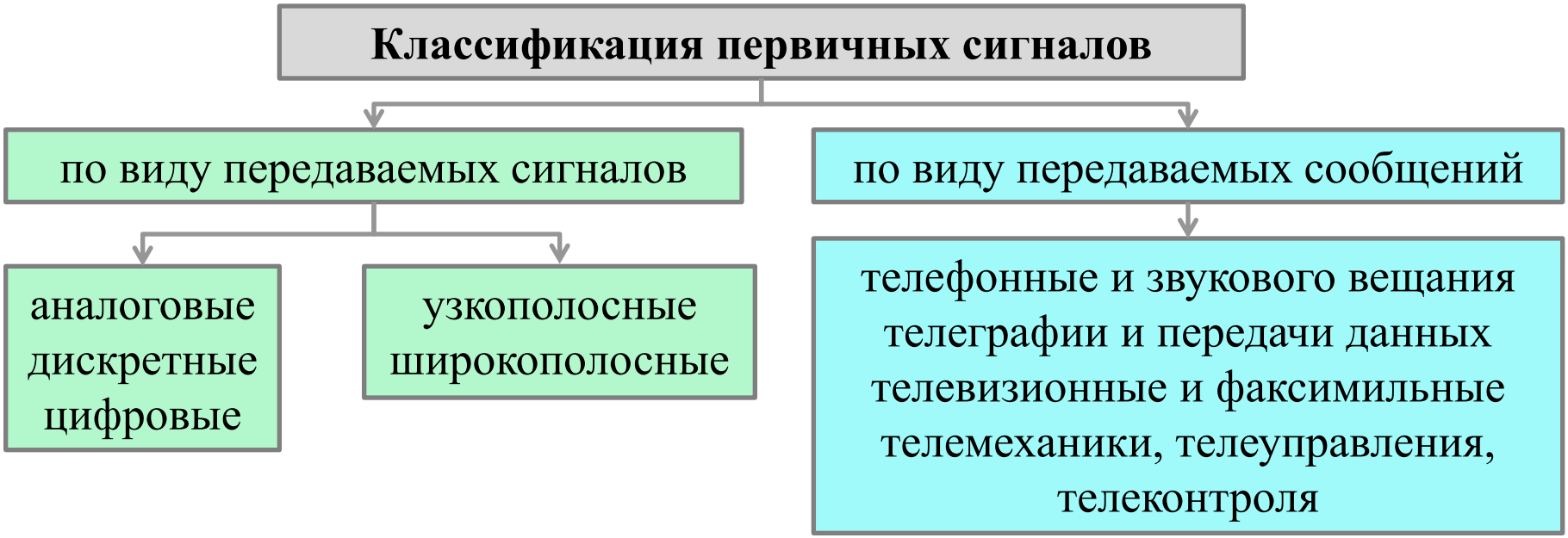
Лекция 2

Характеристики первичных сигналов электросвязи

Первичный сигнал электросвязи – это электрический сигнал, получаемый на выходе преобразователя сообщения.

Параметр первичного сигнала “x(t)”, изменение величины которого однозначно отображает передаваемое сообщение, называется **информационным параметром.** Таким параметром, например, может быть амплитуда, частота или фаза гармонического электрического сигнала; амплитуда, длительность или фаза импульсов периодической последовательности; структура и разрядность кодовых комбинаций и др.



Классификация первичных сигналов по виду передаваемых сигналов

Аналоговым (непрерывным) называется сигнал, величины *информационных параметров* которого *могут принимать непрерывное* множество состояний. Аналоговым сигналом может быть и импульсный сигнал, если один из его параметров (амплитуда, длительность, частота следования, фаза) принимает бесчисленное множество состояний.

Дискретным называется сигнал, у которого величина одного из *информационных параметров квантуется,* т.е. имеет *счетное* множество состояний.

Цифровым называется сигнал, у которого счетное множество величин одного *из информационных параметров* описывается *ограниченным набором кодовых комбинаций.* Примерами таких сигналов являются: сигналы передачи данных и телеграфии, сигналы телеконтроля и телеуправления, телемеханики и др.

Пусть F_{min} и F_{max} – минимальная и максимальная частоты эффективно передаваемой полосы частот первичного сигнала, тогда

узкополосным называется сигнал, у которого $\mathbf{F_{max}/ F_{min} \leq 2}$

широкополосным называется сигнал, у которого $\mathbf{F_{max}/ F_{min} > 2}$

Характеристики первичных сигналов

1. Мгновенная мощность, рассеиваемая на сопротивлении R:

$$p(t) = \frac{U^2(t)}{R} \quad \text{или} \quad p(t) = i^2(t)R$$

2. Нормированная мгновенная мощность: $p(t) = x^2(t)$, где x(t) – напряжение либо ток.

3. Рассеивание энергии в течение промежутка времени (-T/2, T/2):

$$E_x^T = \int_{-T/2}^{T/2} x^2(t)dt$$

4. Средняя мощность, рассеиваемая сигналом в течение промежутка времени (-T/2, T/2):

$$P_x^T = \frac{E_x^T}{T} = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} x^2(t)dt$$

5. Энергия сигнала:

$$E_x = \lim_{T\to\infty} P_x^T = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} x^2(t)dt, \quad 0 < E_x < \infty$$

Как правило, периодические и случайные сигналы выражаются через мощность, а детерминированные и непериодические сигналы – через энергию.

Мощность может рассматриваться

как функция времени

временная мощность
(мощность)

$$P_x^t = \frac{1}{T_0}\int_{-T_0/2}^{T_0/2} x^2(t)dt,$$

как функция частоты

частотная мощность
(спектральная мощность)

$$P_x^f = \frac{1}{F_0}\int_{-F_0/2}^{F_0/2} S^2(f)df,$$

Получить спектральное представление сигнала

Преобразование Фурье

Прямое ПФ

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t}\,dt$$

Обратное ПФ

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f)e^{i\omega f}\,df$$

Восстановить временное представление сигнала по его спектру

Теорема Парсеваля

Данная теорема определяет унитарность преобразования Фурье. **Формулировка:** сумма (или интеграл) квадрата функции равна сумме (или интегралу) квадрата результата преобразования.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \, dt = \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 \, df$$

Фактически, теорема Парсеваля устанавливает равенство между энергией сигнала и энергией его спектра.

Теорема Парсеваля для действительного периодического сигнала

$$P_x^t = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x^2(t)dt = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x^2(t) \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega t} \right] dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x^2(t) e^{in\omega t} dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |C_n|^2$$

где члены $|C_n|$ являются комплексными коэффициентами ряда Фурье для периодического сигнала.

$$P_x^f = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |C_n|^2 \quad \Rightarrow \quad P_x^t = P_x^f$$

Средняя мощность периодического сигнала на промежутке времени T_0 равна средней частотной мощности на частотном интервале F_0, где $F_0=1/T_0$.

Спектральная плотность мощности – это функция, описывающая распределение мощности сигнала в зависимости от частоты, то есть мощность, приходящаяся на единичный интервал частоты.

Спектр плотности мощности сигнала сохраняет информацию только об амплитудах спектральных составляющих. Информация о фазе теряется. Поэтому все сигналы с одинаковым спектром амплитуд и различными спектрами фаз имеют одинаковые спектры плотности мощности.

Спектральная плотность мощности периодического сигнала:

$$G_x(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |C_n|^2 \delta(f - nf_0)$$

f_0 – начальная фаза периодического сигнала

Средняя нормированная мощность действительного периодического сигнала и его спектральная плотность мощности взаимосвязаны:

$$G_x(f) = \frac{\partial P_x}{\partial f} \quad \Longleftrightarrow \quad P_x = \int_{-\infty}^{\infty} G_x(f)df = 2\int_{0}^{\infty} G_x(f)df$$

Спектральная плотность мощности непериодического сигнала x(t):

$$G(f) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} |x_T(f)|^2$$

Автокорреляционная функция

Автокорреляционная функция (АКФ) – зависимость взаимосвязи между функцией (сигналом) и ее сдвинутой копией от величины временного сдвига.

АКФ действительного энергетического сигнала:

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\,x(t-\tau)dt$$

АКФ действительного периодического сигнала:

$$R_x(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)\,x(t-\tau)dt$$

для сигнала с периодом T_0:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t)\,x(t-\tau)dt$$

для $-\infty < \tau < \infty$

Свойства АКФ

1. Симметрия относительно нуля

$$R_x(\tau) = R_x(-\tau)$$

2. Максимальное значение при $\tau = 0$, т.е.

$$R_x(\tau) \le R_x(0)$$

3. АКФ и спектральная плотность мощности являются Фурье-образами друг друга $R_x(\tau) \Leftrightarrow \Psi_x(f)$

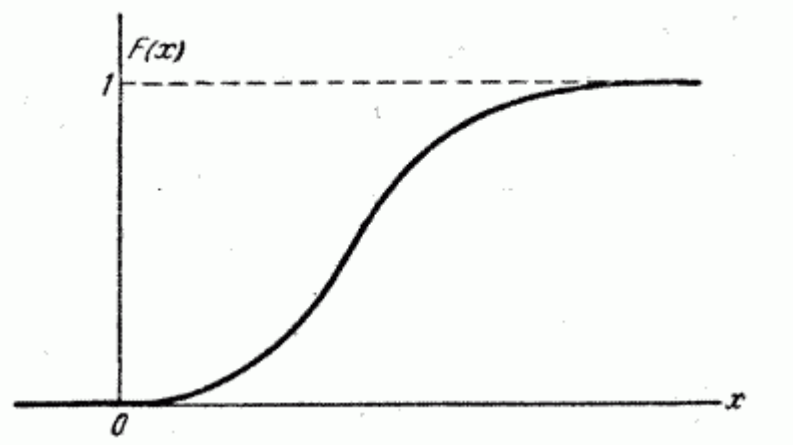
4. Значение в нуле равно энергии (для непериодического) либо мощности (для периодического) сигнала

$$R_x(0) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t)\,dt$$

Характеристики случайных сигналов

1. Функция распределения случайной величины: $F_x(x) = P(X \le x)$

$P(X \le x)$ – вероятность того, что значение случайной переменной X меньше величины x или равно ему.



Свойства функции распределения

$0 \le F_x(x) \le 1$

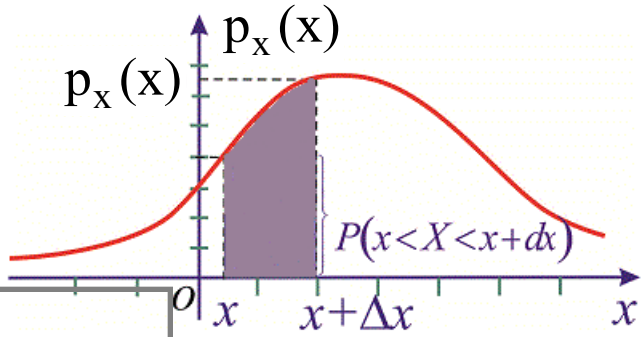
$F_x(x_1) \le F_x(x_2)$ если $x_1 \le x_2$

$F_x(-\infty) = 0$

$F_x(\infty) = 1$

2. Плотность вероятности случайной переменной X: $p_x(x) = \dfrac{dF_x(x)}{dx}$

Вероятность попадания случайной величины X с плотностью распределения $p_x(x)$ на элементарный участок dx равна $p_x(x)dx$.



Свойства плотности вероятности

$p_x(x) \ge 0$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_x(x)\,dx \ge 0$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} p_x(x)\,dx = F_x(\infty) - F_x(-\infty) = 1$$

Числовые характеристики случайных величин

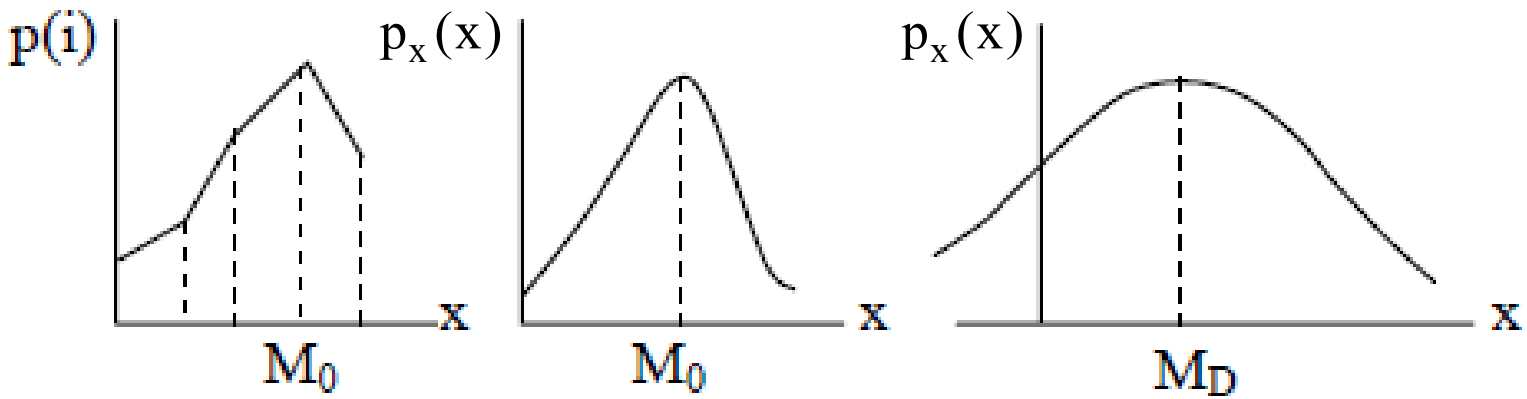
1. Среднее значение (математическое ожидание) случайной величины X :

$$m_x(x) = M\{x\} = \int_{-\infty}^{\infty} x p_x(x)\,dx$$

$M\{x\}$ – оператор математического ожидания

2. Мода (M_0) – наиболее вероятное значение случайной величины (т.е. такое, при котором ПРВ максимальна $p_x(M_0) = \max$).

3. Медиана (M_D) – значение случайной величины, относительно которого равновероятно получение большего или меньшего значения случайной величины, т.е. $P(x < M_D) = P(x > M_D)$



4. Момент n-того порядка распределения случайной величины X :

$$M\left\{x^n\right\} = \int_{-\infty}^{\infty} x^n p_x(x)\,dx$$

n=1 → математическое ожидание m_x

n=2 → среднеквадратическое значение

5. Центральный момент n-того порядка распределения случайной величины X :

$$M\left\{x^n - m_x\right\} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^n p_x(x)\,dx$$

n=2 → дисперсия

$$\sigma_x^2 = \mathrm{var}(X) = M\left\{x^2 - m_x\right\} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 p_x(x)\,dx$$

Дисперсия – мера разброса значений случайной величины. Величина дисперсии ограничивает ширину функции плотности вероятности.

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} = \sqrt{M\left\{x^2 - m_x\right\}}$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной величины

Физические характеристики первичных сигналов электросвязи

1. Средняя мощность: $P_{cp} = \frac{1}{TR}\int_0^T U^2(t)dt$ где T – период усреднения

2. Максимальная мощность – мощность эквивалентного синусоидального сигнала с амплитудой U_m, которая превышается мгновенными значениями переменной составляющей сигнала U(t) с определенной малой вероятностью ε.

3. Минимальная мощность – мощность эквивалентного синусоидального сигнала с амплитудой U_m, которая превышается мгновенными значениями переменной составляющей сигнала U(t) с определенной вероятностью, которая обычна равна 1- ε ≈ 0,98.

4. Динамический диапазон – возможный разброс мощностей первичного сигнала в конкретной точке канала:

$$D_c = 10\lg\frac{P_{max}}{P_{min}}$$

где P_{max} и P_{min} – максимальная и минимальная мощности соответственно.

5. Пик-фактор – превышение максимальной мощности сигнала над средней мощностью: $Q_c = 10\lg\left(P_{max}/P_{cp}\right)$

6. Защищенность – превышение средней мощности первичного сигнала $P_{ср}$ мощности помехи P_n: $A_c = 10\lg\left(P_{ср}/P_n\right)$

7. Эффективно передаваемая полоса частот (ЭППЧ) – диапазон частот, в пределах которого сосредоточена основная энергия сигнала (не менее 90 %):

$\Delta F_c = F_{max} - F_{min}$ где F_{max} и F_{min} – максимальная и минимальная частоты.

8. База первичного сигнала: $B_c = T_c \cdot \Delta F_c$

9. Объем первичного сигнала: $V_c = B_c \cdot D_c = T_c \cdot \Delta F_c \cdot D_c$

10. Потенциальный информационный объем первичного сигнала – количество информации, переносимое сигналом в единицу времени:

$$I_c = 3{,}32 \cdot \eta \cdot \Delta F_c \cdot \lg\left(1 + \frac{P_{ср}}{P_n}\right) \quad \text{бит/с}$$

η – коэффициент активности источника первичного сигнала (для телефонных сигналов берется равным 0,25...0,35, для остальных - 1)

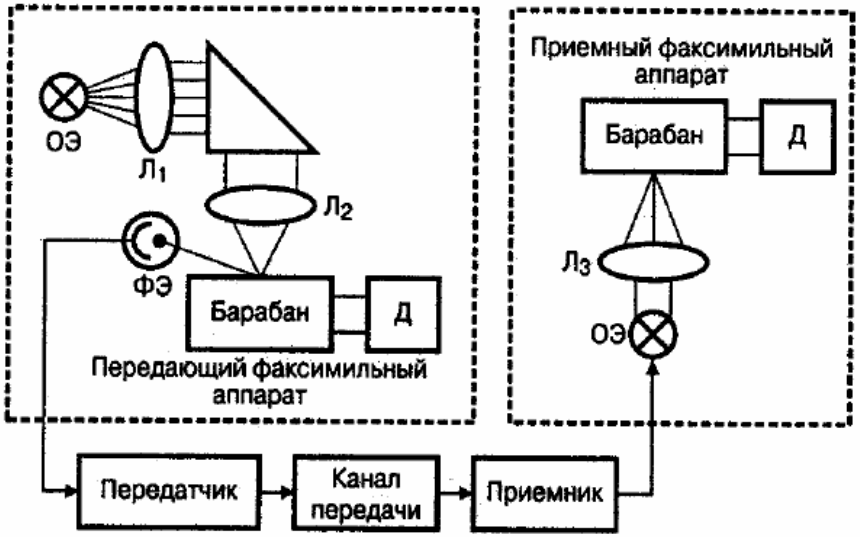
Телефонные (речевые) сигналы

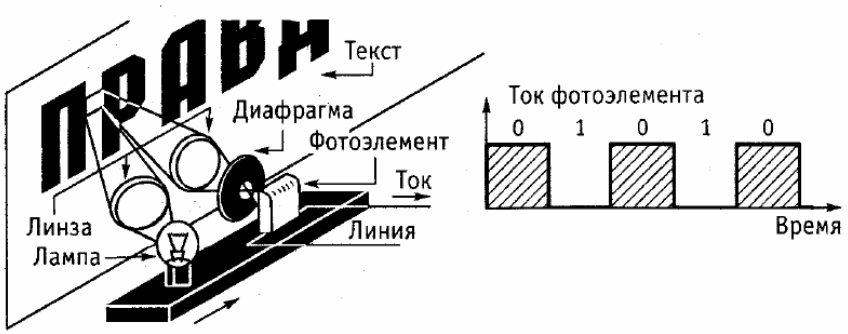
Параметр	Значение	Примечание
P_{min}, мкВтО	0,1	η=0,25...0,35
$P_{ср}$, мкВтО	88	
P_{max}, мкВтО	2220	
$D_т$, дБ	43	В практических расчетах принимают $D_т$ =40 дБ
$Q_т$, дБ	14	
$I_т$, бит/с	10000	η=0,33, ΔFт=3100 Гц, $P_{ср}$=88 мкВтО, P_n=0,1 мкВтО

Сигналы звукового вещания

Параметр	Значение	Примечание
ΔF, Гц	15...20000	15 Гц – звук барабана
$\Delta F_{зв}$, Гц	30...15000	
$P_{ср}$, мкВтО	923, 2230, 4500	$T_{ср}$=1ч, $T_{ср}$=1мин, $T_{ср}$=1с
$D_т$, дБ	25...35, 40...50, 45...55, 60...65	Речь диктора, художественное чтение, вокальные и инструментальные ансамбли, симфонический оркестр
$I_т$, кбит/с	140...200	

Факсимильные сигналы





Преобразование изображения в электрический сигнал в факсимильном аппарате

1. Частота факсимильного сигнала:

$$F_ф = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{120 \cdot d} \text{ (Гц)}$$

D – диаметр барабана, мм; N – скорость вращения барабана, об/мин; d – диаметр светового анализирующего пятна, мм

2. Динамический диапазон факсимильных сигналов: $D_ф = 20\lg(k+1)$

3. Пик-фактор: $Q_ф = 10\lg(P_{max}/P_{ср}) = 20\lg(U_{макс.ф}/U_{ср.ф})$

При равновероятном появлении i-той градации яркости (p=1/k, где k – число градаций яркости, обеспечивающих заданное качество передачи)

$$U^2_{ср.ф} = \sum_1^k U_i^2 p_i = \frac{U^2_{макс.ф.}}{k^3} \sum_1^k i^2$$

$$\sum_{1}^{k} i^2 = \frac{k(k+1)(2k+1)}{6} \Rightarrow U_{ср.ф} = \frac{U_{макс.ф.}}{k}\sqrt{\frac{k(k+1)(2k+1)}{6}}$$ тогда

$$Q_ф = 7,78 + 20\lg k - 10\lg\left[(k+1)(2k+1)\right]$$

4. Потенциальная информационная емкость факсимильных сигналов:

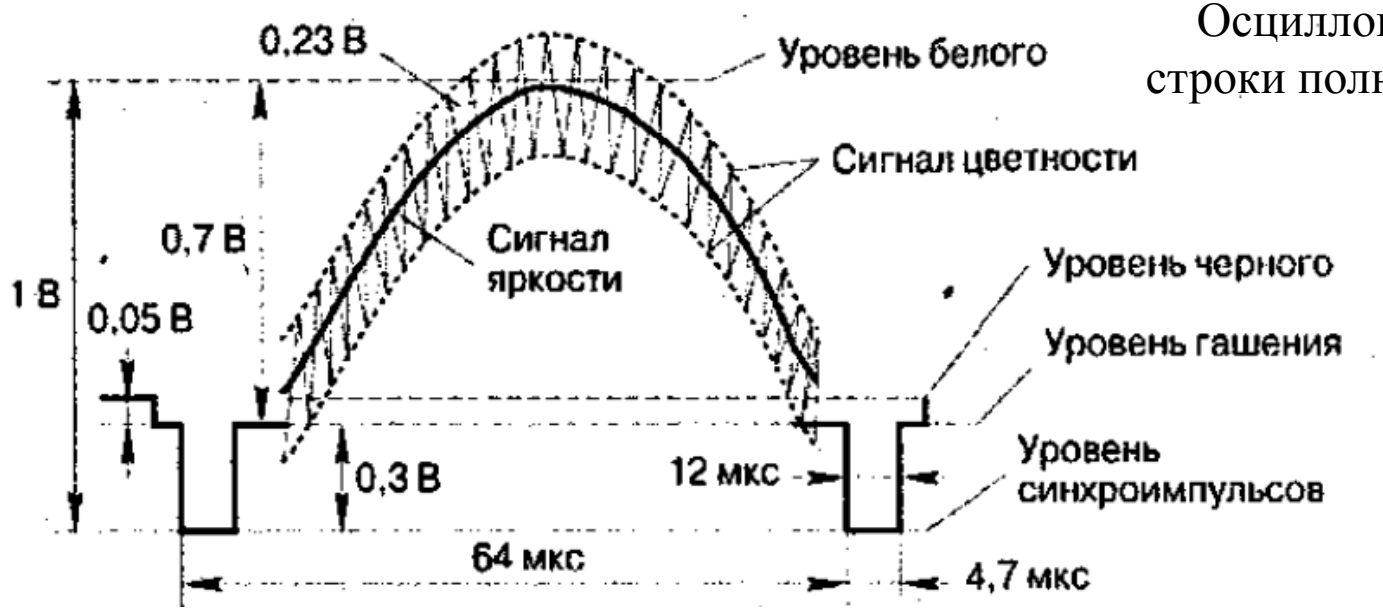
$$I_ф = 6,64 \cdot F_ф \cdot \lg k$$

Некоторые параметры реальных факсимильных сигналов

Параметр	Значение	Примечание	
ΔF, Гц	732 1100 1465	N=60 об/мин N=90 об/мин N=120 об/мин	D=70 мм, d=0,15 мм
$D_ф$, дБ	25 10	При передаче полутоновых изображений При передаче газет (k=2)	
$Q_ф$, дБ	4,8	k—>∞	
$A_{зф}$, дБ	35		
$I_ф$, бит/с	2928 $360*10^3$	При ΔF=1465 Гц и k=2 При передаче газет: d=0,04…0,06 мм=>ΔF=180 кГц	

Телевизионный сигнал — совокупность электрических сигналов, содержащая информацию о телевизионном (ТВ) изображении и звуке. Термин употребляется в большинстве случаев применительно к аналоговому ТВ, потому что цифровое ТВ оперирует таким понятием, как поток данных.

Полный ТВ сигнал цветного аналогового ТВ представляет собой совокупность трёх сигналов: ***видеосигнала***, несущего информацию о яркости изображении, ***цветной поднесущей*** с закодированной информацией о цвете изображения, и ***звукового сигнала***. Каждый из перечисленных сигналов для передачи на расстояние использует свою несущую частоту, которая определяется конкретным стандартом телевизионного вещания и номером используемого канала.



Осциллограмма одной строки полного ТВ сигнала

1. Время передачи одного элемента изображения:

$$\tau_{ТВ} = \frac{1}{25M} = \frac{3}{4 \cdot 625^2 \cdot 25} = 0,083 \text{ мкс}$$

2. Максимальная частота спектра: $F_{max} = 1/2\tau_{ТВ} = 1/(2 \cdot 0,083 \cdot 10^6) = 6 \text{ МГц}$

3. Динамический диапазон видеосигнала: $D_ф = 20\lg(k+1)$

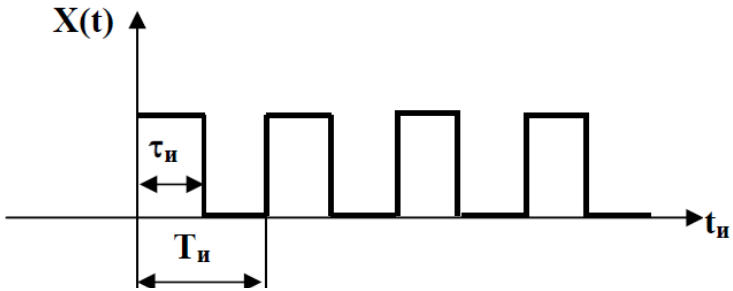
4. Пик-фактор ТВ сигнала: $Q_ф = 7,78 + 20\lg k - 10\lg\left[(k+1)(2k+1)\right]$

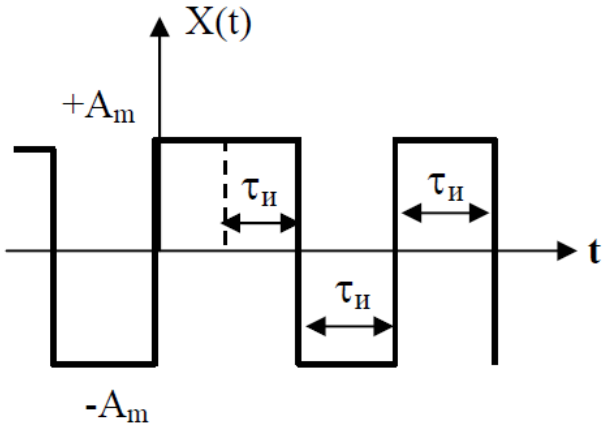
5. Потенциальный информационный объем ТВ сигнала:

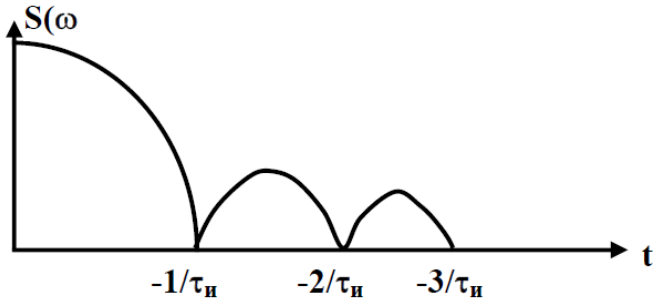
$$I_ф = 6,64 \cdot F_ф \cdot \lg k = 6,64 \cdot 6 \cdot 10^6 \cdot \lg 100 = 7,968 \cdot 10^6 \text{ бит/с} \approx 80 \text{ Мбит/с}$$

Параметры реальных аналоговых ТВ сигналов

Параметр	Значение	Примечание
ΔF, Гц	$50 \ldots 6*10^6$	50 Гц – частота смены полукадров
$D_{ТВ}$, дБ	40	При k=100
$Q_{ТВ}$, дБ	$\leq 4,8$	
$A_{ТВ}$, дБ	48	
$I_{ТВ}$, Мбит/с	80	







1. Скорость телеграфирования (тактовая частота): $R = 1/\tau_и$ (бод)

2. Динамический диапазон не определяется (для двоичных сигналов не имеет смысла):

3. Информационная емкость равна скорости передачи: $I_{тлг} = F_т$

4. Спектральная плотность амплитуд :

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt = A\tau \frac{\sin(\omega\tau/2)}{(\omega\tau/2)} = A\tau \operatorname{sinc}(\omega\tau/2)$$

$$S(t) = \frac{A_m}{q_u} + \frac{2A_m}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(kl)}{q_u} \cos(2\pi k F_u)$$

Постоянная составляющая: $A_0 = \frac{A_m}{q_u} = A_m \frac{\tau_u}{T_u}$

5. Вероятность неправильно принятого символа «0» или «1» (вероятность ошибки) должна быть не хуже 10^{-5}.

6. Необходимая **защищенность** от помех должна быть не хуже 12 дБ.

Полосы частот различных первичных сигналов

Вид сигнала	Занимаемая полоса частот, Гц
Телеграфный	0…100
Передача данных*	0…Рт, где Рт – тактовая частота следования импульсов
Телефонный	300…3400
Звукового вещания	50…10000
Факсимильный: при N=120 об/мин, D=70 мм, d_n=0,15 мм; при передаче газет	 0…1465 0…180000
Телевизионный	50…6000000

*Сигналы телемеханики, телеуправления и телеконтроля являются частными случаями сигналов передачи данных.