в общем шуме. Но благодаря его 11-кратной избыточности принимающее устройство все же сумеет его распознать. Это примерно то же самое, что написанное на 11 листах одно и то же слово, и некоторые листы оказались написаны неразборчивым почерком, другие полустерты или на обгоревшем клочке бумаги - но все равно в большинстве случаев мы сумеем определить, что это за слово, сравнив все 11 экземпляров.

На данном этапе для систем MC-CDMA используется полоса частот в 1,25 МГц с разделением на 512 поднесущих. Как установлено в ходе тестирования, они менее чувствительны к проблеме "ближней-дальней" зоны, чем DS-CDMA системы.

4.5 Расширение спектра скачкообразным изменением частоты

Скачкообразное изменение частоты несущей в третьем способе (рисунок 4.7), осуществляется за счет быстрой перестройки выходной частоты синтезатора в соответствии с законом формирования псевдослучайной последовательности (Frequency Hopping Spread Spectrum CDMA - FHSS-CDMA). Каждая несущая частота и связанные с ней боковые полосы должны оставаться в пределах ширины полосы, определяемой FCC (Федеральная комиссия по связи США). Только в случае, когда предполагаемый получатель знает последовательность прыжков частоты передатчика, его приемник может следовать этим прыжкам частоты.

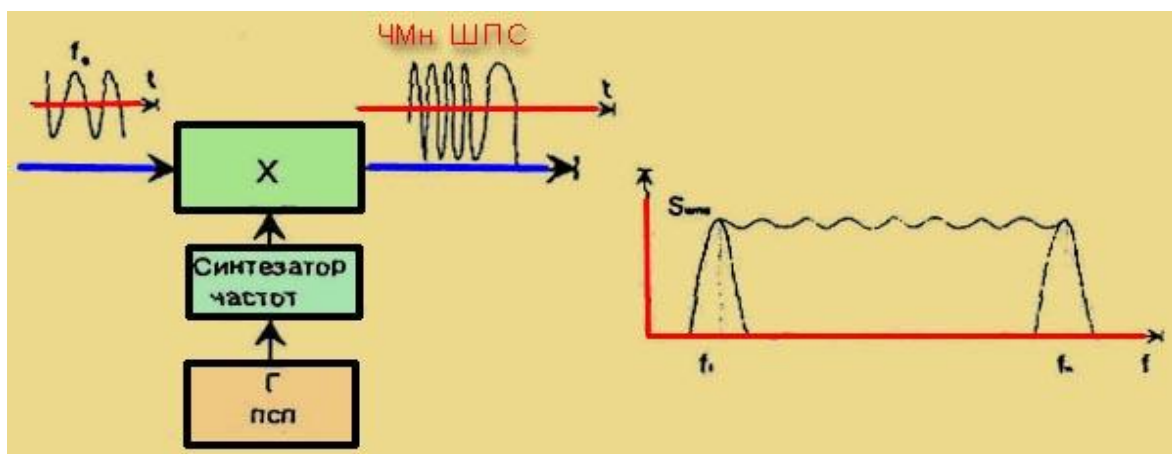


Рисунок 4.7 - Расширение спектра скачкообразным изменением частоты несущей

При кодировке по методу частотных скачков (FHSS) вся отведенная для передач полоса частот подразделяется на некоторое количество подканалов (по стандарту 802.11 этих каналов 79). Каждый передатчик в каждый момент использует только один из этих подканалов, регулярно перескакивая с одного подканала на другой. Стандарт 802.11 не фиксирует частоту таких скачков - она может задаваться по-разному в каждой стране. Эти скачки происходят синхронно на передатчике и приемнике по заранее определенной псевдослучайной последовательности, известной обоим; ясно, что не зная последовательности переключений, принять передачу также нельзя.

Другая пара передатчик-приемник будет использовать другую последовательность переключений частот, заданную независимо от первой. В одной полосе частот и на одной территории прямой видимости (в одной "ячейке") таких последовательностей может быть много. Ясно, что при возрастании числа одновременных передач возрастает и вероятность коллизий, когда, например, два передатчика одновременно перескочили на частоту № 45, каждый в соответствии со своей последовательностью, и заглушили друг друга. Для случаев, когда два передатчика пытаются использовать ту же самую частоту одновременно, предусмотрен протокол

разрешения столкновений, по которому передатчик делает попытку повторно послать данные на следующей в последовательности частоте.

4.6 Сети на основе CDMA

История и общие положения

1991 г. - Компанией Qualcomm разработан проект стандарта IS-95.

1993 г. - Ассоциацией производителей оборудования связи (TIA—Telecommunication Industry Association) утверждена базовая версия IS-95, и в июле 1993 г. Федеральная комиссия по связи США (FCC) признала в качестве стандарта IS-95 предложенную компанией Qualcomm технологию цифровой сотовой связи на основе CDMA.

1995 г. - Эксплуатация первой коммерческой сотовой системы мобильной связи по технологии CDMA IS-95 в Гонконге.

Сети и устройства с применением многостанционного доступа с кодовым разделением каналов построены на основе стандартов, разработанных TIA. В основном это стандарты:

IS-95 CDMA — радиointерфейс; IS-96 CDMA — речевые службы;

IS-97 CDMA — подвижная станция; IS-98 CDMA — базовая станция;

IS-99 CDMA — службы передачи данных.

На базе серии стандартов реализована станция 2-го поколения cdma One. В дальнейшем эти идеи получили развитие в стандарте широкополосной системы 3-го поколения CDMA - 2000.

Основные услуги: передача данных и речи со скоростями 9,6 Кбит/с, 4,8 Кбит/с, 2,4 Кбит/с; междугородний вызов; роуминг (национальный и международный); ждущий вызов; переадресация вызова (при отсутствии ответа, в случае занятости); конференц-связь; индикатор сообщений об ожидающих вызовах; голосовая почта; текстовая передача и прием сообщений.

Архитектура сети

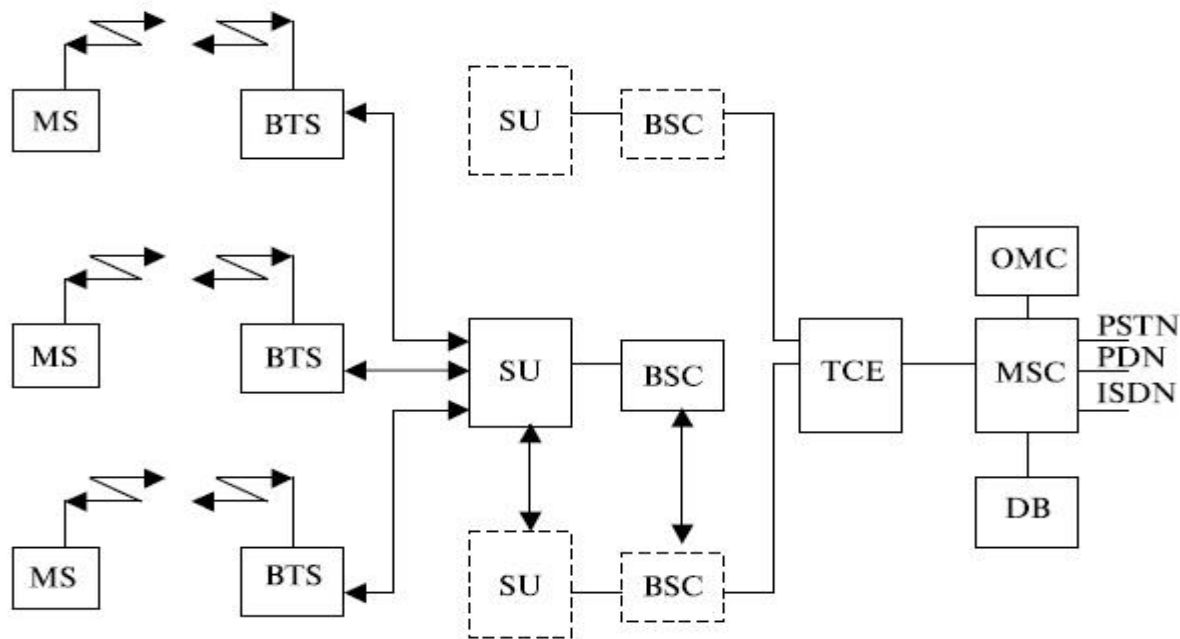
На рисунке 4.8 приведена обобщенная структурная схема сети сотовой подвижной радиосвязи CDMA IS-95.

Основные элементы этой сети (BTS, BSC, MSC, OMC) по составу совпадают с элементами, используемыми в сотовых сетях с временным разделением каналов (например, GSM). Основное отличие заключается в том, что в состав сети CDMA IS-95 включены устройства оценки качества и выбора блоков (SU — Selector Unit). Кроме того, для реализации процедуры мягкого переключения между базовыми станциями, управляемыми разными контроллерами (BSC), вводятся линии передачи между SU и BSC (Inter BSC Soft handover). В центре коммутации подвижных объектов (MSC) добавлен преобразователь – транскодер (TCE — Transcoder Equipment), который

преобразует выборки речевого сигнала, формат данных из одного цифрового формата в другой.

Система CDMA фирмы Qualcomm рассчитана на работу в диапазоне частот 800 Мгц. Она построена по методу прямого расширения спектра частот на основе использования 64 видов последовательностей, сформированных по закону функций Уолша. Для передачи речевых сообщений выбрано речепреобразующее устройство с алгоритмом CELP со скоростью преобразования 8000 бит/с (9600 бит/с в канале). Возможны режимы работы на скоростях 4800, 2400, 1200 бит/с.

В стандарте используется отдельная обработка отраженных сигналов, приходящих с разными задержками, и последующее их весовое сложение, что значительно снижает отрицательное влияние эффекта многолучевости. При отдельной обработке лучей в каждом канале приема на базовой станции используется 4 параллельно работающих коррелятора, а на подвижной станции 3 коррелятора. Наличие параллельно работающих корреляторов позволяет осуществить мягкий режим "эстафетной передачи" при переходе из соты в соту.



BSC – Base Station Controller
 BTS – Base Telephone Station
 DB – Date Base
 ISDN – Integrated Service Digital Network
 MS – Mobile Station
 MSC – Mobile Switching Center
 OMC – Operation and Maintenance Center

PDN – Packet Data Networks
 PSTN – Public Switched Telephone Network
 SU – Selector Unit

TCE – Transcoder Equipment

Контроллер базовой станции
 Базовая приемопередающая станция
 База данных
 Цифровая сеть с интеграцией служб
 Мобильная станция
 Центр коммутации мобильной связи
 Центр эксплуатации и технического обслуживания
 Сеть пакетной коммутации
 Общедоступная телефонная сеть
 Устройство оценки качества и выбора блоков
 Преобразователь-транскодер

Рисунок 4.8 - Архитектура сети CDMA

Мягкий режим "эстафетной передачи" происходит за счет управления подвижной станцией двумя или более базовыми станциями. Транскодер, входящий в состав основного оборудования, проводит оценку качества приема сигналов от двух базовых станций последовательно кадр за кадром. Процесс выбора лучшего кадра приводит к тому, что результирующий сигнал может быть сформирован в процессе непрерывной коммутации и последующего "склеивания" кадров, принимаемых разными базовыми станциями, участвующими в "эстафетной передаче".

Каналы трафика и управления

В CDMA каналы для передачи от базовой станции к мобильной станции называются прямыми (Forward). Каналы для приема базовой станцией информации от мобильной называются обратными (Reverse). Для обратного канала IS-95 определяет полосу частот от 824 до 849 МГц. Для прямого канала — 869–894 МГц. Прямой и обратный каналы разделены интервалом в 45 МГц. Пользовательские данные упакованы и передаются в канале с пропускной способностью 1,2288 Мбит/с. Нагрузочная способность прямого канала — 128 телефонных соединений со скоростью трафика 9,6 Кбит/с. Состав каналов в CDMA в стандарте IS-95 показан на рисунке 4.9.

В стандарте IS-95 применяются различные типы модуляции для прямого и обратного каналов. В прямом канале базовая станция передает одновременно данные для всех пользователей, находящихся в соте, используя для разделения каналов различные коды для каждого пользователя. Также передается пилотный сигнал, он имеет больший уровень мощности, обеспечивая пользователям возможность синхронизации.

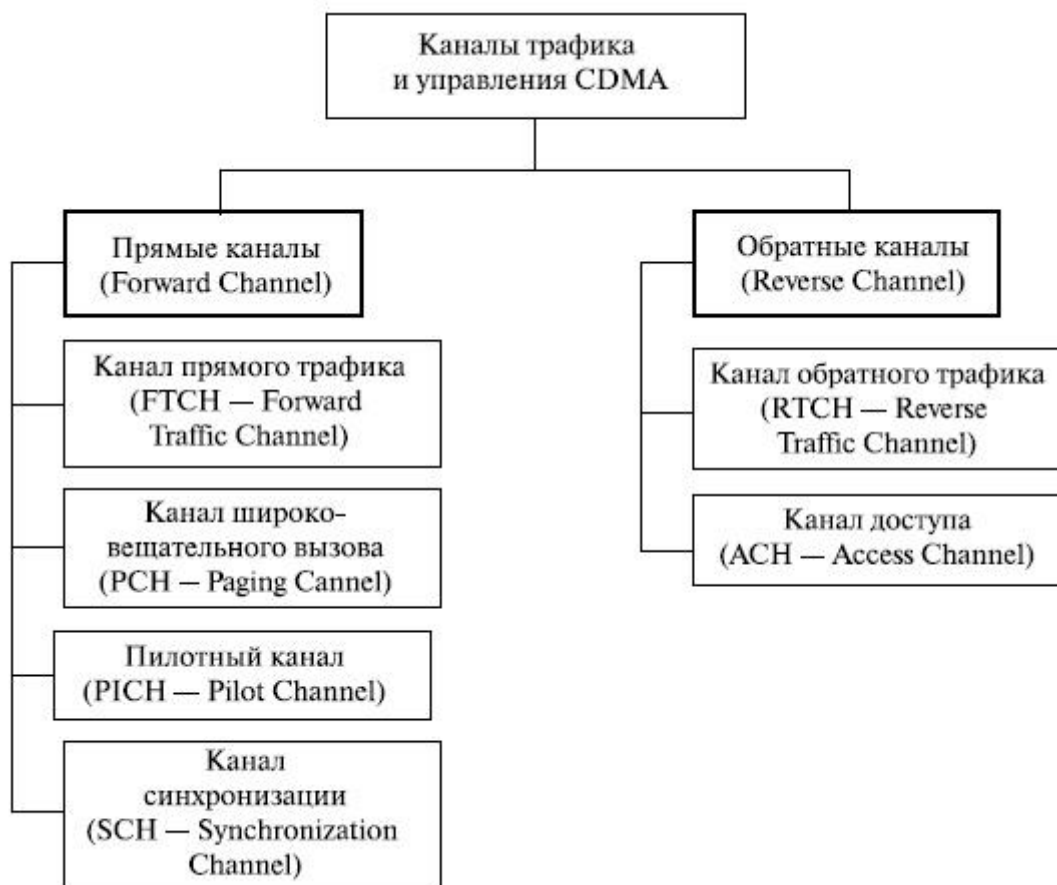


Рисунок 4.9 - Каналы трафика и управления системы CDMA

В обратном направлении подвижные станции отвечают асинхронно (без использования пилотного сигнала), при этом уровень мощности, приходящий к базовой станции от каждой подвижной станции, одинаков. Такой режим возможен благодаря контролю мощности и управлению мощностью подвижных абонентов по служебному каналу.

Прямые каналы

Данные в прямом канале трафика группируются в кадр длительностью 20 мс. Пользовательские данные после предварительного кодирования и форматирования перемежаются с целью регулирования текущей скорости передачи данных, которая может изменяться. Затем спектр сигнала расширяется перемножением с одной из 64 псевдослучайных последовательностей (на основе функций Уолша) до значения 1,2288 Мбит/с. Каждому мобильному абоненту назначается ПСП, с помощью которой его данные будут отделены от данных других абонентов. Ортогональность ПСП обеспечивается одновременной синхронной кодировкой всех каналов в соте (т. е. используемые в каждый момент времени фрагменты являются ортогональными). Как уже упоминалось, в системе передается пилотный сигнал (код) для того, чтобы мобильный терминал мог управлять характеристиками канала, принимать временные метки, обеспечивая фазовую синхронизацию для когерентного детектирования. Для глобальной

синхронизации сети в системе используются еще радиометки от GPS (Global Position System)-спутников.

Состав прямых каналов

Пилотный канал (Pilot Channel) предназначен для установления начальной синхронизации, контроля уровня сигнала базовой станции по времени, частоте и фазе, идентификации базовой станции.

Канал синхронизации (SCH — Synchronizing Channel) обеспечивает поддержание уровня излучения пилотного сигнала, а также фазу псевдослучайной последовательности базовой станции. Канал синхронизации передает синхросигналы мобильным терминалам со скоростью 1200 бод.

Широковещательный канал коротких сообщений, канал вызова (Paging Channel) используется для вызова подвижной станции. Количество каналов — до 7 на соту. После приема сигнала вызова мобильная станция передает сигнал подтверждения на базовую станцию. После этого по каналу широковещательного вызова на подвижную станцию передается информация об установлении соединения и назначении канала связи. Работает со скоростью 9600, 4800, 2400 бод.

Канал прямого трафика (FTCH — Forward Traffic Channel) предназначен для передачи речевых сообщений и данных, а также управляющей информации с базовой станции на мобильную; передает любые пользовательские данные.

Для предоставления разных услуг связи в CDMA используются два типа каналов. Первый из них называется основным, а второй — дополнительным. Услуги, предоставляемые через эту пару каналов, зависят от схемы организации связи. Каналы могут быть адаптированы для определенного вида обслуживания и работать с разными размерами кадра, используя любое значение скорости из двух скоростных рядов: RS-1 (1200, 2400, 4800 и 9600 бит/с) или RS-2 (1800, 3600, 7200 и 14400 бит/с). Определение и выбор скорости приема осуществляется автоматически.

Каждому логическому каналу назначается свой код Уолша, как это указано на рисунке 4.10. Всего в одном физическом канале может быть 64 логических канала, т. к. последовательностей Уолша, которым в соответствие ставятся логические каналы, всего 64, и каждая из них имеет длину по 64 бита. Из всех 64 каналов:

- на 1-й канал назначается первый код Уолша (W0), которому соответствует пилотный канал;
- на следующий канал назначается тридцать второй код Уолша (W32), следующим семи каналам также назначаются свои последовательности Уолша (W1, W2, W3, W4, W5, W6, W7), которым соответствуют каналы вызова;
- 55 каналов предназначены для передачи данных по каналу прямого трафика.

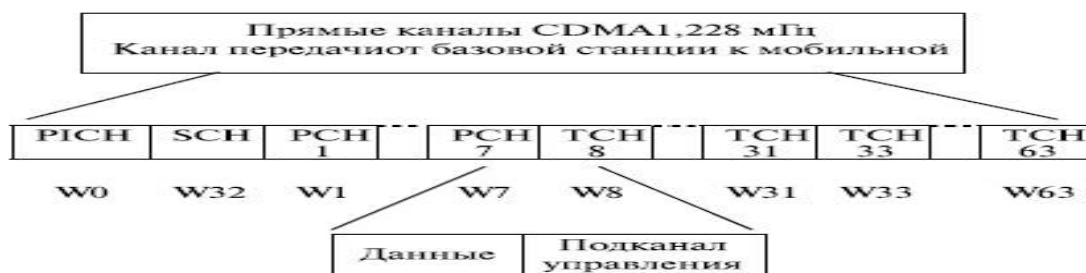


Рисунок 4.10 - Структура прямых каналов

Состав обратных каналов

Канал доступа (ACH — Access Channel) обеспечивает связь подвижной станции с базовой станцией, когда подвижная станция еще не использует канал трафика. Канал доступа применяется для установления вызовов и ответов на сообщения, передаваемых по каналу вызова (Paging Channel), команд и запросов на регистрацию в сети. Каналы доступа совмещаются (объединяются) с каналами вызова.

Канал обратного трафика (RTCH — Reverse Traffic Channel) обеспечивает передачу речевых сообщений и управляющей информации с мобильной станции на базовую станцию.

Основные характеристики системы

Диапазон частот передачи MS	824,040 – 848,860 МГц
Диапазон частот передачи BTS	869,040 – 893,970 МГц
Относительная нестабильность несущей частоты BTS	+/- $5 \cdot 10^{-8}$
Относительная нестабильность несущей частоты MS	+/- $2,5 \cdot 10^{-6}$
Вид модуляции несущей частоты	QPSK(BTS), O-QPSK(MS)
Ширина спектра излучаемого сигнала: - 3 Дб - 40 Дб	1,25 МГц 1,50 МГц
Тактовая частота ПСП М-функции	1,2288 МГц
Количество каналов BTS на 1 несущей частоте	1 пилот-канал 1 канал синхронизации 7 каналов персон. вызова 55 каналов связи
Количество каналов MS	1 канал доступа 1 канал связи
Скорость передачи данных в каналах: - синхронизации - в канале перс. вызова и доступа - в каналах связи	1200 бит/с 9600, 4800 бит/с 9600, 4800, 2400, 1200 бит/с
Кодирование в каналах передачи BTS	Сверточный код R=1/2, K=9
Кодирование в каналах передачи MS	Сверточный код R=1/3, K=9
Требуемое для приема отношение энергии бита информации	6-7 дБ
Максимальная эффективная излучаемая мощность BTS	50 Вт
Максимально эффективная излучаемая мощность MS	6,3 – 1,0 Вт

4.7 Порядок прохождения речевых данных в мобильной станции до момента отправки в эфир

Рассмотрим структурную схему канала обратного трафика (рисунок 4.11). В прямом и обратном канале эта схема повторяется; в зависимости от того, какой канал используется в данный момент, некоторые блоки этой схемы исключаются.

1. Речевой сигнал поступает на речевой кодек - на этом этапе речевой сигнал оцифровывается и сжимается по алгоритму CELP.

2. Далее сигнал поступает на блок помехоустойчивого кодирования, который может исправлять до 3-х ошибок в пакете данных.

3. Далее сигнал поступает в блок перемежения сигнала - блок предназначен для борьбы с пачками ошибок в эфире. Пачки ошибок - искажение нескольких бит информации подряд.

Принцип такой. Поток данных записывается в матрицу по строкам. Как только матрица заполнена, начинается ее передача по столбцам. Следовательно, когда в эфире искажаются подряд несколько бит информации, при приеме пачка ошибок, пройдя через обратную матрицу, преобразуется в одиночные ошибки.

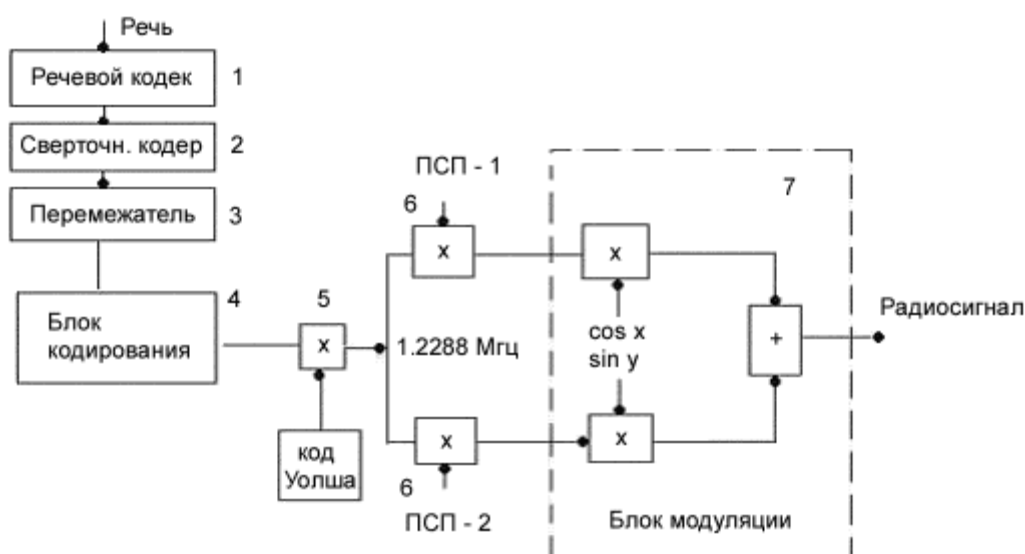


Рисунок 4.11 - Структурная схема канала обратного трафика

4. Далее сигнал поступает в блок кодирования (от подслушивания) - на информацию накладывается маска (последовательность) длиной 42 бита. Эта маска является секретной. При несанкционированном перехвате данных в эфире невозможно декодировать сигнал, не зная маски. Метод перебора всевозможных значений не эффективен т.к. при генерации этой маски, перебирая всевозможные значения, придется генерировать 8,7 триллиона масок длиной 42 бита.

5. Блок перемножения на код Уолша - цифровой поток данных перемножается на последовательность бит, сгенерированных по функции Уолша.

На этом этапе кодирования сигнала происходит расширение спектра частот, т.е. каждый бит информации кодируется последовательностью, построенной по функции Уолша, длиной 64 бита. Т.о. скорость потока данных в канале увеличивается в 64 раза. Следовательно, в блоке модуляции сигнала скорость манипуляции сигналом возрастает, отсюда и расширение спектра частот.

Так же функция Уолша отвечает за отсеивание ненужной информации от других абонентов. В момент начала сеанса связи абоненту назначается частота, на которой он будет работать и один (из 64 возможных) логический канал, который определяет функция Уолша. В момент принятия сигнала по схеме проходит в обратную сторону. Принятый сигнал умножается на кодовую последовательность Уолша. По результату умножения вычисляется корреляционный интеграл.

Если Z пороговая удовлетворяет предельному значению, значит, сигнал наш. Последовательность функции Уолша ортогональны и обладают хорошими корреляционными и автокорреляционными свойствами, поэтому вероятность спутать свой сигнал с чужим равна 0,01 %.

6. Блок перемножения сигнала на две M -функции (M_1 - длиной 15 бит, M_2 - длиной 42 бита) или еще их называют ПСП- псевдослучайными последовательностями - блок предназначен для перемешивания сигнала для блока модуляции. Каждой назначенной частоте назначаются разные M - функции.

7. Блок модуляции сигнала - в стандарте CDMA используется фазовая модуляция ФМ4, ОФМ4.

Преимущества CDMA

- Высокая спектральная эффективность. *CDMA* позволяет обслуживать больше абонентов в той же полосе частот, чем другие виды разделения (*TDMA*, *FDMA*).
- Гибкое распределение ресурсов. При кодовом разделении нет строгого ограничения на число каналов. С увеличением числа абонентов постепенно возрастает вероятность ошибок декодирования, что ведёт к снижению качества канала, но не к отказу обслуживания.
- Высокая защищённость каналов. Выделить нужный канал без знания его кода трудно, так как вся полоса частот равномерно заполнена шумоподобным сигналом.
- Телефоны *CDMA* имеют меньшую пиковую мощность излучения и потому, возможно, менее вредны.

4.8 Эволюция систем сотовой связи, использующих технологию CDMA

В настоящее время оборудование стандарта CDMA является самым новым и самым дорогим, но в то же время самым надежным и самым защищенным. Европейским Сообществом в рамках исследовательской программы RACE разрабатывается проект CODIT по созданию одного из вариантов Универсальной системы подвижной связи (UMTS) на принципе кодового разделения каналов с использованием широкополосных сигналов с прямым расширением спектра.

Основным отличием концепции CODIT будет эффективное и гибкое использование частотного ресурса. Как мы раньше пояснили, на широкополосный сигнал CDMA влияние узкополосной помехи практически не сказывается. За счет этого свойства в стандарте CODIT для передачи данных дополнительно будут использоваться защитные интервалы между несущими частотами.

Технология кодового разделения каналов CDMA, благодаря высокой спектральной эффективности, является радикальным решением дальнейшей эволюции сотовых систем связи.

CDMA2000 является стандартом 3G в эволюционном развитии сетей cdmaOne (основанных на IS-95). При сохранении основных принципов, заложенных версией IS-95A, технология стандарта CDMA непрерывно развивается.

Последующее развитие технологии CDMA происходит в рамках технологии CDMA2000. При построении системы мобильной связи на основе технологии CDMA2000 1X первая фаза обеспечивает передачу данных со скоростью до 153 кбит/с, что позволяет предоставлять услуги голосовой связи, передачу коротких сообщений, работу с электронной почтой, интернетом, базами данных, передачу данных и неподвижных изображений.

Переход к следующей фазе CDMA2000 1X EV-DO происходит при использовании той же полосы частот 1,23 МГц, скорость передачи — до 2,4 Мбит/с в прямом канале и до 153 кбит/с в обратном, что делает эту систему связи отвечающей требованиям 3G и даёт возможность предоставлять самый широкий спектр услуг, вплоть до передачи видео в режиме реального времени.

Следующей фазой развития стандарта в направлении увеличения сетевой ёмкости и передачи данных является 1XEV-DO Rev A: передача данных со скоростью до 3,1 Мбит/с по направлению к абоненту и до 1,8 Мбит/с — от абонента. Операторы смогут предоставлять те же услуги, что и на базе Rev. 0, а, кроме того, передавать голос, данные и осуществлять широко вещание по IP сетям. В мире уже есть несколько таких действующих сетей.

Разработчики оборудования CDMA связи запустили новую фазу — 1XEV-DO Rev B, — с целью достигнуть следующих скоростей на одном частотном канале: 4,9 Мбит/с к абоненту и 2,4 Мбит/с от абонента. К тому же будет обеспечиваться возможность объединения нескольких частотных каналов для увеличения скорости. Например, объединение 15-ти частотных каналов (максимально возможное количество) позволит достигать скоростей 73,5 Мбит/с к абоненту и 27 Мбит/с от абонента. Применение таких сетей — улучшенная работа чувствительных к временным задержкам приложений типа VoIP, Push to Talk, видеотелефония, сетевые игры и т. п.

Основными компонентами коммерческого успеха системы CDMA2000 являются более широкая зона обслуживания, высокое качество речи (практически эквивалентное проводным системам), гибкость и дешевизна внедрения новых услуг, высокая помехозащищённость, устойчивость канала связи от перехвата и прослушивания.

Также немаловажную роль играет низкая излучаемая мощность радиопередатчиков абонентских устройств. Так, для систем CDMA2000 максимальная излучаемая мощность составляет 250 мВт. Для сравнения: в системах GSM-900 этот показатель равен 2 Вт (в импульсе, при использовании GPRS+EDGE с максимальным заполнением; максимум при усреднении по времени при обычном разговоре — около 200мВт). В системах GSM-1800 — 1 Вт (в импульсе, средняя чуть меньше 100мВт).