

4. СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ (ЧРК). ЛИНИИ СВЯЗИ

Лекция 1 Частотное разделение каналов в проводных системах связи

Особенностью этих систем является то, что все каналы работают одновременно, каждый в своем диапазоне частот. ЧРК вначале было реализовано в системах на основе многопарных электрических кабелей. В настоящее время ЧРК используется в радиоканалах (цифровые радиорелейные линии, сотовая связь и т.д.) и в волоконно-оптических линиях связи.

Главное требование, применимое к системам ЧРК, заключается в минимизации ширины спектра при преобразовании сигнала. Для экономного использования частотного ресурса используют модуляцию с одной боковой полосой (ОБП) (рисунок 4.1). При ОБП спектр амплитудно-модулированного сигнала подвергается фильтрации, когда одну из двух боковых составляющих спектра удаляют с помощью полосового фильтра [12].

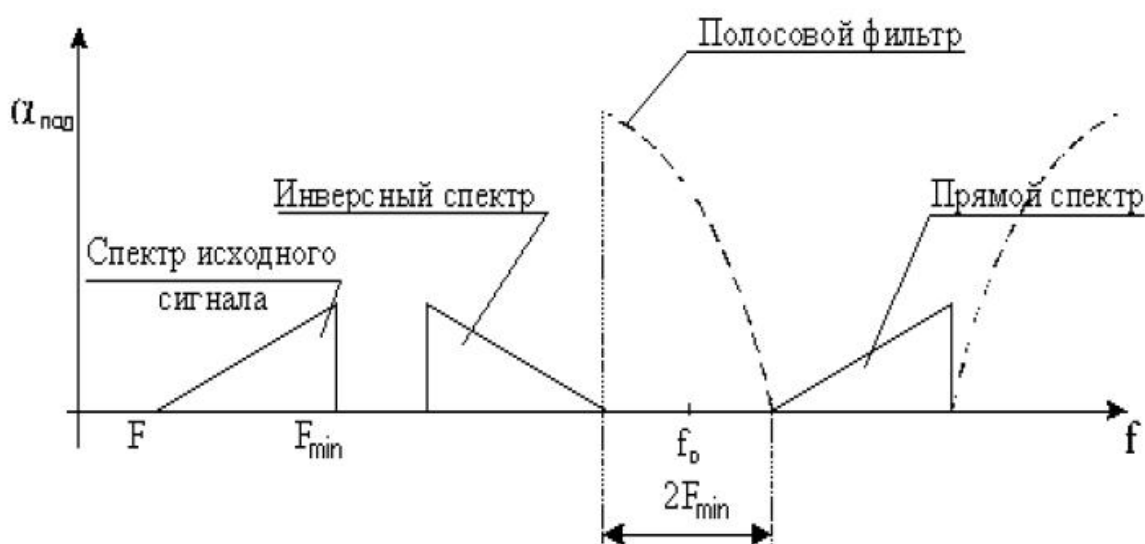


Рисунок 4.1 – Формирование сигнала с одной боковой полосой

Крутизна скатов полосового фильтра равна $2F_{\min}$. Величина подавления боковых составляющих спектра $\alpha_{\text{под}} = 65 \div 70$ дБ.

Эффективность фильтрации характеризуется полосой относительной расфилтровки, которая предъявляет требования к параметрам фильтров:

- LC фильтры: $\sigma = 0.025 \div 0.03$;
- Кварцевые фильтры: $\sigma \leq 0.005$.

Рассмотрим кварцевый фильтр.

При данных значениях для кварцевого фильтра, если: $\sigma = 0.005$, $2 \cdot F_{\min} = 0.6$ кГц, $\Delta f = 4$ кГц, то $f_0 = 120$ кГц.

В полосе $0 \div 120$ кГц можно было бы организовать 30 каналов, но при учете условия «октавы» $f_{\text{MAX}} / 2 f_{\text{MIN}}$ (минимум нелинейных искажений по 2-й гармонике) получаем число каналов ТЧ равное 12, а частотный диапазон $\sim 60 - 108$ кГц. Условия «октавы» состоит в том, что верхняя частота частотного диапазона не должна превышать нижнюю частоту более чем в 2 раза. Это условие исключает появление

наиболее сильного нелинейного продукта – 2-ой гармоники. Эта совокупность каналов ТЧ составляет первичную группу.

Способы формирования первичной группы:

1. Способ формирования первичной группы – с использованием кварцевых фильтров (с однократным преобразованием частоты). Здесь и далее частоты даны в кГц.

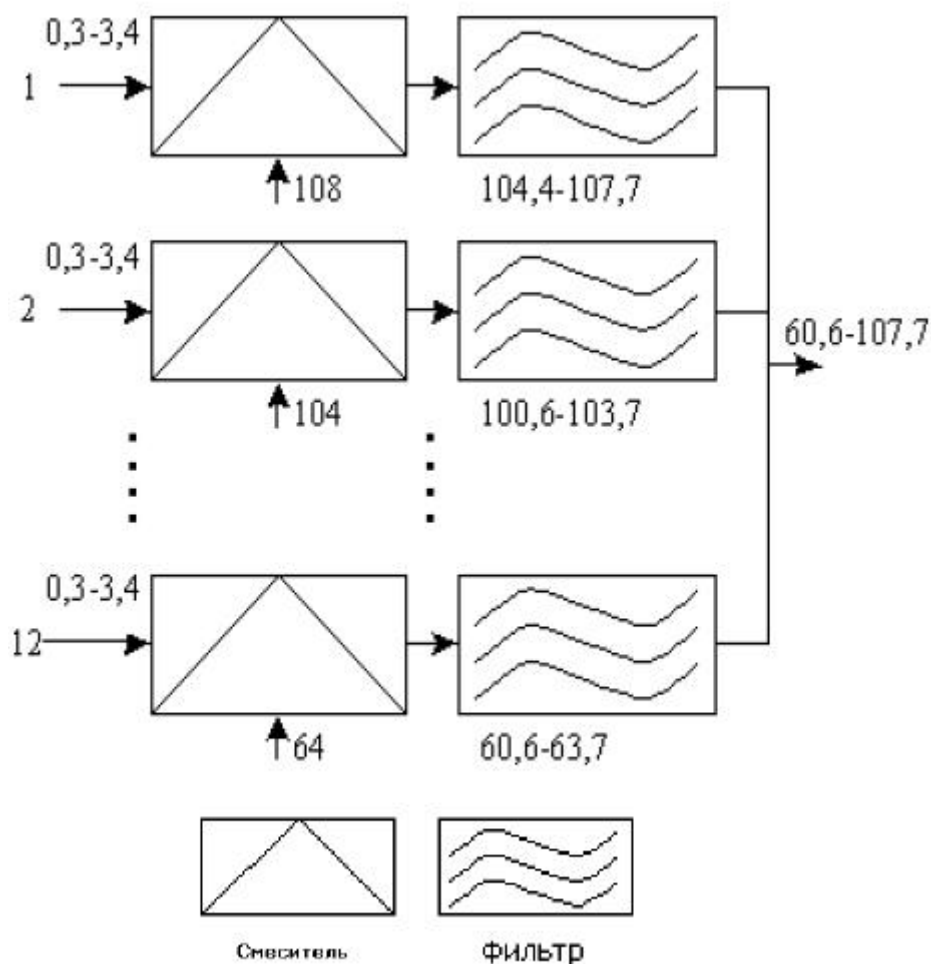


Рисунок 4.2 – Схема формирования первичной группы на кварцевых фильтрах

Кратко рассмотрим принцип работы группообразующего устройства (рисунок 4.2). На вход смесителя подается исходный сигнал и сигнал несущей частоты. Затем сигнал, со смещенным на несущую частоту спектром с выхода смесителя подается на полосовой фильтр. Образуется 12 канальная первичная, стандартная группа. Здесь требуется 12 различных кварцевых полосовых фильтров, что экономически не целесообразно.

Спектр сигнала на выходе изображен на рисунке 4.3.

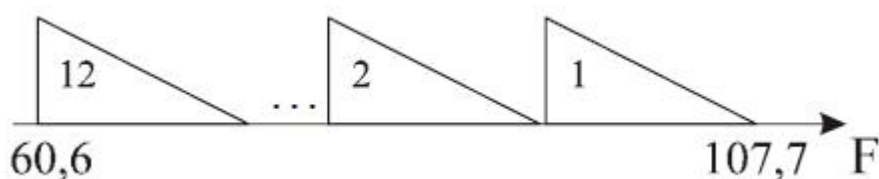


Рисунок 4.3 – Спектр сигнала на выходе

2. Кроме рассмотренного выше способа существуют другие варианты формирования первичной группы с помощью LC фильтров.

Поскольку в настоящее время проводные системы связи практически не применяются, эти способы не будут рассмотрены. По этой же причине не будут рассмотрены способы формирования вторичной, третичной и четвертичной групп [12].

Лекция 2 Помехи в аналоговых системах передачи

Помехи – это мешающие приему информации электрические колебания, связанные с внешними или внутренними причинами.

Классификация помех

1. По месту возникновения:

- Внутренние помехи (возникают в узлах аппаратуры и линиях передачи):
 - собственные помехи (тепловой и дробовой шум);
 - помехи нелинейного происхождения (комбинационные частоты $f_1 \pm f_2 \pm f_3$, возникающие в выходных каскадах передатчиков, преобразователях частоты, детекторах и т.п.);
 - помехи коммутации и плохих контактов.
- Внешние помехи (обуславливаются действием внешних источников естественного происхождения, а также активные помехи):
 - переходные помехи (в металлических кабелях);
 - промышленные помехи (от линий передачи, ТВ вещания и т.п.);
 - грозовые и атмосферные помехи.

2. По форме сигнала:

Непрерывные помехи: $S_{\max} > (3 \div 10) S_{\text{ср}}$.

- Импульсные помехи: $S_{\max} > (100 \div 1000) S_{\text{ср}}$, где $S_{\text{ср}}$ – среднее напряжение сигналов помехи.

3. По характеру мешающего воздействия:

- Шум любой природы, который складывается с сигналом и для слабых сигналов способен существенно ухудшить разборчивость передаваемого сообщения (речи, данных и т.п.).
- Переходный разговор, возникающий вследствие переходных помех. Внятный переходный разговор нарушает комфортность и конфиденциальность связи, отвлекает абонентов на невольное прослушивание постороннего разговора. Невнятный переходный разговор резко увеличивает шум в канале передачи.

Оценка действия помех

Для оценки действия помех применяются характеристики:

1. Защищенность $A = 10 \lg (P_{\text{с}}/P_{\text{н}})$ или через уровни мощностей $A_{\text{з}} = p_{\text{с}} - p_{\text{н}}$.
2. Коэффициент шума – характеризует возрастание шума внутри активных приборов, прежде всего за счет дробовых шумов.
3. Псофометрическое напряжение (это взвешенное, усредненное в полосе частот напряжение шума).

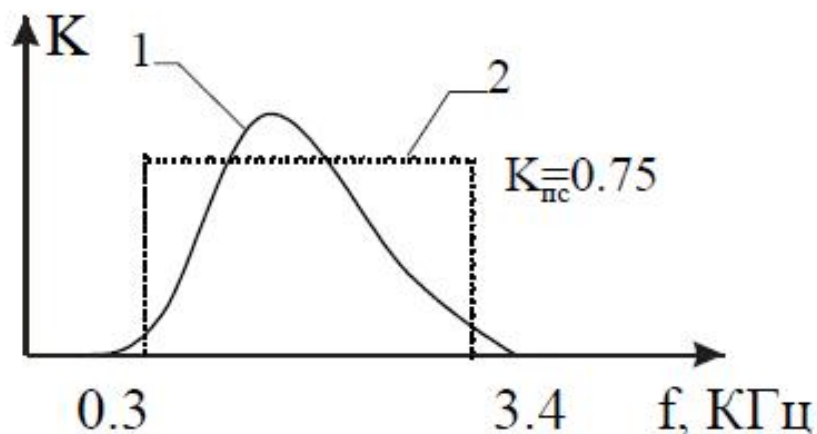


Рисунок 4.4 – Частотная характеристика системы «канал ТЧ + ухо человека»

На рисунке 4.4 представлена частотная характеристика системы «канал ТЧ + ухо человека» (1) и его псофометрический эквивалент (2).

Переходные помехи

Эти помехи в АСП на электрических кабелях возникают в основном за счет электромагнитной связи между параллельными парами проводников в многопарных кабелях. Эта паразитная связь (наводка) имеет несколько механизмов возникновения, основными из которых является связь по электрическому полю. Удельный вес электрической и магнитной составляющей зависит от частоты сигнала, от числа пар в кабеле и их взаимного расположения. Так, например, для канала тональной частоты подавляющий вклад в переходную помеху вносит электрическая составляющая.

При рассмотрении влияния между двумя парами различают два вида перехода энергии: на ближнем (передающем) конце и на дальнем (приемном) конце (рисунок 4.5). Из рисунка видно, что помеха на ближний конец проявляется при встречных движениях сигналов в каналах, а помеха на дальний конец – при согласованной передаче [6].



а) на ближнем конце; б) на дальнем конце
Рисунок 4.5 – Возникновение переходных помех:

Помеха на ближний конец больше, чем помеха на дальний, по ряду причин:

1) в силу фазовых соотношений электрическая и магнитная составляющие поля наводки на ближнем конце складываются, в то время как на дальнем конце они вычитаются;

2) наиболее значительная часть наводки возникает вблизи передатчика активной (влияющей) линии. На ближний конец она воздействует непосредственно, в то время как на дальнем конце наводка затухает так же, как и полезный сигнал;

3) эффект синфазного накопления наводки на дальний конец устраняется скручиванием как каждой пары в кабеле, так и всего жгута.

Нелинейные помехи

Нелинейные помехи возникают как в сугубо нелинейных приборах (преобразователи частоты, детекторы и т.п.), так и в усилительных элементах, особенно в ограничителях и выходных каскадах усилителей мощности за счет отклонения их вольтамперной характеристики от линейной. Как и другие виды помех, нелинейные помехи накапливаются от участка к участку.

Продуктами нелинейности являются гармоники (в основном вторая и третья) и комбинационные составляющие типа $nf_1 + mf_2 + kf_3 + \dots$, если $f_1, f_2, f_3 \dots$ – частоты составляющих на входе усилителя, а $n, m, k = 1, 2, 3 \dots$. Чтобы нелинейные составляющие помех были меньше нормы, напряжение сигнала не должно превышать порог перегрузки усилителя U_p или уровень p_r .

Лекция 3 Накопление собственных помех в линейном тракте

Одним из существенных недостатков аналоговых систем передачи является накопление собственных помех в линейном тракте по мере прохождения сигнала. Рассмотрим участок линейного тракта, состоящий из источника сигнала (генератора), линии передачи (ЛП) и усилителя (У) (рисунок 4.6) [13].

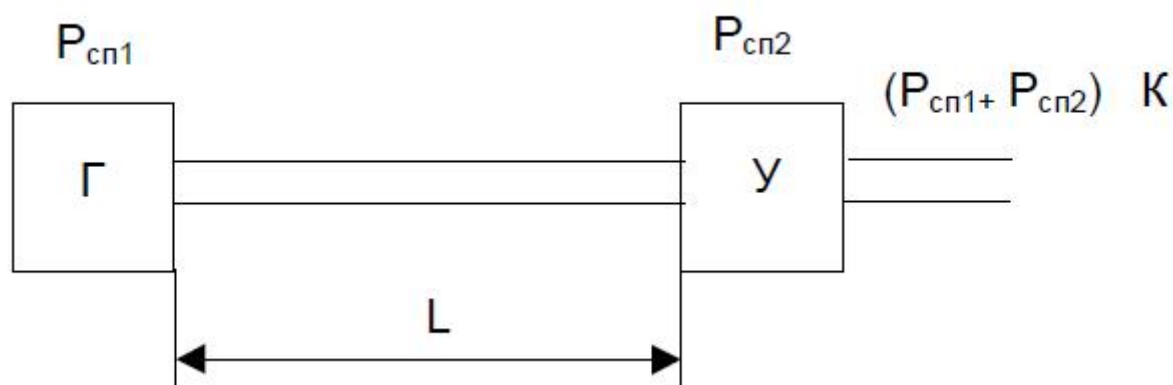


Рисунок 4.6 – Схема участка линейного тракта

Генератор содержит в своем составе усилитель с мощностью собственных шумов, приведенных ко входу, $P_{сп1}$ и коэффициентом усиления по мощности K . Мощность собственных шумов складывается из мощностей тепловых и дробовых шумов.

$$P_{ми} = k \cdot T \cdot \Delta f, \quad (4.1)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / град – постоянная Больцмана, T – температура, Δf – полоса частот линейного тракта.

Мощность дробовых шумов характеризуется коэффициентом шума

$$N = \frac{P_{свх} / P_{швх}}{P_{свых} / P_{швых}} = \frac{1}{K} \times \frac{P_{швых}}{P_{швх}} \quad (4.2)$$

Он показывает, во сколько раз уменьшается отношение сигнал–шум на выходе усилителя за счет возникновения дробовых шумов, или во сколько раз увеличивается мощность шума, приведенная ко входу усилителя. Уровень собственных шумов, приведенных ко входу с учетом (4.2):

$$\rho_{сн} = 10 \lg(P_{ми} + P_{дш}) = 10 \lg(P_{ми} \cdot N) = \rho_{ми} + n, \quad (4.3)$$

где $n = 10 \lg(N)$ – потери шумозащищенности.

Мощность шума на выходе генератора $P_{сп1K}$. Распространяясь по линии, сигнал и шум затухают и это затухание по мощности есть A . В линейном тракте должно соблюдаться условие поддержания одного и того же уровня сигнала. Для этого коэффициент усиления должен быть равен затуханию в линии [13]:

$$K = A. \quad (4.4)$$

Если перейти к уровням передачи, то

$$KдБ = \alpha l, \quad (4.5)$$

где $KдБ$ – коэффициент усиления в дБ;

l – длина участка линейного тракта, км;

α – коэффициент затухания линии, дБ/км.

При выполнении условия (4.4), на входе усилителя шумы генератора и шумы усилителя будут суммироваться. Поскольку источники шума не коррелированы, то это суммирование можно проводить без учета фазовых соотношений, не когерентно. Поэтому суммарная мощность шумов будет $P_{сп\sum} = P_{сп1} + P_{сп2}$.

Этот процесс можно продолжить. Для m участков получим:

$$P_{сн\sum} (0) = \sum_{i=1}^m P_{снi}(0) = P_{сн}. \quad (4.6)$$

Уровень суммарной, приведенной к ТНОУ(1мВт), помехи найдем из (4.6)

$$P_{сн\sum} (0) = 10 \lg \left(\frac{P_{сп\sum}}{мВт} \right) = P_{ми} + d + K_{дБ} + - P_z. \quad (4.7)$$

При составлении (4.7) учитывался уровень теплового шума на входе усилителя $p_{тш}$, уровень коэффициента шума (потери шумозащищенности) d , а так же те факторы, что результирующий шум находится на выходе последнего участка, содержащего усилитель с коэффициентом усиления K , и мощность на выходе генератора $p_{ген}$ может отличаться

от значения 1 мВт. Поэтому в (4.7) в правой части вычитается уровень p_r , соответствующий мощности $P_{ген}$.

При рассмотрении и расчете линейных трактов вводится понятие оптимальной длины усилительного участка l_0 , такой, при которой мощность собственных помех на выходе усилителя точно равна нормативному значению. Чтобы найти l_0 , подставим в (4.7) $KДБ = \alpha l_0$ и выразим m через длину тракта L_m и длину участка

$$p_{сш\sum} = p_{шш} + d + \alpha l_0 + 10 \lg \frac{L_m}{l_0} - p_{ген} \quad (4.8)$$

Уравнение (4.8) относительно l_0 является нелинейным и может быть решено численными методами или графически.

Для уменьшения влияния собственных помех (увеличение защищенности) необходимо уменьшить полосу частот приемного тракта Δf и применять малошумящие усилители во входных каскадах приемников (снижение коэффициента шума) [9].

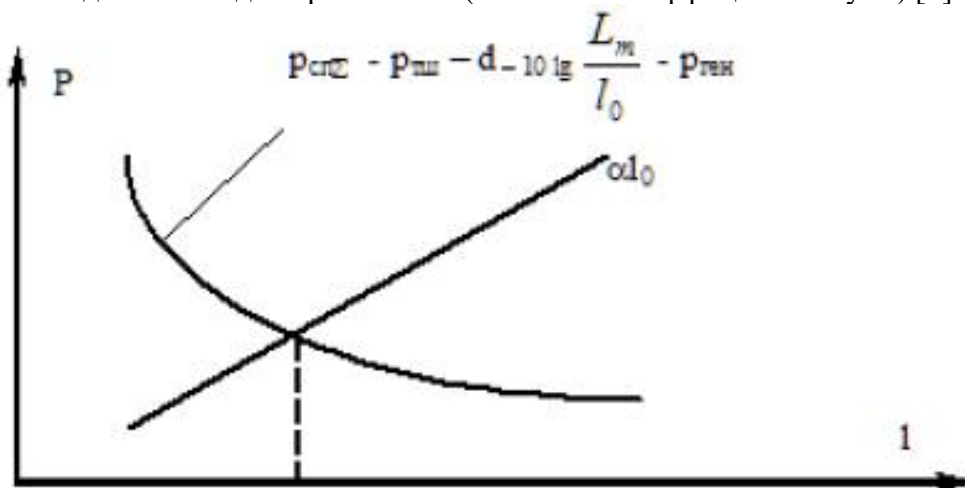


Рисунок 4.7 – Графический расчет l_0

Лекция 4. Линии связи на симметричном кабеле.

Основой телефонных сетей, сетей передачи данных, кабельного телевидения являются кабельные линии передачи. В настоящее время на магистральных, зонавых сетях и сетях доступа используются воздушные линии (ВЛ), симметричный кабель (СК), коаксиальный кабель (КК), волоконнооптические линии связи (ВОЛС). Их основные характеристики приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Характеристики кабельных линий связи

Тип кабеля	Частотный диапазон, МГц	Длина усилит. участка, км	Применение
ВЛ	0,1	1-50	Сельская связь, Зонавая связь
СК	1	3-20	Сети доступа, Зонавая связь
КК	0,05-300	3-10	Кабельное телевидение

ВОЛС	1-10 ⁵	1-200	Сети доступа, Зоновая связь
------	-------------------	-------	--------------------------------

В кабельных линиях связи используются разнообразные режимы передачи. Чаще всего применяется однополосный четырехпроводный. При этом встречные цепи (провода) для симметричных кабелей помещаются в разных многопарных кабелях, а в коаксиальных линиях и в ВОЛС в одном и том же. В воздушных линиях применяются двухпроводный двухполосный режим передачи.

Электрический кабель – это электротехническое изделие, содержащее изолированные друг от друга проводники, объединенные в одну конструкцию. В качестве изоляции используются бумага, полистирол, полиэтилен. Для обеспечения прочности, целостности и защиты от воздействий внешней среды провода заключены в общую герметичную оболочку. Чаще всего оболочка выполнена из пластмассы или металлопластика. Поверх оболочки помещается защитный покров, выполненный из металла или пластмассы.

Число пар проводников в кабеле может быть различным от 1 до 3000. В телефонии при домовой или квартирной разводке используются однопарные кабели ТРП («лапша»). Они объединяются в распределительных коробках (РК). Кабели, которые идут от группы абонентов (подъезд дома, офис учреждения и т.п.), содержат 10 и более пар. Эти кабели объединяются в распределительных шкафах (РШ) (рисунок 4.8). От шкафа к АТС идут кабели с числом пар от 100 до 3000.

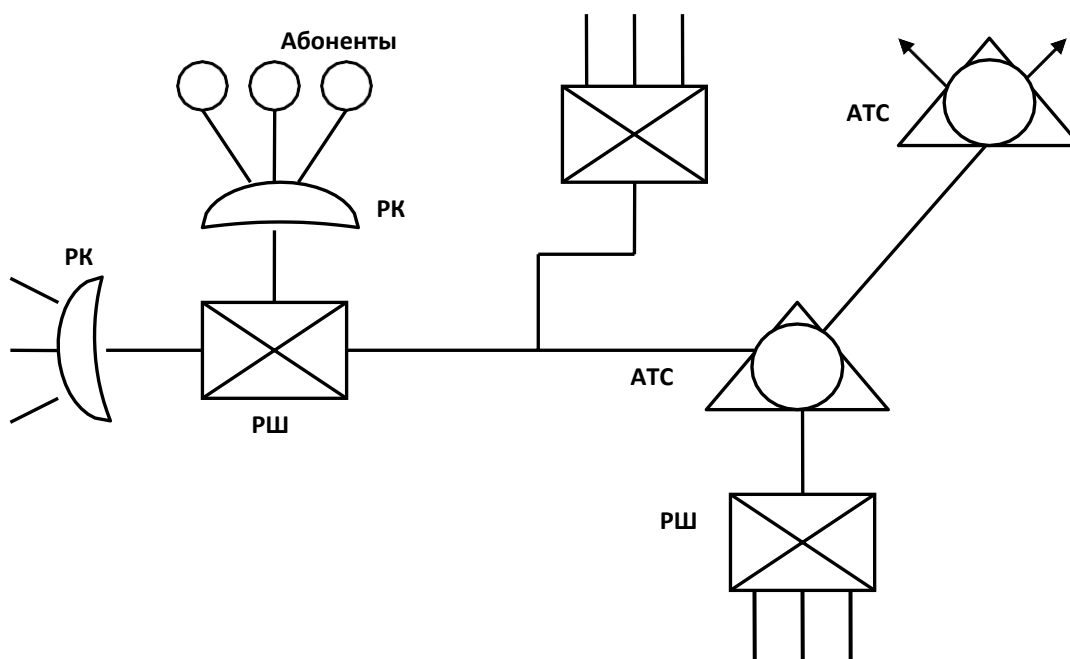


Рисунок 4.8 Схема участка городской телефонной сети

В компьютерных сетях при построении локальных вычислительных сетей используются кабели с числом пар равным 4 (кабели UTP-3, UTP-5). В то же время существуют многопарные кабели с большим числом пар.

Примеры поперечных сечений некоторых применяемых кабелей приведены на рисунке 4.9.

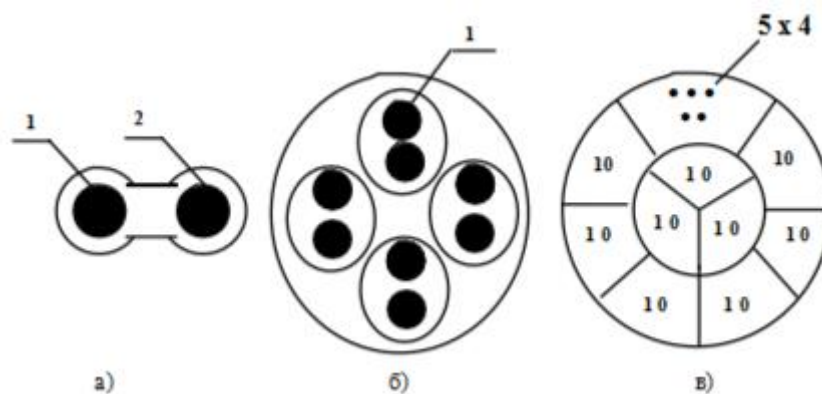


Рисунок 4.9 Поперечные сечения симметричных кабелей: а) однопарный б) четырехпарный в) стопарный. 1 – проводник, 2 - изоляция

В стопарном кабеле в каждой из 10 ячеек помещено пять двухпарных кабелей. Кабели, применяемые в компьютерных сетях, называют «витой парой».

Рассмотрим процессы передачи электромагнитных волн по двухпроводной симметричной линии. Структура силовых линий электрического E и магнитного поля H изображена на рисунке 4.10.

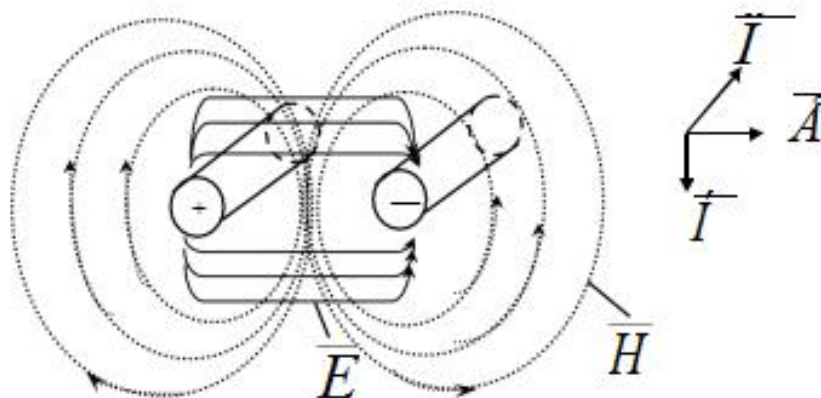


Рисунок 4.10 - Силовые линии векторов напряженности электрического и магнитного полей

Здесь силовые линии поля E начинаются и заканчиваются на проводниках. Силовые линии поля H непрерывны и замкнуты вокруг проводников с током I . Поскольку структура двухпроводной линии открытая, то часть силовых линий уходит от системы проводников. Это способствует взаимодействию поля симметричной линии с другими соседними проводниками (наводки) и излучению электромагнитной энергии, когда силовые линии полей E и H отрываются от проводников. Эффекты излучения и наводки увеличиваются с ростом частоты.

Векторы E и H перпендикулярны друг другу и вектору Пойнтинга $\vec{I}$, характеризующему плотность потока мощности в каждой точке среды распространения электромагнитной волны. Поэтому основная волна двухпроводной линии является поперечной электромагнитной волной ТЕМ или Т.

Затухание в симметричной двухпроводной линии определяется несколькими факторами:

- Омические потери, обусловленные нагреванием проводника при протекании по

нему электрического тока. Эти потери увеличиваются с ростом частоты благодаря поверхностному эффекту. При этом ток прижимается к поверхности проводника, его плотность увеличивается, а сопротивление проводника возрастает;

- потери за счет излучения, которые тоже возрастают с увеличением частоты;
- потери в диэлектрической среде, связанные с ее неидеальностью, наличием проводимости σ ($\operatorname{tg} \delta \neq 0$). Эти потери также возрастают с частотой.

Для примера на рисунке 4.11 приведены типичные зависимости для затухания и волнового сопротивления симметричной двухпроводной линии для разных значений диаметра медного провода d .

Приведенные зависимости доказывают, что обычные двухпроводные линии можно использовать в диапазоне до 300 – 500 МГц, но при этом надо решать задачу компенсации частотных искажений.

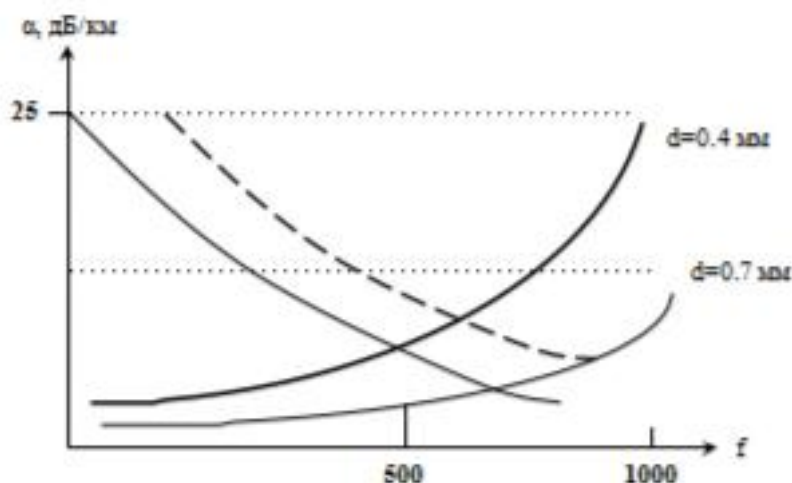


Рисунок 4.11 Частотные зависимости затухания и волнового сопротивления симметричной линии

Лекция 5. Волоконнооптические кабели

Оптический кабель представляет из себя скрученные оптические волокна (4 – 32 штуки) из кварцевого стекла. В них используется явление полного внутреннего отражения. Работают волокна в инфракрасном диапазоне при длине волны $\lambda = 0.85 - 1.6$ микрон. Этим длинам волн соответствует диапазон частот 170 – 350 Терагерц или $(1.7 - 3.5) \cdot 10^5$ ГГц. Чрезвычайно малая длина волны и чрезвычайно высокие значения несущей частоты и определяют уникальные возможности оптических волокон для передачи информации.

Действительно, высокие значения несущей частоты позволяют передавать сигналы с полосой частот 1 – 10 ТГц и более. Это соответствует длительности импульсов 0.1 – 1 пикосекунды или пропускной способности канала связи 1000 – 10000 Гбит/с. Конечно, такие потенциальные возможности оптических линий связи не так просто реализовать в полной мере, но даже небольшая доля от потенциальной пропускной способности дает таким линиям связи громадные преимущества.

В радиоэлектронике, связи волновые процессы, как правило реализуются в устройствах, размеры которых соизмеримы с длиной волны. Не являются исключением и оптические волокна. Для достижения предельных характеристик размеры поперечного сечения волокна должны не превышать $(3 - 4) \lambda$. С одной стороны, это создает трудности при изготовлении волокон, с другой существенно минимизирует поперечные размеры линий связи, поскольку размеры оптических передатчиков и приемников должны быть согласованы с сечением оптического волокна. Малые размеры волокон позволяют размещать их в одном оптическом кабеле десятками и сотнями.

Основной элемент оптического кабеля – волоконный световод – тонкое двухслойное цилиндрическое волокно. Оно состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления n_1 и n_2 (рисунок 4.12)

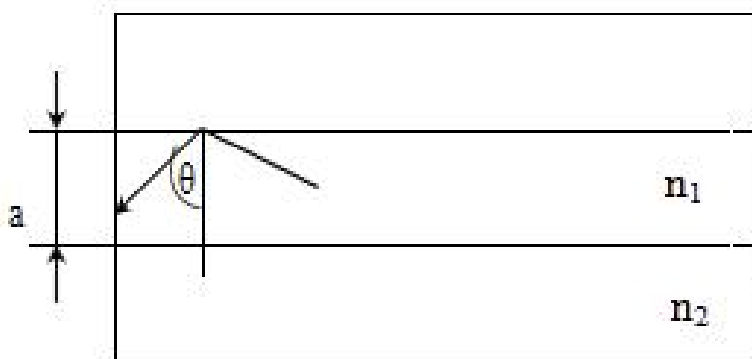


Рисунок 4.12 - Продольное сечение оптического волокна

В Так как $n_1 > n_2$, то при углах больше угла полного внутреннего отражения θ

$(\sin \theta = \frac{n_2}{n_1})$, оптические лучи полностью отражаются от границы раздела двух сред.

Оптическое волокно может обойтись и без оптической оболочки. При этом показатель преломления воздуха $n_2=1$ и условия полного внутреннего отражения будут выполняться даже в большем диапазоне углов θ . Однако на практике оптическое волокно должно быть изолировано от других волокон и защищено от внешней среды. Обычно в качестве защитной оболочки применяют полимерные материалы. У этих материалов оптические свойства (показатель преломления и коэффициент затухания) существенно отличаются от характеристик волокна и условия полного внутреннего отражения нарушаются. Поэтому в качестве развязки вводят оптическую оболочку. Если переход от области с показателем преломления n_1 к n_2 происходит резко, то волокно называют ступенчатым.

Изготовление двухслойного оптического волокна не представляет больших проблем. В процессе получения оптической заготовки кварцевого стекла из газовой среды кремния и кислорода в газовую смесь добавляют компоненты, которые при осаждении на цилиндрическую поверхность металлической трубки меняют показатель преломления стекла. Эти изменения не столь значительны. Например, $n_1=1,465$, а $n_2=1,46$. Этого, однако, достаточно для

реализации явления полного внутреннего отражения при углах $\theta > 85^\circ$.

Оптические волокна делятся на одномодовые и многомодовые. Согласно волновой теории оптических волноводов в них может распространяться несколько типов

колебаний (мод), отличающихся друг от друга структурой электрического и магнитного поля, значением фазовой скорости и волнового сопротивления.

Одномодовый и многомодовый режим можно приближенно интерпретировать и в рамках лучевой теории (рисунок 4.13)

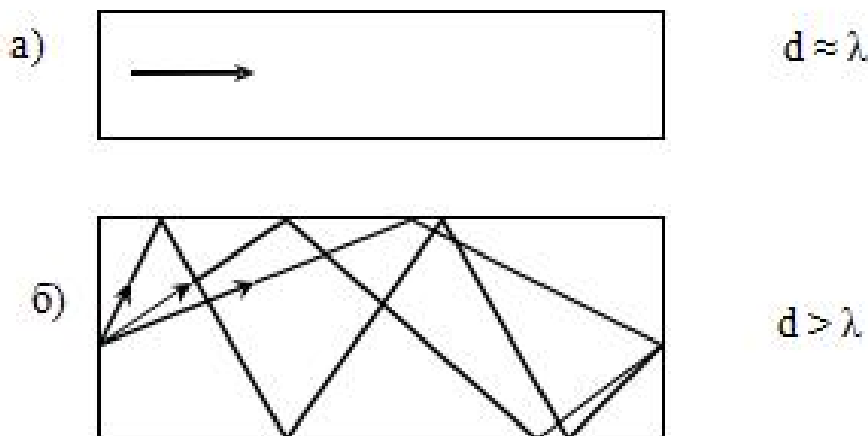


Рисунок 4.13 - Одномодовый (а) и многомодовый (б) режимы передачи

Здесь в многомодовом режиме для одного сигнала существует несколько одновременно распространяющихся лучей света, которые проходят путь в волокне за разные интервалы времени.

Излучение оптического передатчика (светодиода или лазера) вводится в волокно, как правило, с торца (рисунок 4.14)

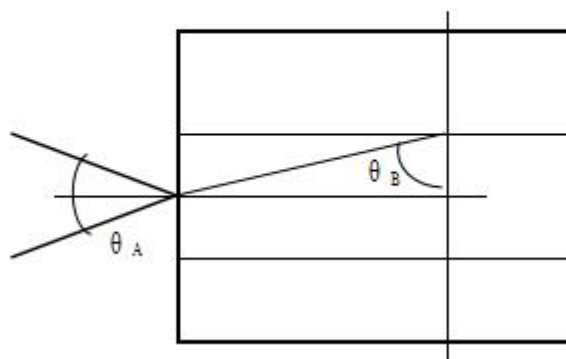


Рисунок 4.14 - Ввод излучения в волокно

Телесный угол θ_A , связанный с углом полного внутреннего отражения θ_B определяет пучок лучей, которые будут распространяться в волокне. Для описания процессов ввода излучения и возникновения различных мод вводится понятие числовой апертуры

число мод в волноводе пропорционально $\left(\frac{a}{\lambda}\right)^2$. Одновременное возникновение и распространение нескольких мод существенно снижает пропускную способность волоконно-оптической линии связи. Разные лучи, возбужденные коротким импульсом с длительностью $\tau_{\text{вх}}$ проходят в волокне разный путь и, следовательно, приходят к

фотоприемнику с разными задержками. При этом длительность выходного импульса существенно увеличивается. Это явление называют модовой дисперсией и характеризуют уширением $t_{мод}$

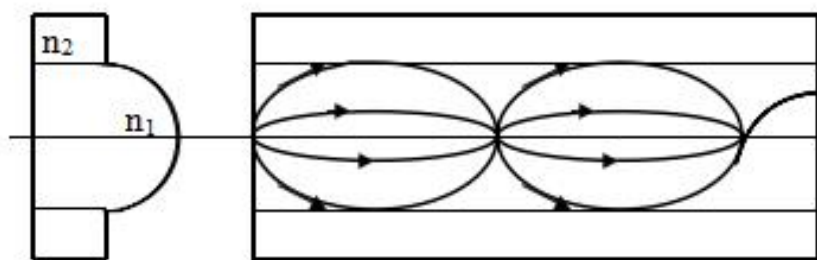


Рисунок 4.15 - Градиентный оптический кабель.

Модовое уширение тем больше, чем больше число мод N и длина линии связи. Величина уширения импульса за счет модовой дисперсии ступенчатого кабеля достигает 20 – 50нс/км.

Одним из способов борьбы с уширением импульса за счет модовой дисперсии является применение градиентных волноводов (рисунок 5.8).

В этом случае траектория лучей становится искривленной, причем лучи с меньшими

углами θ идут ближе к оси волокна, где оптическая плотность больше. Поэтому оптическая разность хода разных мод становится меньше чем у ступенчатого волновода. Вследствие этого уменьшается число мод (примерно в два раза) и уширение импульса $t_{мод}$ (примерно в 10 – 20 раз).

В одномодовом волокне модовая дисперсия отсутствует, а материальная и волноводная дисперсия имеют различные частотные зависимости, такие, что на длине волны $\lambda = 1,35\text{мкм}$ результирующее уширение импульса близко к нулю. В этом случае можно обеспечить передачу очень коротких импульсов (до 10псек) и высокую пропускную способность (до 100 Гб/сек).

Уникальные пропускные и дисперсионные свойства оптических волокон могут реализоваться только в том случае, если материал волокна (кварцевое стекло) будет обладать малыми потерями, связанными с поглощением и рассеянием света. Чем меньше потери, тем больше дальность действия линии связи. В рабочем частотном диапазоне ($\lambda=1 - 2 \text{ мкм}$) решающий вклад в затухание вносит поглощение на различных примесях, которое носит резонансный характер. Частотная зависимость затухания волокна, в котором состав примесей существенно уменьшен, приведена на рисунке 4.16.

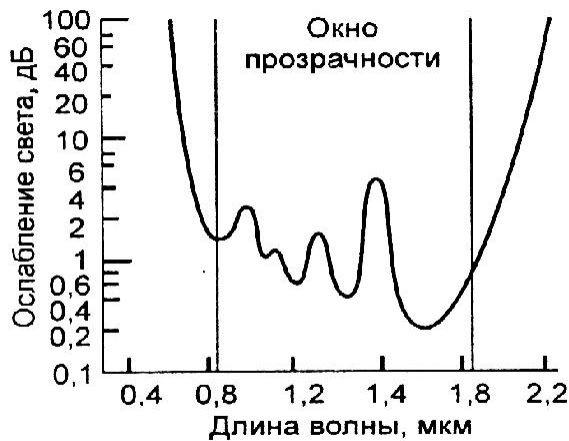


Рисунок 4.16 - Зависимость ослабления света в кварцевом волокне от длины волны

Здесь оставшиеся примеси (ионы гидроксильных групп OH) вызывают резонансное поглощение света на длинах волн 0,45; 1,24; 1,34 мкм. Между этими участками есть окна прозрачности, наиболее интересными из которых являются окна при $\lambda = 1,3$ мкм, $\lambda = 1,55$ мкм. Наименьшее затухание (до 0,3 дБ/км) и наибольшая дальность связи (до 100 км) достигается при работе линии связи на $\lambda = 1,55$ мкм. Однако длина волны $\lambda = 1,3$ мкм тоже уникальна тем, что для нее минимум затухания (0,7 – 1 дБ/км) совпадает с минимумом уширения импульса. Поэтому в сочетании параметров “дальность действия – пропускная способность” эта длина волны также получила широкое применение.

Еще одним механизмом затухания световых волн является рассеяние на неоднородностях кварцевого стекла. Это обстоятельство предъявляет высокие требования к однородности при изготовлении волокон.

Лекция 6. Плотное волновое мультиплексирование

Пропускную способность волоконно-оптических сетей можно увеличить внедрив технологию плотного волнового мультиплексирования (Dense Wavelength Division Multiplexing - DWDM). Данная технология подразумевает спектральное разделение полосы пропускания волокна на несколько оптических каналов. Таким образом в одной паре волокон параллельно передается несколько независимых каналов (каждый на своей длине волны), что позволяет повысить пропускную способность системы передачи.

Возможность спектрального уплотнения рассмотрим на примере окна прозрачности 1550 нм. В диапазоне длин волн (1530-1565 нм) полоса пропускания составляет 4,4 ТГц, которая позволяет реализовать в С-диапазоне до 40 оптических каналов при ширине одного канала 100 ГГц или до 80 оптических каналов при его ширине 50 ГГц. В диапазоне L (1570- 1605 нм) максимальное число оптических каналов может достигать 160 при ширине канала 50 ГГц.

Дальнейшее увеличение пропускной способности и дальности действия оптических кабелей можно получить с помощью солитоновых DWDM-систем. Основное свойство оптического солитона - возможность распространения оптического импульса без дисперсионного расплывания. Солитон это модулированный по интенсивности оптический импульс, который за счет нелинейного взаимодействия между спектральными составляющими поддерживает неизменной форму оптического сигнала по мере его распространения в волокне. При учете нелинейного эффекта перераспределения энергии между спектральными составляющими можно избежать

дисперсионного расплывания сигнала, распространяющегося вдоль волокна. Данная технология представляется наиболее перспективной для передачи сигнала STM-256 (40 Гбит/с) на большие расстояния. Использование технологии DWDM оправданно для передачи больших объемов трафика.

Современные городские транспортные сети должны поддерживать работу с неоднородным трафиком, в том числе с узкополосным трафиком на базе SDH-систем и широкополосным ATM- и Ethernet-трафиком. Технология DWDM позволяет объединить передачу разнородного трафика. Для этого каждому типу трафика выделяются свой оптический канал или своя длина волны. Можно утверждать, что технология DWDM становится экономически привлекательной при объеме трафика 40 Гбит/с и выше. Однако экономически эффективной она может быть и при объеме 10 Гбит/с. Чтобы лучше понять особенности построения DWDM-сетей в городских условиях, рассмотрим основные функциональные узлы соответствующего оборудования.

Основные узлы DWDM-оборудования.

Технология DWDM предъявляет гораздо более жесткие требования к оптическим источникам излучения, нежели SDH. Чтобы соседние каналы не влияли друг на друга, ширина спектра излучения должна быть значительно меньше ширины оптического канала, т. е. на уровне 0,2-0,3 нм. В системах SDH по оптическому кабелю передается только один сигнал на частоте 1310 или 1550 нм. Поэтому требования к стабильности частоты и ширине спектра излучения оптического источника сравнительно невысоки.

Для передачи по одному волокну нескольких сигналов STM необходимо преобразовать их из "формата" SDH в "формат" DWDM. Эту функцию выполняет транспондер. На его вход подается сигнал STM (или ATM, IP), который необходимо преобразовать в "формат" DWDM, т. е. в сигнал со строго фиксированной длиной волны и узким спектром излучения. Оптический STM-сигнал преобразуется в электрическую форму, восстанавливается форма сигнала, и далее выполняется обратное электрооптическое преобразование в "формат" DWDM. Для восстановления формы сигналов используется 3R-преобразование: 1R (re-amplification) - усиление сигнала, 2R - 1R плюс восстановление формы сигналов (re-shaping), 3R - 2R плюс ресинхронизация (re-timing). Для передачи сигнала на сравнительно небольшие расстояния, в пределах города или области, достаточно использовать транспондеры с функцией 2R.

Можно выделить четыре основных узла оборудования DWDM:

- * оптический терминальный мультиплексор (Optical Terminal Multiplexer - OTM),
- * регенератор (Regenerator - REG),
- * оптический усилитель (Optical Line Amplifier - OLA),
- * оптический мультиплексор ввода-вывода (Optical Add Drop Multiplexer - OADM).

Основными узлами оптического терминального мультиплексора являются оптический мультиплексор (OM) и оптический демультиплексор (OD). В направлении передачи OM мультиплексирует сигналы с фиксированными длинами волн, сформированные на выходе транспондеров, в групповой сигнал, который и передается по оптическому кабелю. На приеме OD демультиплексирует групповой сигнал на сигналы с фиксированными длинами волн, которые подаются на транспондеры.

Оптический регенератор используется для восстановления формы группового сигнала, подавления джиттера и улучшения соотношения сигнал/шум. С этой целью используется преобразование O-E-O (Optical-Electrical-Optical). Групповой сигнал на входе REG преобразуется в электрическую форму, проводится 3R-восстановление формы сигнала, и далее он опять преобразуется в оптическую форму. Регенератор

строится на базе двух ОТМ-мультиплексоров, включенных по схеме back-to-back через транспондеры. Такая конфигурация позволяет осуществить ввод-вывод всех оптических каналов.

Оптический усилитель соответственно усиливает групповой сигнал без восстановления его формы. При передаче информации на большие расстояния усилители оснащают функцией эквалайзера - выравнивания мощности оптических каналов. В городских условиях функция эквалайзера не используется, и это уменьшает стоимость усилителя. Оптический усилитель наиболее дешевый узел оборудования DWDM (в сравнении с ОТМ- мультиплексором и регенератором).

Оптический мультиплексор ввода-вывода строится на базе оптического усилителя, в который добавляется пассивная оптическая плата, позволяющая осуществить ввод-вывод ограниченного числа оптических каналов с фиксированными длинами волн. Она представляет собой брегговскую решетку с периодическими изменениями индекса преломления, которые достигаются за счет насечек на оптоволоконном кабеле, сделанных с помощью ультра- фиолетового излучения. OADM-мультиплексор на базе брегговских решеток позволяет осуществлять ввод-вывод от 1 до 12 оптических каналов. Для остальных каналов он работает как усилитель. Основное преимущество такого мультиплексора по сравнению с ОТМ- мультиплексором и регенератором - гораздо более низкая его цена.

Особенности использования DWDM в городских условиях. При построении городских транспортных сетей требования к элементам DWDM упрощаются. При передаче сигнала на небольшие расстояния снижаются и требования к усилителям: как правило, не нужна функция эквалайзера, выходная мощность тоже может быть уменьшена. Все это приводит к заметному удешевлению усилителей. В городских сетях DWDM промежуточные узлы работают в режиме усилителей, поэтому для передачи трафика преобразование О-Е-О осуществляется только на конечных узлах, а в промежуточных узлах - лишь усиление сигнала.