

Физический Уровень ISO/OSI

- Мера информации, вероятностный подход
- Основные характеристики систем передачи дискретных сообщений и линий связи
- Эффективность использования частотного диапазона средствами передачи данных
- Зависимость характеристик систем передачи дискретных сообщений и линий связи
- Предел требуемого отношения E_b/N_0 по Шеннону¹
- Информационная емкость дискретного сигнала
- Информационная емкость непрерывного сигнала
- Пределы скорости передачи данных, теоремы Найквиста и Шеннона¹

¹ - <http://www.m-w.com/cgi-bin/audio.pl?ggshan06.wav=Shannon>
см. также <http://www.hyperdictionary.com/dictionary/Shannon>

Мера информации, вероятностный подход

Информация – разрешение неопределенности (Шеннон)

$$I(A) = f(P(A))$$

Пусть сообщение состоит из независимых символов A, B, тогда:

$$I(AB) = f(P(A, B)) = f(P(A)P(B))$$

Естественно ожидать, что информация, содержащаяся в сообщении AB является суммой информации независимых составляющих A и B:

$$I(AB) = f(P(A)P(B)) = f(P(A)) + f(P(B)) \therefore f(x) = -\log(x)$$

$$I(A) = -\log_2(P(A)) = \log_2(1/P(A))$$

Удобно использовать основание 2 (единица - «бит»).

Основание 10 используется для единиц «Хартли»

Количество информации ДВОИЧНОГО ИСТОЧНИКА

- Двоичное слово длиной n имеет 2^n различных вариантов, при условии их равной вероятности, $P=1/2^n$, тогда:

$$I = -\log_2(1/2^n) = n \text{ (бит)}$$

Энтропия H – среднее кол-во информации, приходящееся на символ:

$$H = \sum_{i=0}^{m-1} P(A_i) \log_2 [1/P(A_i)]$$

Для равновероятных символов:

$$H=I/n$$

Задача

- Найти энтропию источника четвертичных символов (0 .. 3) для случаев
 - равновероятных символов
 - символов с вероятностями 0:0.8 1:0.1 2:0.05 3:0.05
- Когда энтропия принимает макс. значение?

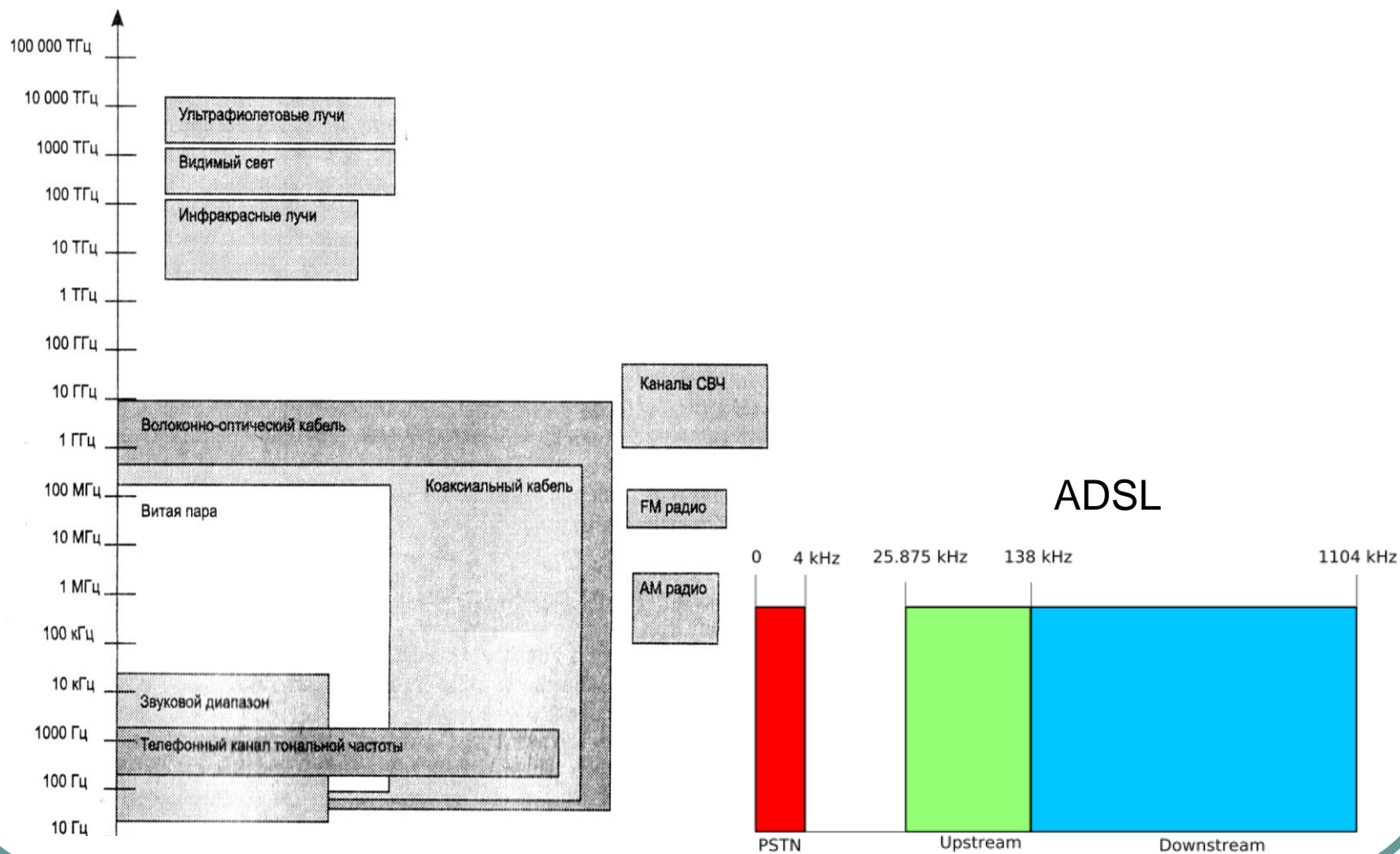
Характеристики системы передачи дискретных сообщений

- Максимальная скорость передачи данных (пропускная способность) r_b , бит/с (bps). Производные единицы (Kbps, Mbps, Gbps) – степени 10.
- Задержка передачи
- Битовая и символьная относительная ошибка (в определенном смысле, вероятность ошибки): BER (Bit Error Ratio), SER (Symbol Error Ratio)

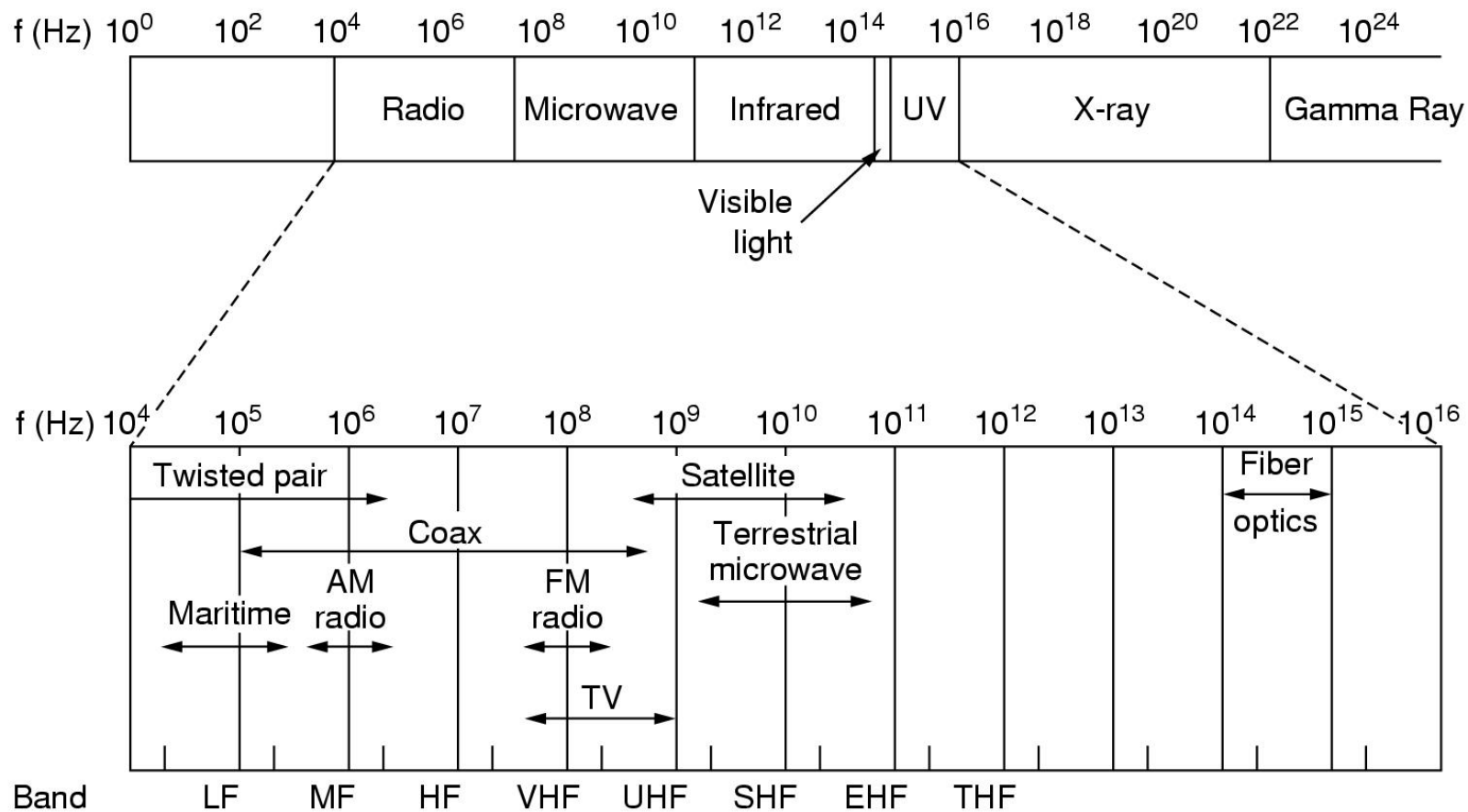
Характеристики линий связи

- АЧХ – зависимость амплитудного затухания от частоты синусоиды на входе линии иногда мощности. Часто вместо амплитудного затухания измеряют затухание мощности.
- Полоса пропускания (bandwidth) – непрерывный диапазон, в котором затухание не превышает пороговой величины (например 75% или 50%)
- Затухание $A = 10 \cdot \log_{10}(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}})$

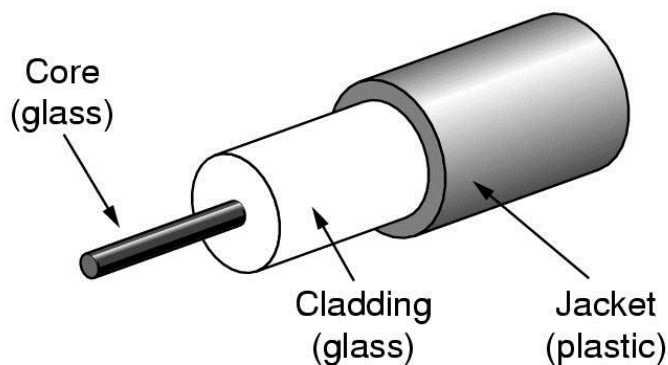
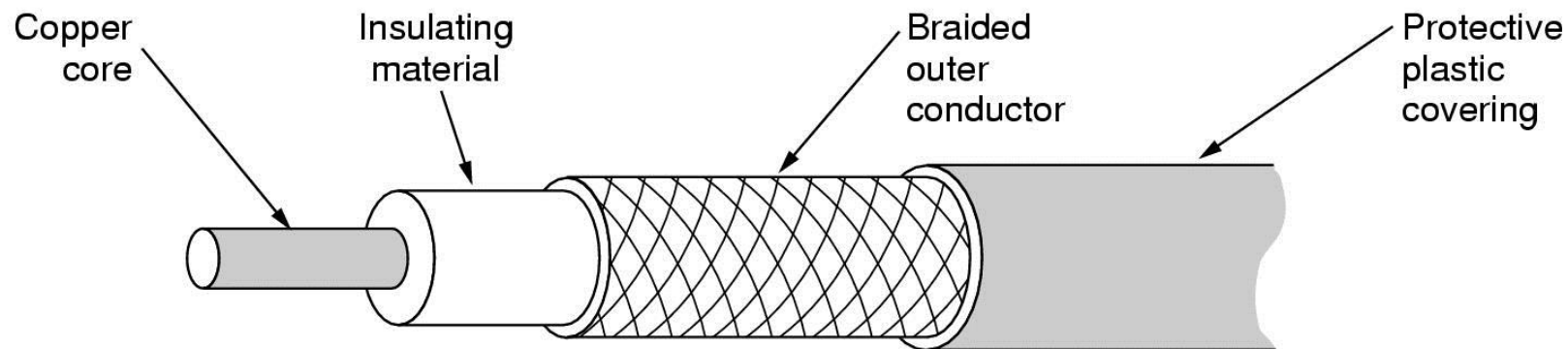
Полосы пропускания линий связи



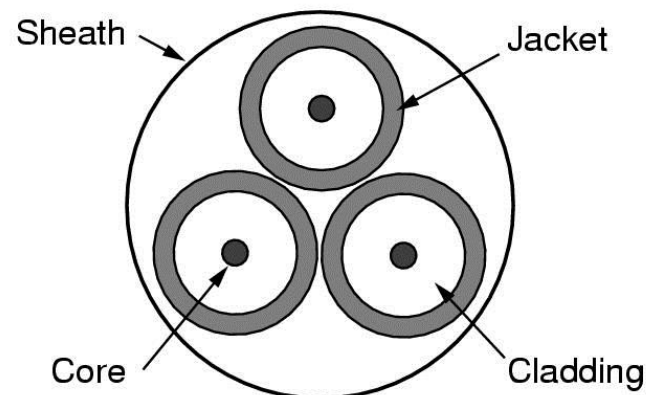
Частотные диапазоны



Распространенные кабельные среды передачи: RG-58, TP, FO

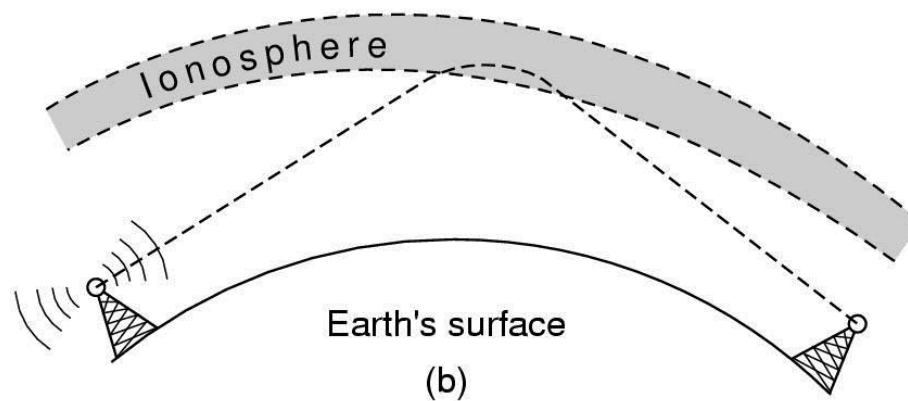
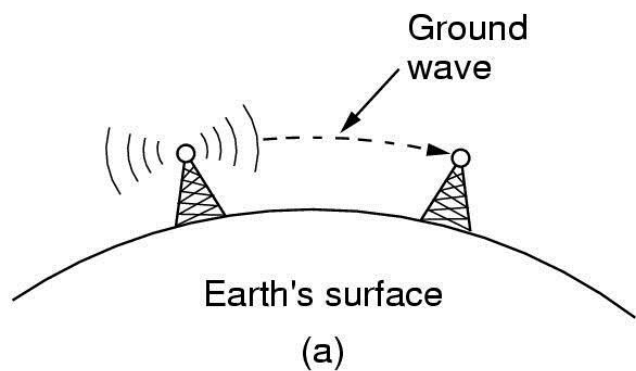


(a)

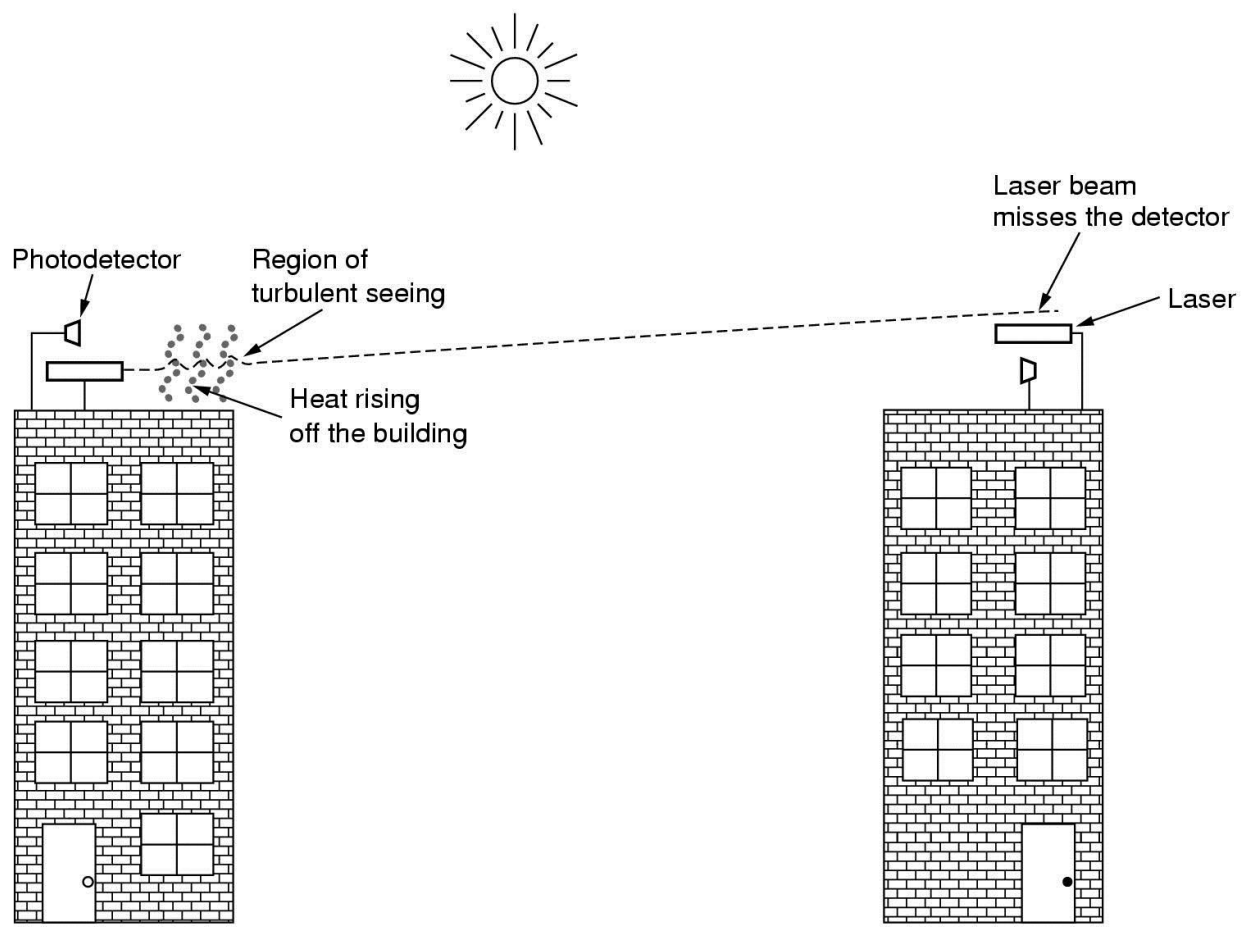


(b)

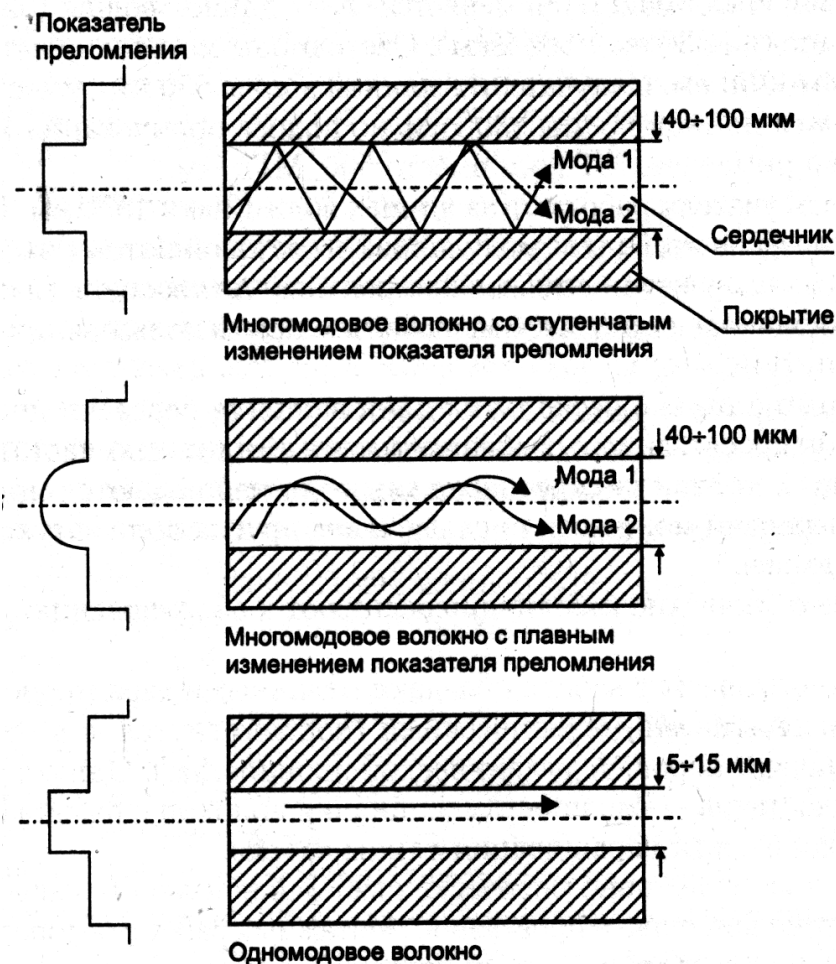
Некабельные среды передачи



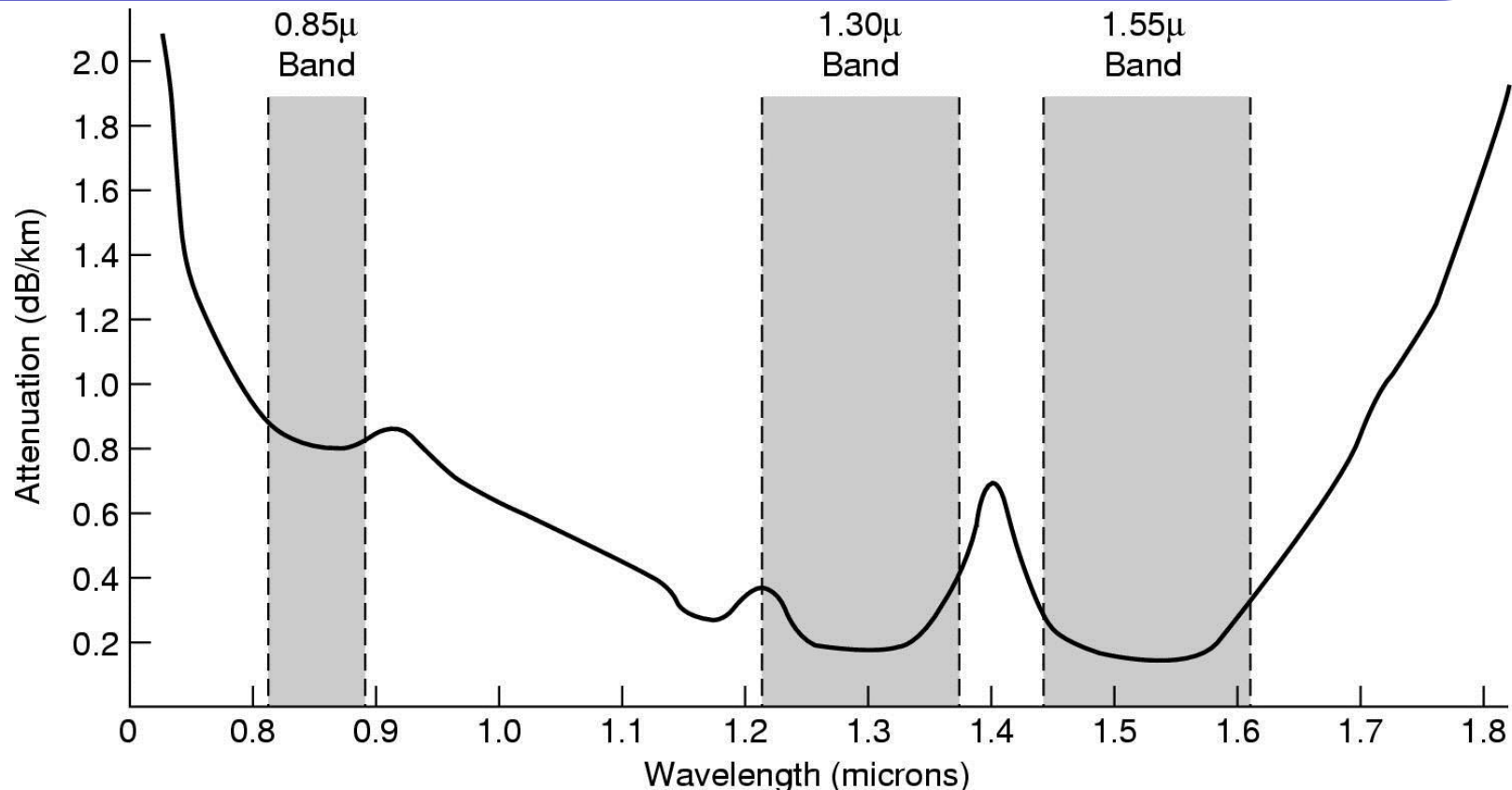
Инфракрасные лазерные линии СВЯЗИ



Оптические кабели MMF, SMF



Используемые оптические диапазоны – “окна прозрачности”



В ходе эксплуатации, «водяной пик» может существенно увеличиться. В настоящее время производят и т.н. AllWave оптоволокно, с отсутствием «водяного пика» связанного с поглощением ОН-ионами на 1385 нм

Диапазоны SMF оптоволокна

Диапазон	Название	Диапазон
O	Original	1260-1360 нм
E	Extended	1360-1460 нм
S	Short	1460-1530 нм
C	Conventional	1530-1565 нм
L	Long	1565-1625 нм
U	Ultra-long	1625-1675 нм

Коннекторы для оптоволоконна (ST, FC, CS). Диаметры пластиковых и стеклянных кабелей.

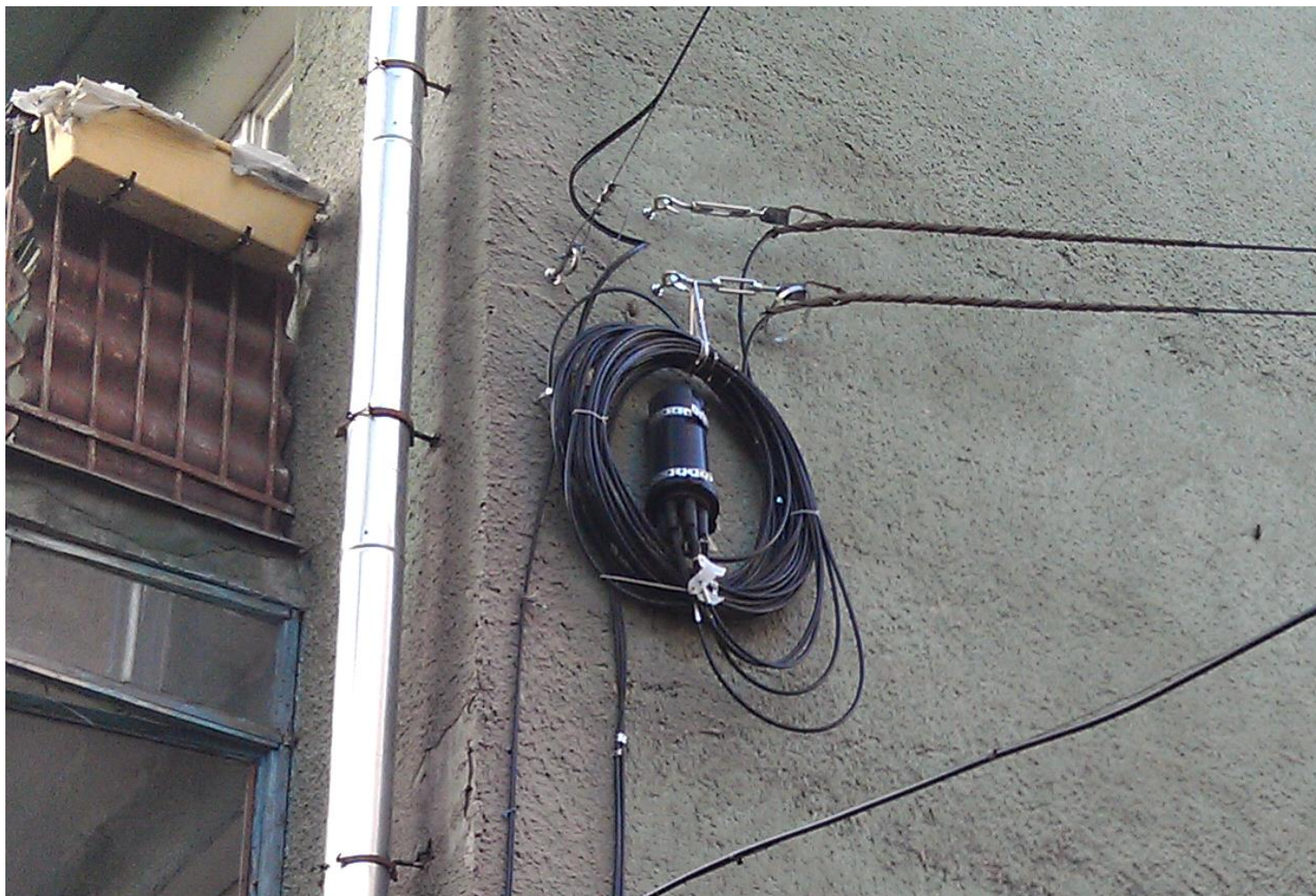
CS-дуплекс

Оптический разъем состоит из оболочки, внутри которой расположен керамический наконечник - **ферул** с прецизионным продольным каналом. Распространенные внешние диаметры – 2.5 и 1.25 мм

Plastic Optical Fiber (POF) 980/1000	Hard Polymer Clad Fiber (HPCF) 200/230	Multimode GOF 100/140
Multimode GOF 62.5/125	Multimode GOF 50/125	Singlemode GOF 9/125

GOF=Glass Optical Fiber

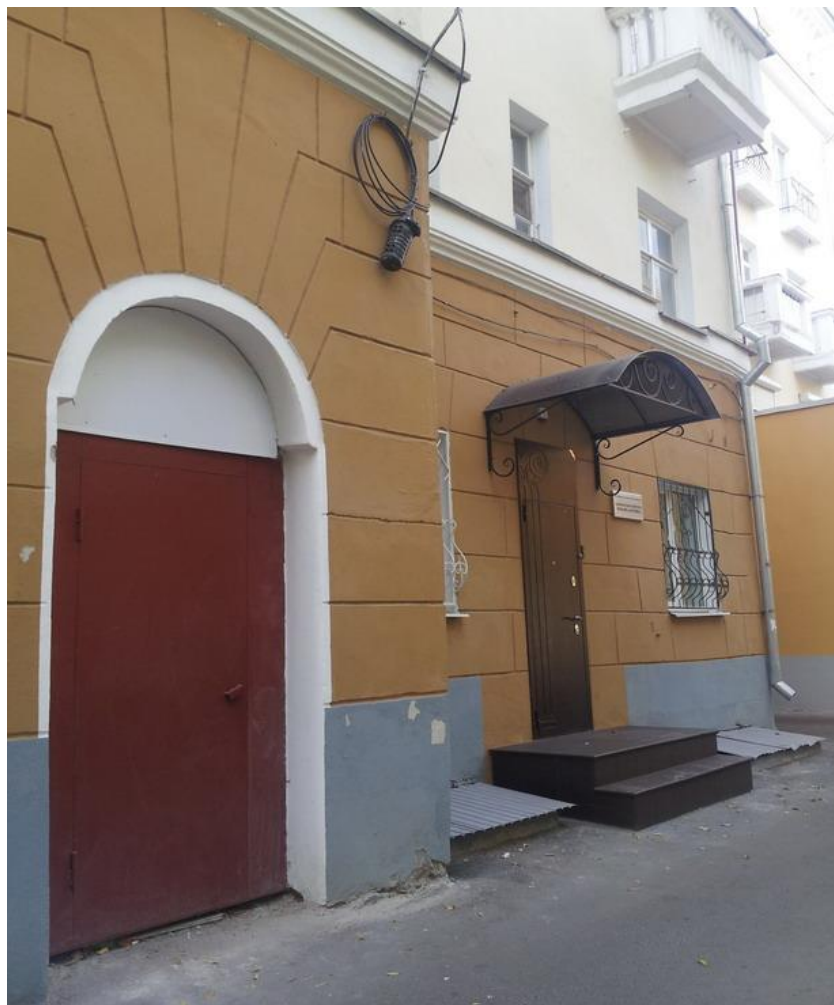
Муфты...



Муфты...



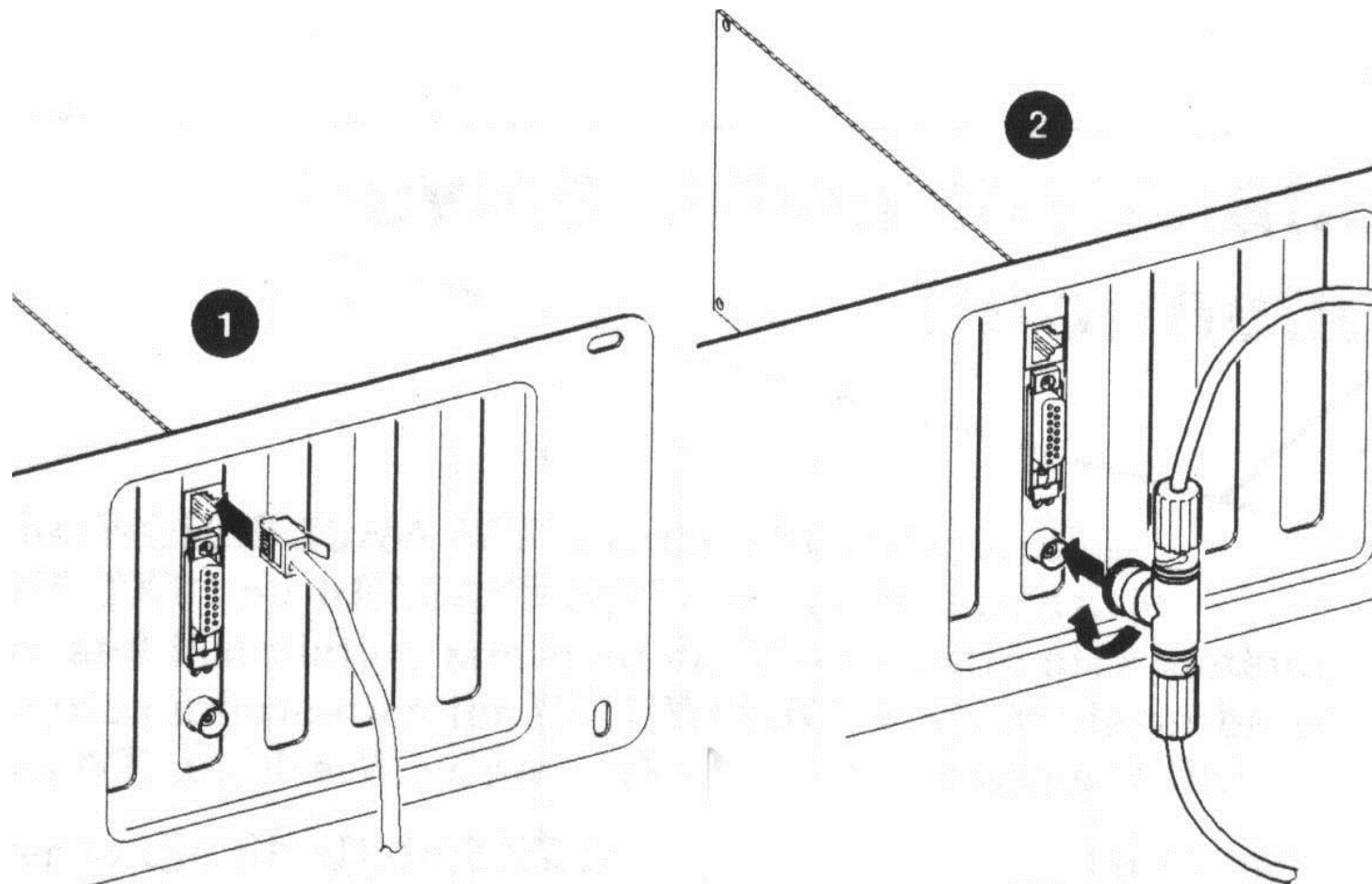
Муфты...



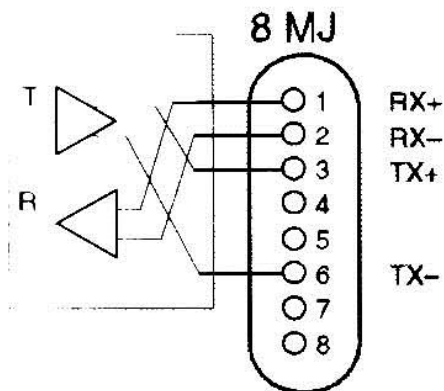
WDM-технология ITU G.694.1,2

- WDM - wavelength-division multiplexing
 - Увеличение скорости, возможность дуплекса по 1 волокну
 - Coarse WDM (CWDM) – 1271 - 1611 nm
 - до 18 каналов (по стандарту)
 - пример: Ethernet LX-4 10 Gbit/s = 4x3.125Gbit/s в диапазоне 1310 nm
 - Dense WDM (DWDM)
 - Диапазон Conventional (C-band), 1525 nm – 1565 nm
 - Диапазон Long (L-band), 1570 nm – 1610 nm
 - до 160 каналов с разделительными полосами 25 GHz
 - В этом диапазоне, волоконно-эрбиевые усилители (EDFA) пришли на смену оптико-электро-оптическим преобразователям, длительное время используемым в SONET/SDH технологии.
- В 2011г. в NEC Laboratories достигнута скорость передачи 101.7 Tb/s на 165 км (370 каналов).
- В 2014 Eindhoven University of Technology (Нидерланды) и University of Central Florida (США) достигли скорости 255 Тбит/с через 7-стержневой оптоволоконный кабель, используя 32QAM модуляцию. Полная спектральная эффективность составила 102bits/s/Hz

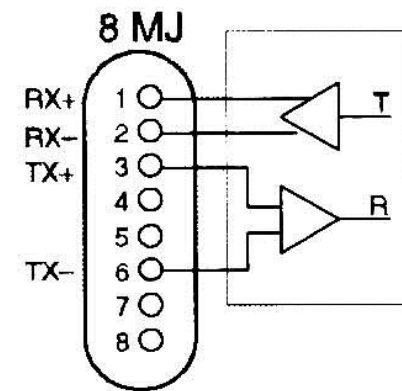
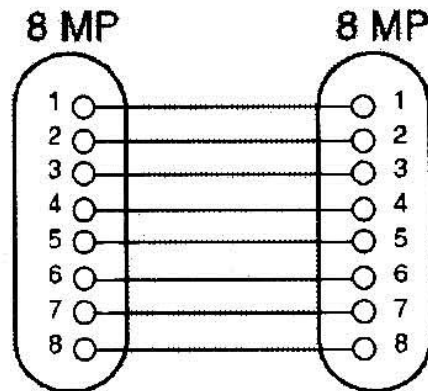
Витая пара (ТР), рис. 1 и коаксиальный кабель, рис. 2



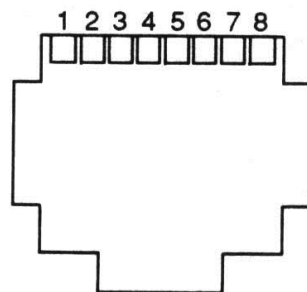
Коннекторы и патч-кабели для среды витая пара (Twisted Pair, TP)



DECrepeater 900TM



MAU



гнездо RJ-45

Характеристики распространенных сред передачи

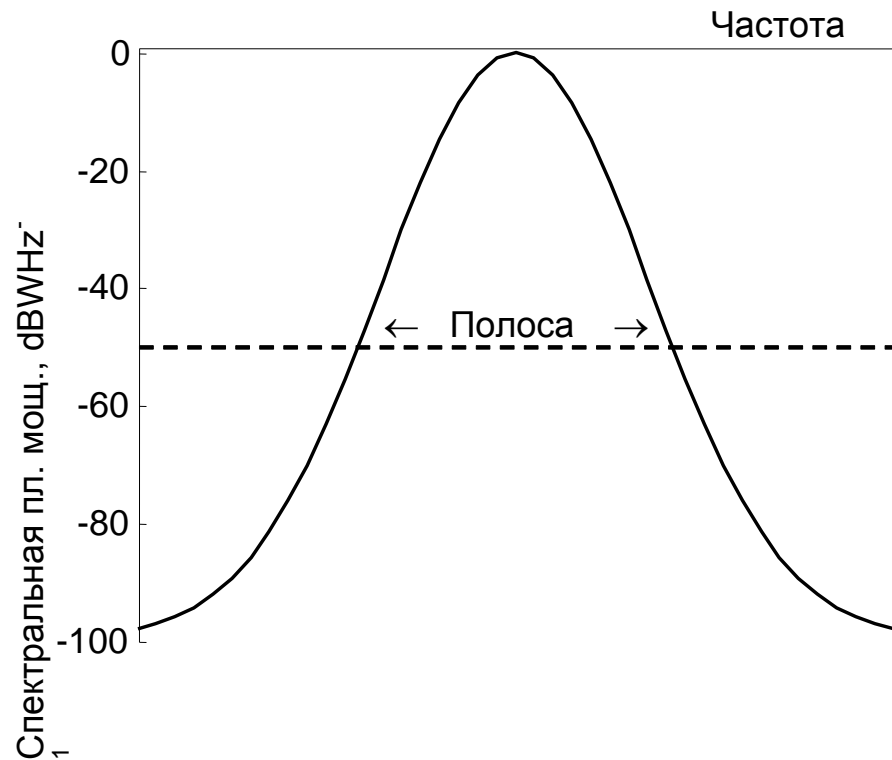
Тип	Полоса частот, MHz	Макс. рас. между узлами, m	Стандартные скорости передачи данных, Mbps*
TP3	10	100*	10
TP5, STP	100	100*	100
MMF	30×10^6	2000*	1000
SMF	30×10^6	50000	1000 (100000 в проектах)
RG-58	10	185*	10
Thick coax	20	500*	10

* Для Ethernet сетей

Спектральная эффективность

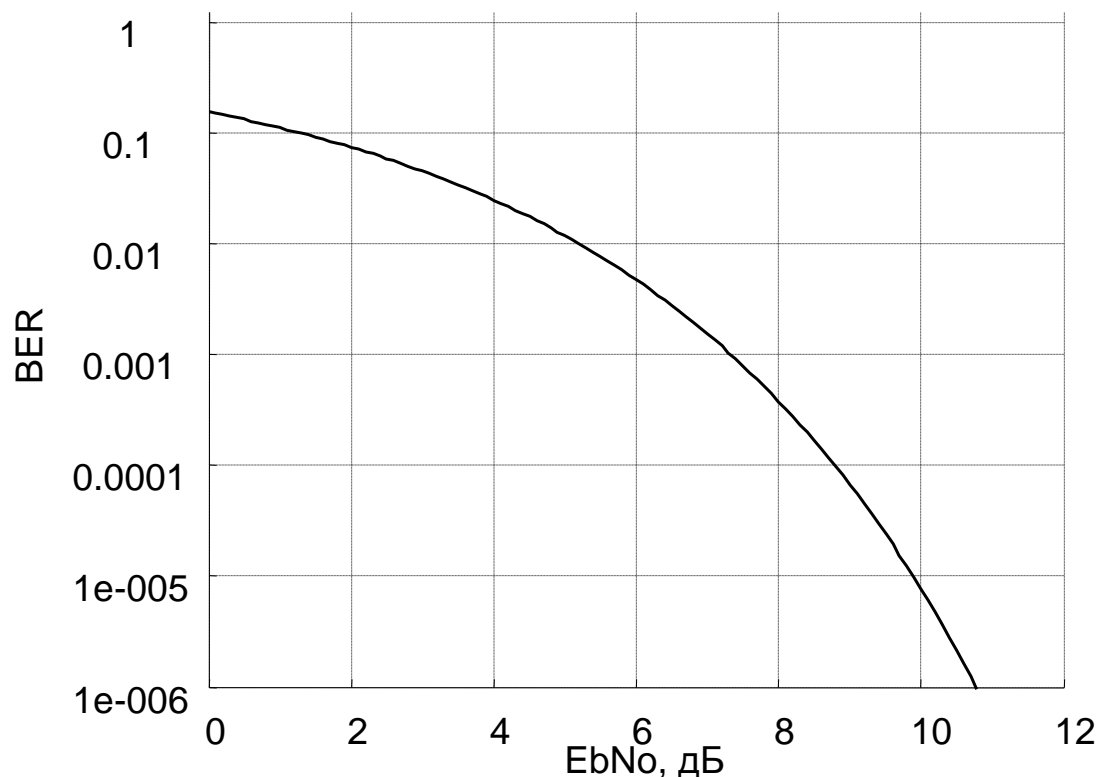
- измеряется в $\text{bits/s} \cdot \text{Hz}^{-1}$
- «эта» - спектральная эффективность
- r_b - битовая скорость
- W – отведенная полоса частот

$$\eta = \frac{r_b}{W}$$



Вероятность битовой ошибки. Относительная ошибка BER

- Вероятность битовой ошибки зависит от отношения сигнал/шум линии или, энергии бита/спектральной плотности мощности шума E_b/N_0 , а также вида модуляции (на графике - BPSK)

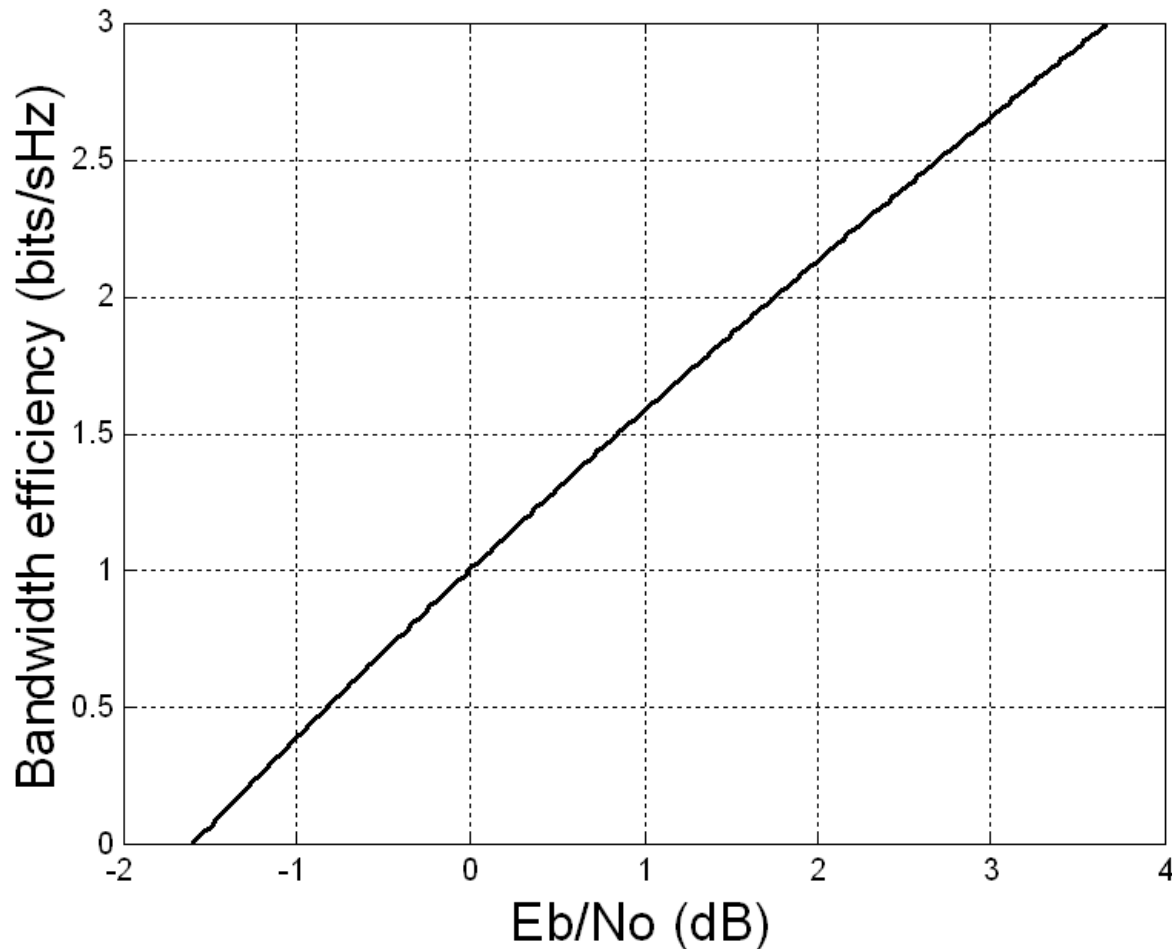


Компромисс между энергетической и спектральной эффективностями

$$\frac{E_b}{N_0} \geq \frac{2^\eta - 1}{\eta}$$

Минимальное отношение E_b/N_0 для заданной спектральной эффективности получено Шенноном для т.н. AWGN канала – канала с аддитивным гауссовским шумом

Предел отношения E_b/N_0 по Шеннону



Предел Шеннона для энергетической эффективности

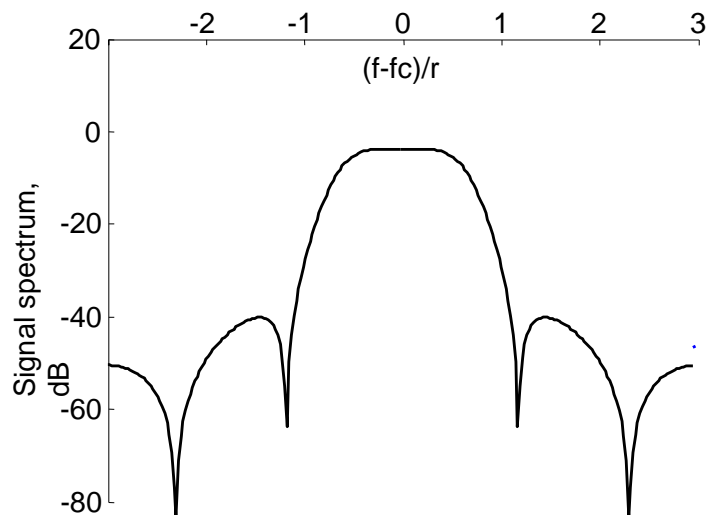
$$\lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{2^\eta - 1}{\eta} = \frac{(2^\eta - 1)'}{(\eta)'} \Big|_{\eta=0} = \frac{2^\eta \cdot \ln(2)}{1} \Big|_{\eta=0} = \ln(2) \approx 0.64$$

$$\frac{E_b}{N_0} \geq 10 \log_{10}(\ln(2)); \quad \frac{E_b}{N_0} \geq -1.59 \text{ dB}$$

Задача

Коммуникационная система, использующая BPSK модуляцию, имеет следующие характеристики и спектр (как функция частотного смещения относительно несущей, нормализованного к скорости передачи (используется фильтр Баттерворта 6-го порядка). Определите максимальную r_b . Выясните: ограничена система по полосе частот или по мощности.

Мощность передатчика, мВт	100
Потери при прохождении, дБ	100
Шум/ослабление в приемнике, дБ	2
Температура приемника, К	290
Заданная вероятность ошибки (BER)	10^{-6}
Ослабление вне полосы, дБ	-40
Полоса канала, МГц	300



Решение задачи

Решение: Бюджет мощности, $S/N_0 = S_T \times [(1/L)/(kT \times F)]$:
В децибелах: $S/N_0 = S_T - L - kT - F$:

Мощность передатчика (S_T), дБВт	-10
Потери при прохождении ($1/L$), дБ	-100
Принимаемая мощность (S), дБВт	-110
Тепловой шум (kT), дБВтГц ⁻¹ , $10 \cdot \log(1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 290 \text{ К})$	-(-204)
Шум приемника (F), дБ	-2
Отношение сигнал/шум (плотность) на приемной стороне, дБГц	92

Решение задачи (продолжение)

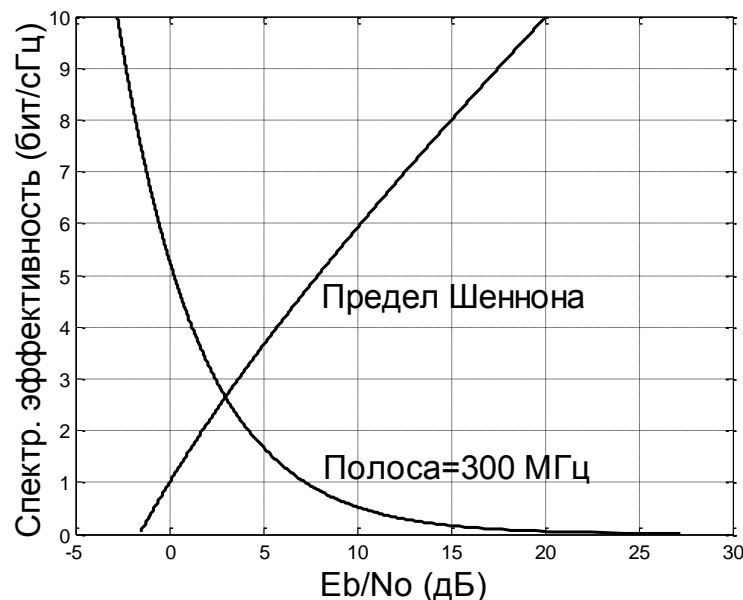
- По графику BER определяем, что требуемая вероятность ошибки (10^{-6}) достигается при $E_b/N_0 = 10.6$ dB (см. график для BPSK)

$$\frac{S}{N_0} = r_b \frac{E_b}{N_0} \quad \therefore r_b = \frac{S / N_0}{E_b / N_0}$$

- $r_b = 92 - 10.6 = 81.4$ dB (bit/s) или 138 Mbps.
- По условию ослабления на краях диапазона (график спектра излучения) $W \geq 2 * r_b$
- Занимаемая полоса частот: $2 * 138 = 276$ MHz, т.к. полоса уже, чем предоставляемая по условию, система ограничена мощностью

Решение задачи (продолжение)

- Предел спектральной эффективности (2.7 bits/s·Hz⁻¹) может быть найден графически для вычисленного бюджета мощности и полосы 300 MHz (кривая $E_b/N_0 = 10 \cdot \log_{10}(5.2/\eta)$ см. следующий слайд)
- Предельная скорость передачи: 2.7 bits/s·Hz⁻¹ x 300 MHz = 810 Mbit/s



Предел Шеннона определяет компромисс между спектральной и энергетической эффективностью. Соответственно могут быть оптимизированы коммуникационные системы.

Решение задачи (окончание)

- Получение предельной спектральной эффективности и предельной скорости передачи идеальной системы

$$\frac{S}{N_0} = r_b \frac{E_b}{N_0} \Rightarrow \frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{r_b} \frac{S}{N_0} \quad \text{Учитываем, } \eta = \frac{r_b}{W}$$

$$\begin{cases} \frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{r_b} \frac{S}{N_0} \\ \frac{E_b}{N_0} = \frac{2^n - 1}{\eta} \end{cases} \Rightarrow \frac{1}{\eta W} \frac{S}{N_0} = \frac{2^n - 1}{\eta} \Rightarrow 2^n = \frac{1}{W} \frac{S}{N_0} + 1$$

$$\frac{S}{N_0} \text{ необходимо перевести из dB так: } L = 10^{\text{dB}/10}$$

- Получив предельную спектральную эффективность, логарифмируя по основанию 2, предельная скорость определяется её умножением на отведённую полосу W

Решение задачи (окончание)

- Вычислять решение вышеприведённой системы можно также логарифмируя по основанию 10. В этом случае бюджет мощности переводить из dВ не потребуется

$$\frac{S}{N_0} = r_b \frac{E_b}{N_0} \quad \therefore \frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{r_b} \frac{S}{N_0}$$

$$r_b = \eta W \quad \therefore 10 \log_{10} \frac{E_b}{N_0} = 10 \log_{10} \frac{S}{N_0} - 10 \log_{10} \eta W$$

$$10 \log_{10} \frac{E_b}{N_0} = 92 - (10 \log_{10} \eta + 84.77) = 10 \log_{10} \frac{5.28}{\eta}$$

Информационная емкость дискретного сигнала. Предел Найквиста.

- Сообщение из n символов. Символ из алфавита в L знаков

$$P = 1/L^n, I = -\log_2 L^{-n}$$

$$I = n * \log_2 L$$

- $n = T/t_{\text{им}} = T(W/k)$ при $k = 1$, $n = TW$

$$I = T * W * \log_2 L$$

$$r_b = I/T = W * \log_2 L$$

Информационная емкость непрерывного сигнала. Предел Шеннона.

- Число степеней свободы, независимых отсчетов сигнала с полосой частот W (теорема Котельникова «об отсчетах»):

$$n = 2*W*T + 1 \text{ (в одном периоде } 2W + 1)$$

- Максимальное число уровней для AWGN канала:

$$L = ((P_S + P_N)/P_N)^{1/2}$$

- Информационная емкость:

$$I = 2*W*T*\log_2(((P_S + P_N)/P_N)^{1/2}) = \\ W*T*\log_2((1 + P_S/P_N))$$

- Предел скорость передачи (предел Шеннона)

$$r_b = I/T = W*\log_2(1 + P_S/P_N)$$