



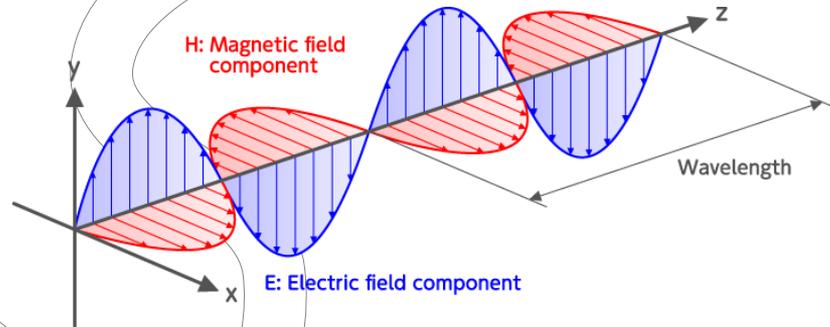
Физические основы компьютерных и сетевых технологий

Семестр 2. Колебания и волны



Музыченко Я.Б.
muzychenko@itmo.ru
2024

Лекция 9. Элементы акустики. Электромагнитные волны. Модуляция



- Звуковые волны. Элементы акустики;
- Ультразвук.
- Электромагнитные волны. Шкала электромагнитных волн.
- Волновое уравнение для электромагнитных волн.
- Модуляция сигнала.

Как распространяется звук в веществе?

Какой энергией обладают ЭМ волны?

Как передать информацию на расстояние ?

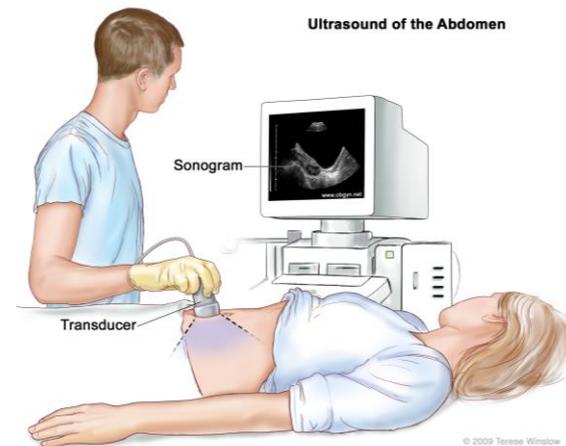
Как и почему именно так звучат музыкальные инструменты?

Звуковые волны.

Распространение продольных волн в упругой среде.

Характеристики звуковой волны: громкость, тональность, тембр.

<https://www.youtube.com/watch?v=HHnSZaPcfdo>



Звуковые волны:

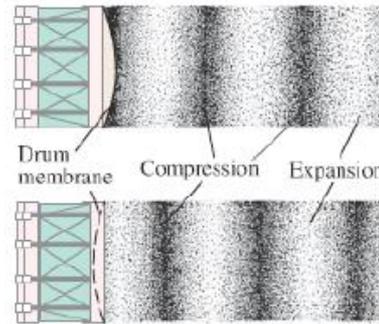
Звуковые волны – механические волны, распространяющиеся в упругой среде с частотой в пределах от 20 до 20000 Гц. В воздухе такие волны, достигнув уха, вызывают ощущения звука.

Инфразвук – частота менее 20 Гц.

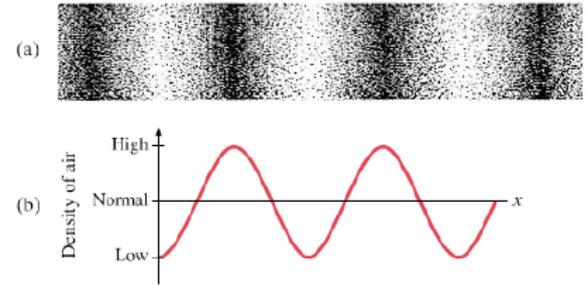
Ультразвук – частота более 20 000 Гц.

Звуковые волны в газах и жидкостях – продольные, состоят из чередующихся разрежений и сжатий среды.

В твердых телах могут распространяться как продольные, так и поперечные волны (детектирование продольных волн при землетрясениях свидетельствует о жидком состоянии ядра).



Продольные волны в моменты времени $t=0$ и $t=T/4$.



Зависимость плотности воздуха от координаты (очень похоже на распространение поперечной волны)

Характеристики звуковых волн:

Любой звук, воспринимаемый человеческим ухом, отличается по **высоте, тембру и громкости**.

Каждой из этих субъективных характеристик соответствует **физическая величина**.

Звук распространяется с конечной скоростью в газе, которая зависит от свойств газа и температуры окружающей среды.

У звука нет **дисперсии** – зависимости скорости от частоты)

TABLE 12–1 Speed of Sound in Various Materials (20°C and 1 atm)

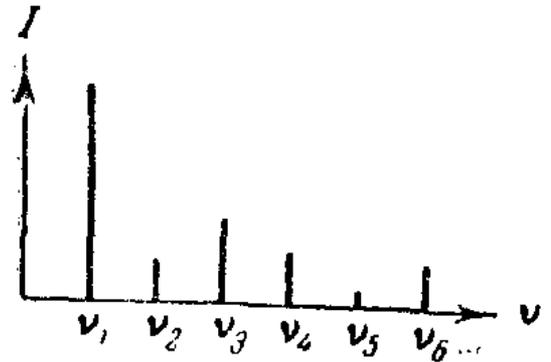
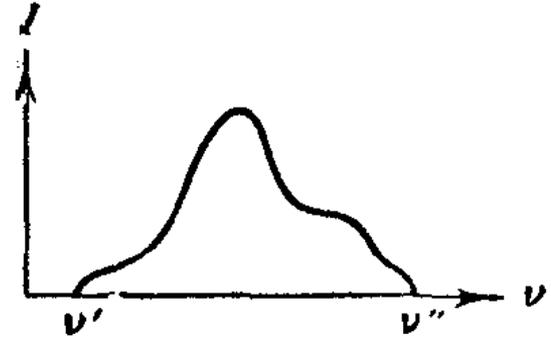
Material	Speed (m/s)
Air	343
Air (0°C)	331
Helium	1005
Hydrogen	1300
Water	1440
Sea water	1560
Iron and steel	≈ 5000
Glass	≈ 4500
Aluminum	≈ 5100
Hardwood	≈ 4000
Concrete	≈ 3000

Любой звук – суперпозиция гармонических колебаний с определенным набором частот – акустическим спектром.

Сплошной спектр – в звуке присутствуют колебания всех частот из некоторого спектра (шумы).

Линейчатый спектр – колебания дискретных частот (тональные звуки). Наименьшая частота называется основной. Она определяет **высоту звука**.

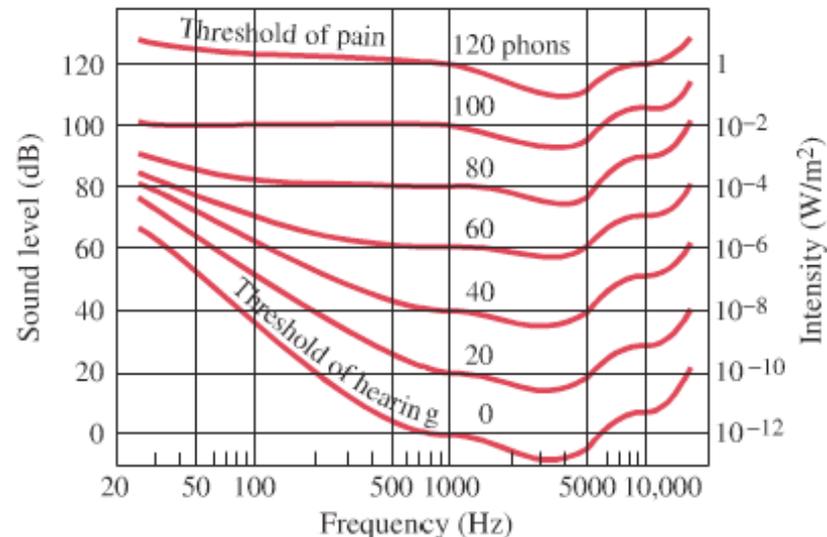
Тембр зависит от того, есть в спектре обертоны или нет.



Громкость звука определяется интенсивностью (физической величиной, пропорциональной амплитуде волны, подробнее – в оптике).

Для вызывания звукового ощущения интенсивность должна быть больше **порога слышимости**. Порог сильно зависит от частоты звука. Наиболее чувствительно ухо к частотам 1000-4000 Гц.

Порог болевого ощущения – значение интенсивности, выше которого звука нет, только боль(.



Громкость звука нарастает гораздо медленнее, чем интенсивность. Уровень громкости определяется как логарифм отношения интенсивности данного звука к так называемой исходной интенсивности (порог слышимости для нормального уха - 10^{-12}).

$$L = \lg \frac{I}{I_0}$$

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}$$

Затухание волны может быть выражено через дБ. Например, если интенсивность волны уменьшается в 100 раз, то это соответствует 20 дБ.

Характеристика звука	Уровень громкости, дБ	Интенсивность $\text{эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$
Тикание часов	20	10^{-7}
Шепот на расстоянии 1 м	30	10^{-6}
Тихий разговор	40	10^{-5}
Речь средней громкости	60	10^{-3}
Громкая речь	70	10^{-2}
Крик	80	10^{-1}
Шум самолетного мотора:		
на расстоянии 5 м	120	10^3
на расстоянии 3 м	130	10^4

TABLE 12-2 Intensity of Various Sounds

Source of the Sound	Sound Level (dB)	Intensity (W/m^2)
Jet plane at 30 m	140	100
Threshold of pain	120	1
Loud rock concert	120	1
Siren at 30 m	100	1×10^{-2}
Auto interior, at 90 km/h	75	3×10^{-5}
Busy street traffic	70	1×10^{-5}
Talk, at 50 cm	65	3×10^{-6}
Quiet radio	40	1×10^{-8}
Whisper	20	1×10^{-10}
Rustle of leaves	10	1×10^{-11}
Threshold of hearing	0	1×10^{-12}



Длина волны звуковых волн – 15мм - 15 м. Сложно сделать излучатель направленной волны (плоской волны).

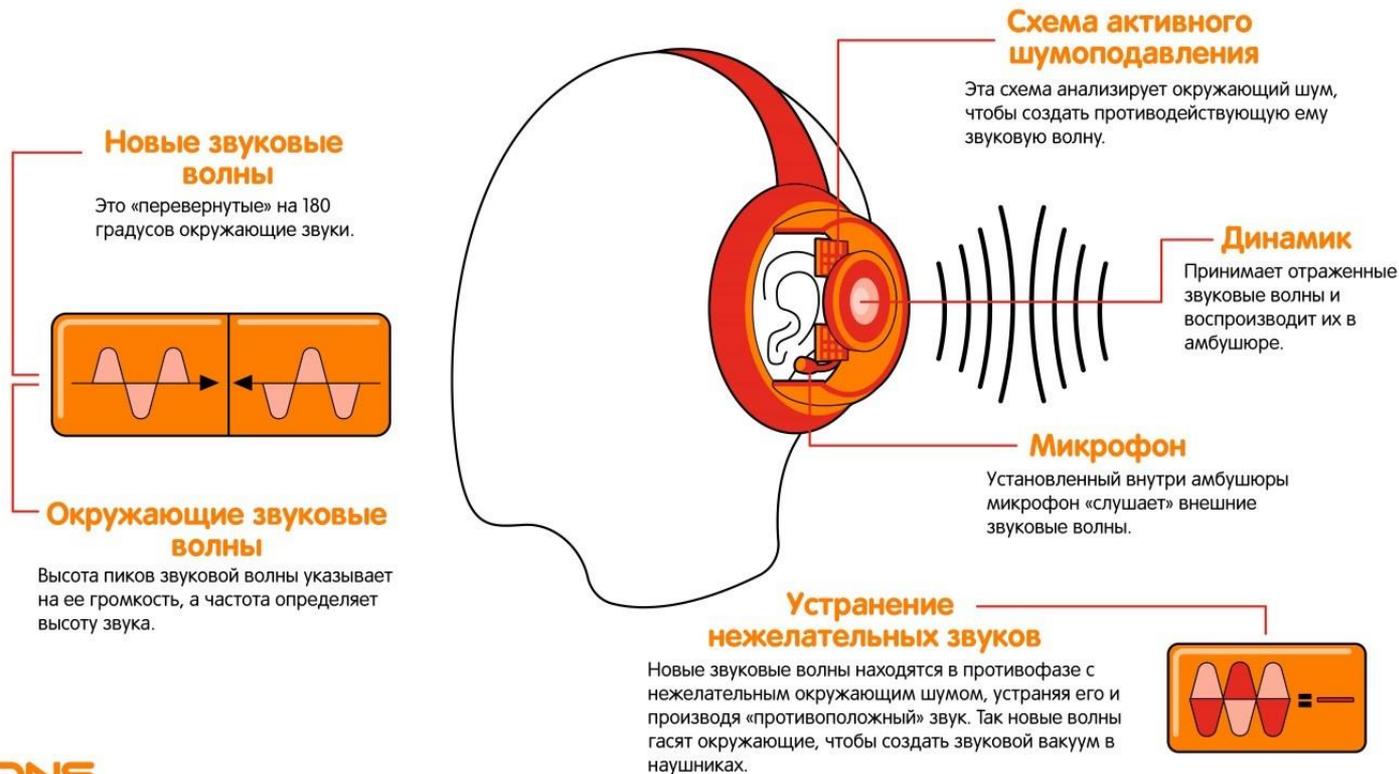
Длина волны ультразвука – менее 15 мм.

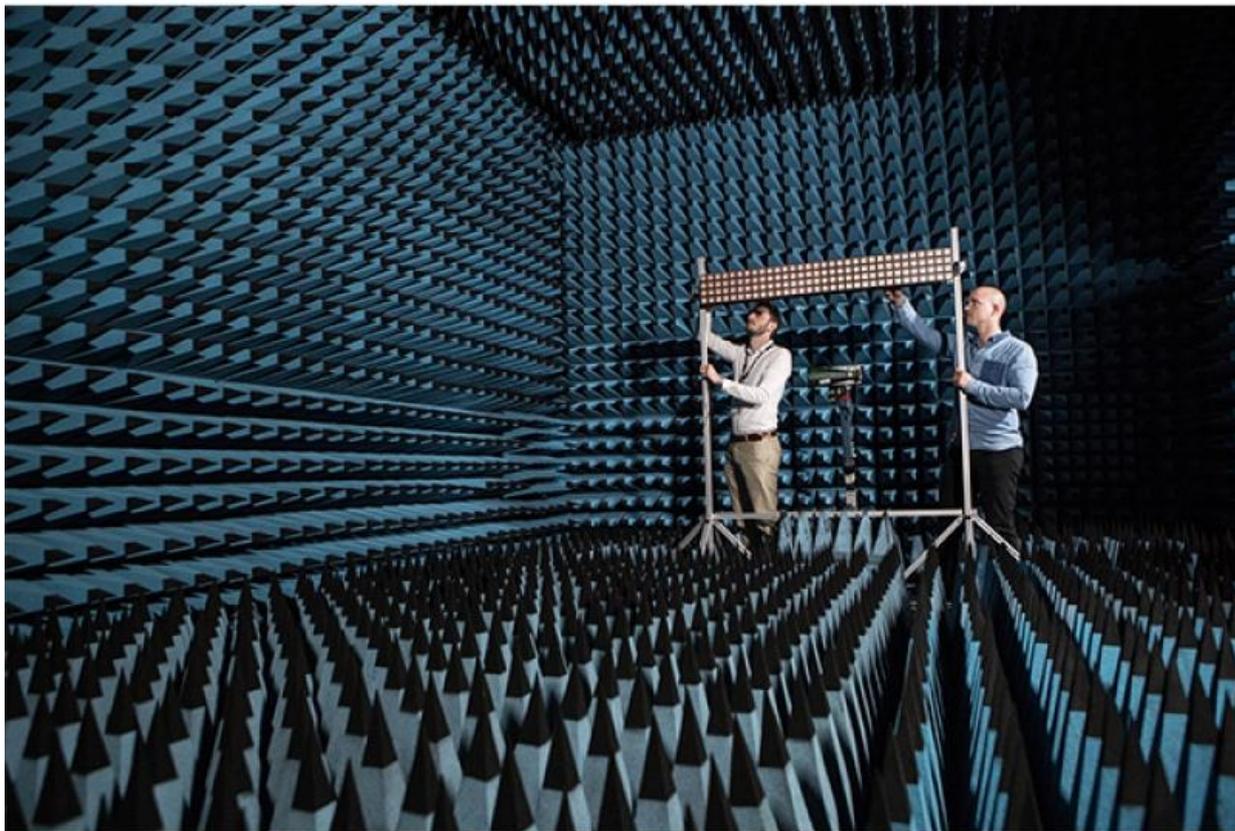
Применение ультразвука: эхолокация (в т.ч. в природе), диагностика, дефектоскопия и т.д.

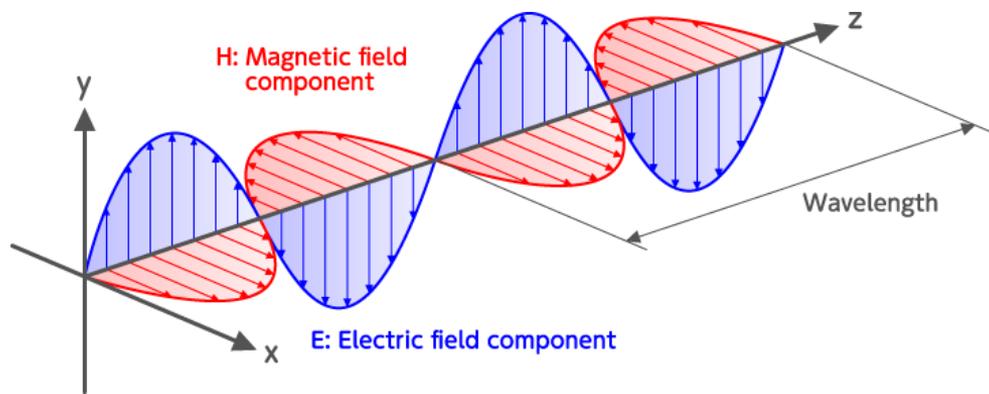
Принцип действия: излучение ультразвуковых импульсов – отражение от преграды – по времени распространения определяются параметры преграды.

Генерация ультразвука: пьезоэлектрики, магнитострикция.









Уравнения Максвелла

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \int_s \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\oint_s \vec{B} d\vec{S} = 0$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\oint_s \vec{D} d\vec{S} = \int_v \rho dV$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

Граничные условия

$$E_{1\tau} = E_{2\tau} \quad H_{1\tau} = H_{2\tau}$$

$$D_{1n} = D_{2n} \quad B_{1n} = B_{2n}$$

В предыдущих сериях:

Материальные уравнения

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Параметр	Тип среды
$\sigma = 0$	диэлектрическая
$\sigma \neq 0$	проводящая
$\varepsilon = \text{const}$	однородная, изотропная
$\varepsilon = \varepsilon(x, y, z)$	неоднородная
$\varepsilon = \varepsilon(\varphi)$	анизотропная
$\varepsilon = \varepsilon(E)$	нелинейная



Скорость электромагнитных волн:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu\mu_0 \varepsilon\varepsilon_0} \Delta \vec{E}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = v^2 \Delta \vec{E}$$

Скорость электромагнитных волн

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\mu_0 \varepsilon\varepsilon_0}}$$

Для вакуума ($\varepsilon = 1, \mu = 1$)

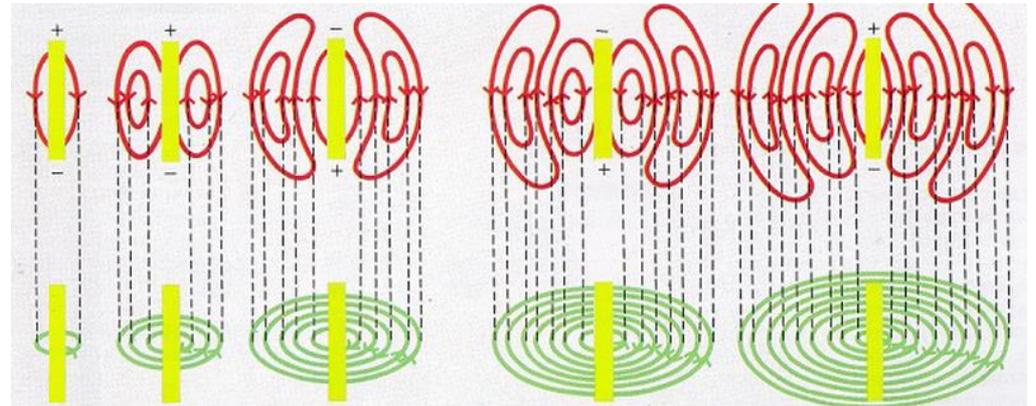
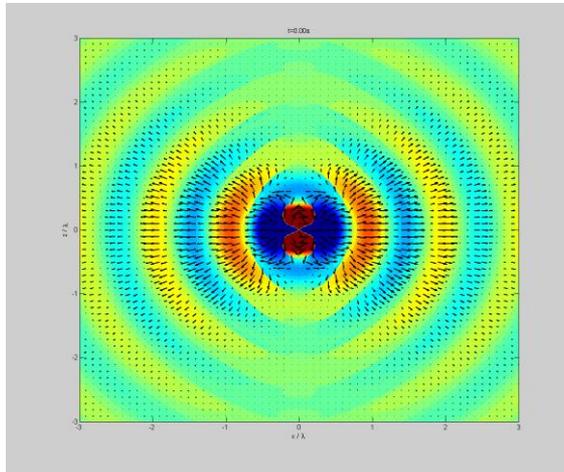
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 299792456 \text{ м/с}$$

Показатель преломления среды

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu\varepsilon}$$

Колебание диполя: распространение эм волн

Рассмотрим **колебание заряда (диполя)**. Периодические превращение электрического и магнитного полей – процесс периодический и в пространстве и во времени – распространение эм волны.



Рассмотрим плоскую волну

Спроецируем уравнение на оси: $rot\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} &= -\frac{\partial B_x}{\partial t}, \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -\frac{\partial B_y}{\partial t}, \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} &= -\frac{\partial B_z}{\partial t}, \end{aligned} \right\}$$

Для волны, распространяющейся вдоль x
(не зависит от y и z):

Спроецируем уравнение на оси: $rot\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} &= j_x + \frac{\partial D_x}{\partial t}, \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} &= j_y + \frac{\partial D_y}{\partial t}, \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= j_z + \frac{\partial D_z}{\partial t}. \end{aligned} \right\}$$

$$div\vec{B} = 0 \quad div\vec{D} = \rho$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = \rho.$$

Рассмотрим плоскую волну

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} &= \mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}, \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} &= -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}, \\ \frac{\partial E_x}{\partial t} &= 0, \\ \frac{\partial H_z}{\partial x} &= -\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}, \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} &= \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}. \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_x}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial E_x}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

1. E_x и H_x не зависят от t и x . Поле не имеет составляющих вдоль оси x , следовательно электромагнитные волны – **поперечны!**
 $E_x=H_x=0$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_y}{\partial x} &= -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}, \\ \frac{\partial H_z}{\partial x} &= -\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}, \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} &= \mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}, \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} &= \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}. \end{aligned} \right\}$$

Рассмотрим плоскую волну

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_y}{\partial x} &= -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}, \\ \frac{\partial H_z}{\partial x} &= -\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}, \end{aligned} \right\} \underline{E_z=H_y=0}$$

Продифференцируем по x:

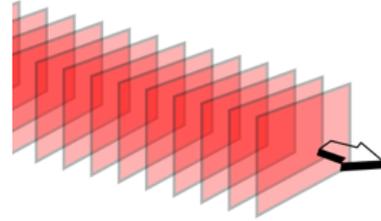
$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu\mu_0\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \mu\mu_0\epsilon\epsilon_0 \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}$$

Решение волнового уравнения

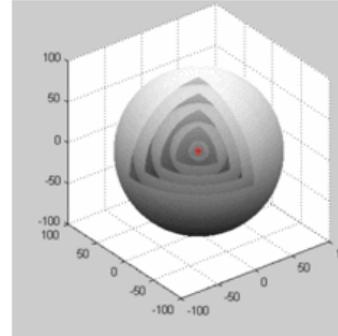
При распространении волны вдоль координаты x :

$$\vec{E}(x) = \vec{E}_0(x) \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$



Сферическая волна:

$$\vec{E}(r) = \frac{\vec{E}_0}{r} \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi_0)$$



Плоская волна:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k}\vec{r})$$

В комплексном виде:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})}$$

Свойства электромагнитных волн

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$-i\vec{k} \times \vec{E} = -\mu\mu_0 i\omega \vec{H}$$

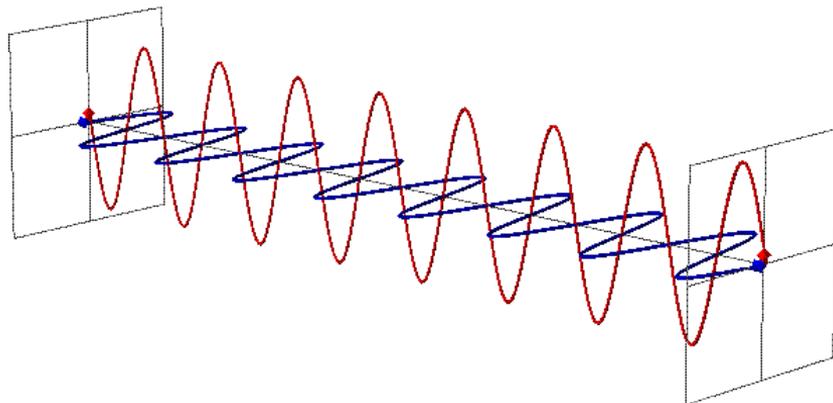
$$-i\vec{k} \times \vec{H} = \varepsilon\varepsilon_0 i\omega \vec{E}$$

$$E_0 = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} H_0$$

1. Поперечность эм волн

Вектора E , H и k образуют правую тройку векторов

2. Синфазность колебаний. Взаимосвязь E и H .



Энергия электромагнитных волн

Вектор Пойнтинга

Плотность потока энергии – количество энергии, переносимой волной через поверхность в единицу времени:

$$S = \omega v$$

Объемная плотность энергии эл поля

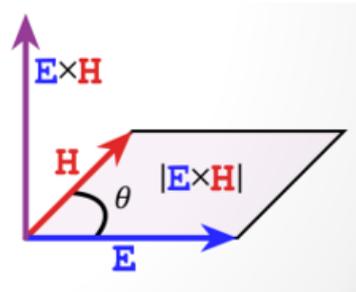
$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

Учитывая взаимосвязь между E и H:

$$\omega = \frac{EH}{v}$$

Учитывая взаимосвязь между E и H:

$$\vec{S} = [\vec{E}\vec{H}]$$



Интенсивность электромагнитных волн

Частота световых колебаний чрезвычайно высока (10^{15} Гц), любой реальный прибор регистрирует усредненное значение потока.

Интенсивность волны – среднее значение потока световой энергии:

$$I = \langle S \rangle$$

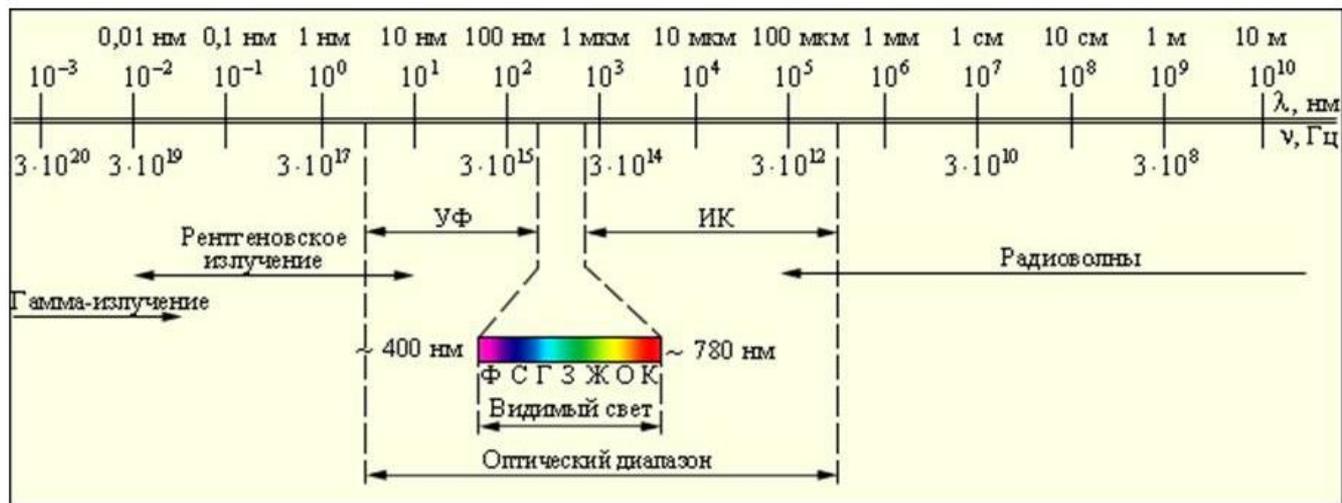
$$\begin{aligned} S &= E_0 \cos(\omega t - kr) H_0 \cos(\omega t - kr) = \\ &= \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}} E_0^2 \cos^2(\omega t - kr) \end{aligned}$$

С учетом того, что среднее значение квадрата косинуса по времени равно $\frac{1}{2}$, то

$$I = \langle S \rangle = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}} \frac{E_0^2}{2}$$

Шкала электромагнитных волн

ИТМО



Беспроводная связь

1873 – термин «радио», У. Крукс;

Первый патент на беспроводную передачу электрического сигнала получил в 1872 году американский исследователь, стоматолог по профессии [Малон Лумис](#), заявивший в 1866 году об изобретении способа беспроводной связи. В США изобретателем беспроводной связи считают [Дэвида Хьюза](#) (1878), а также [Томаса Эдисона](#) (1876) и [Никола Теслу](#) (патент на передающее устройство с резонанс-трансформатором в 1891 году^[6]); в Германии — [Генриха Герца](#) (1888); во Франции — [Эдуарда Бранли](#) (1890); в ряде балканских стран — [Никола Теслу](#) (1891); в Бразилии — [Ландела де Муру^{en}](#) (1893—1894); в Великобритании — [Оливера Джозефа Лоджа](#) (1894); в Индии — [Джагадиша Чандру Боше](#) (1894—1895); в России — [А. С. Попова](#) (1895) и [Якова Наркевича-Иодко](#) (1890).

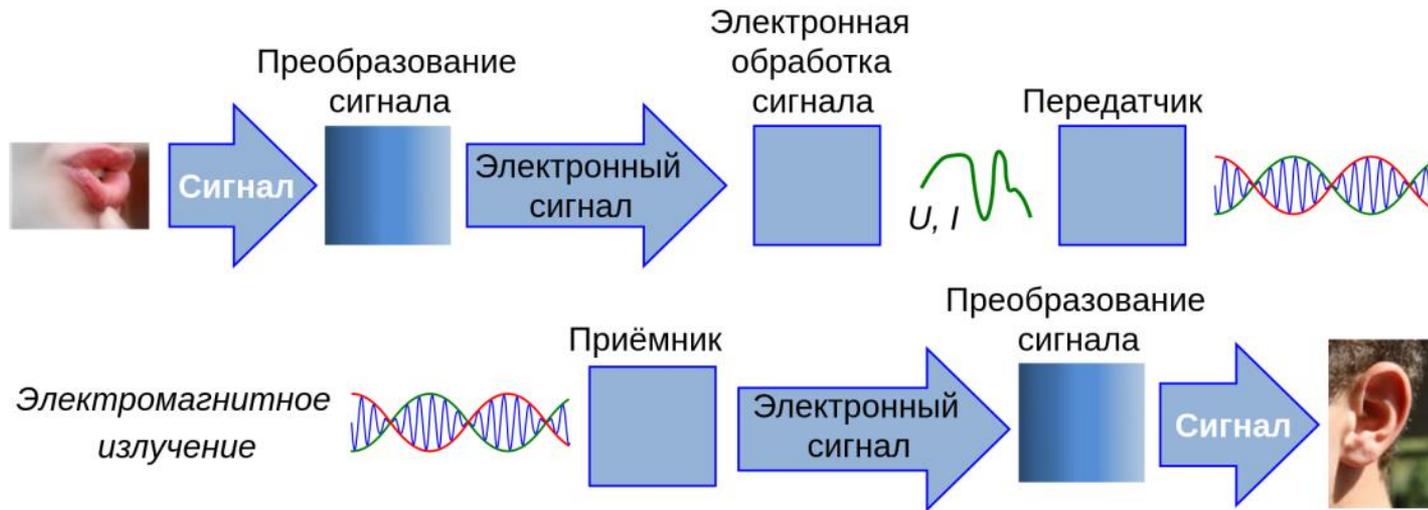


Приемник Маркони



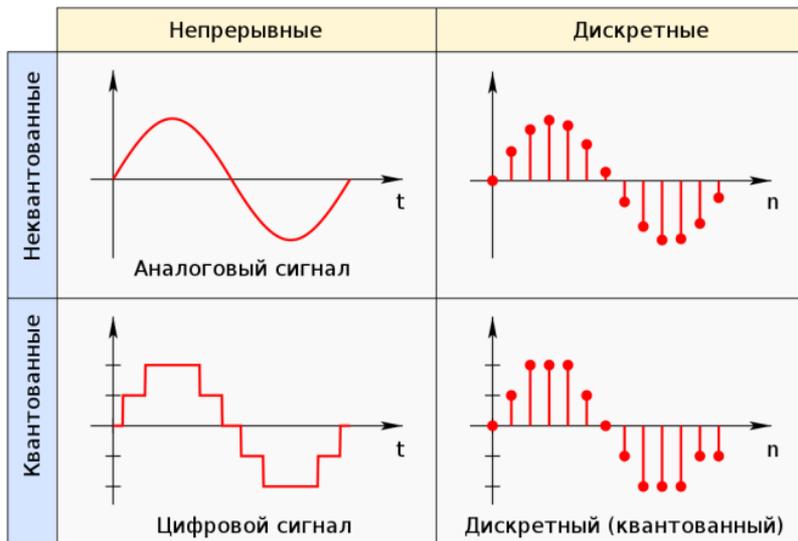
Приемник А.С. Попова





Сигнал – изменение физической величины, несущее информацию, кодированную определенным способом.

Аналоговые и цифровые сигналы:



Гармоническое колебание – аналоговый сигнал

Модуляция сигнала



Основная задача передачи информации – передать сигнал без потерь и искажений по выбранной линии связи. Необходимо согласование линии связи с первичным электрическим сигналом.

Для согласования используется канал как комплекс аппаратных средств, преобразующих сигнал к виду, возможному для передачи по физической линии связи. Для этого используется модуляция.

Модуляция – это процесс преобразования одного или нескольких информационных параметров несущего сигнала в соответствии с мгновенными значениями информационного сигнала. Позволяет перенести сигнал в заданную область частот.

Как передается информация?



Канал связи – физическая среда распространения сигнала. В т.ч. электрические сигналы: переменный электрический ток, переменное магнитное и электрическое поле. Это гармонические колебания!

Информационный сигнал – модулирующий сигнал

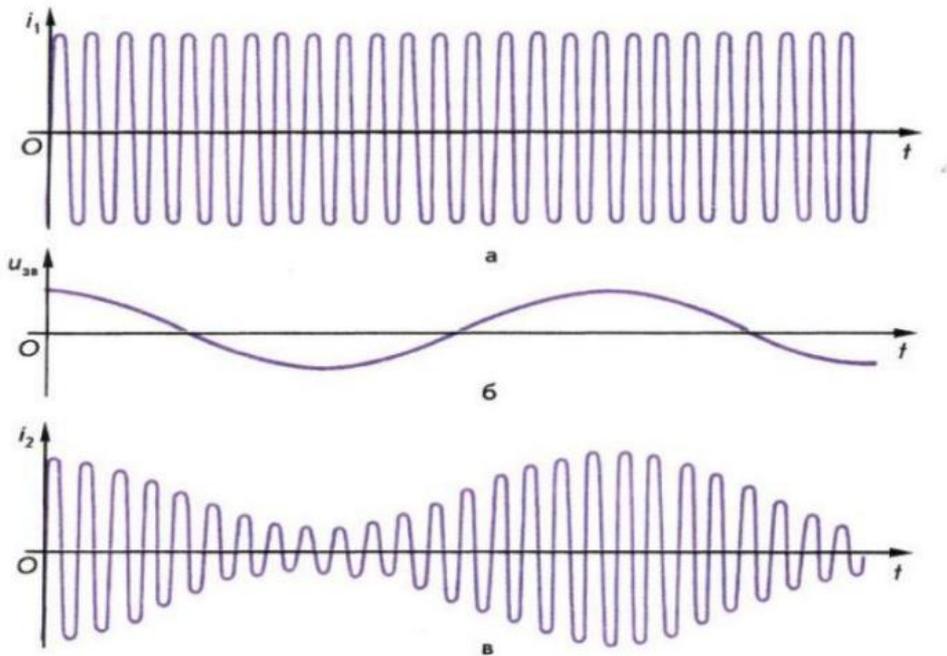
Несущий сигнал – дополнительный стационарный сигнал переносчик, определяется физической средой связи

Аналоговая модуляция использует в качестве несущего сигнала гармоническое колебание.

Амплитудная модуляция (АМ)

- меняется амплитуда импульсов
- с увеличением амплитуды несущего сигнала меняется амплитуда модулирующего

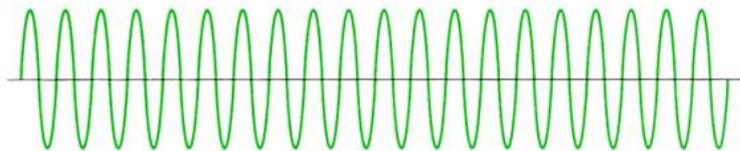
Амплитудная



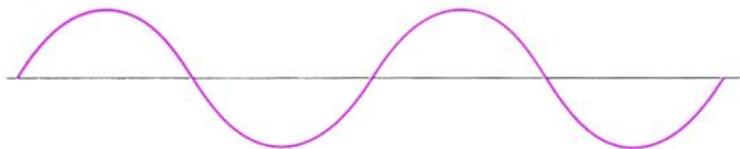
Частотная модуляция (FM)

- меняется частота импульсов;
- с увеличением амплитуды модулирующего сигнала увеличивается частота несущего колебания.

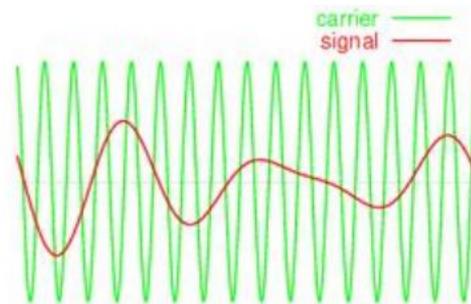
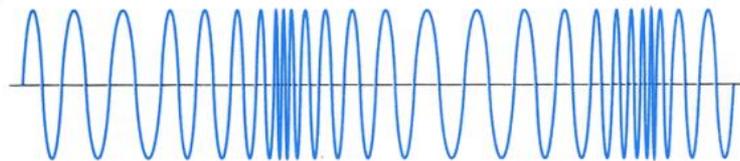
Несущая частота



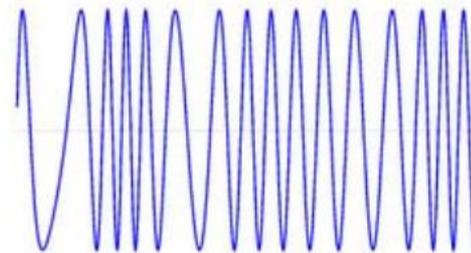
Сигнал



Частотная модуляция

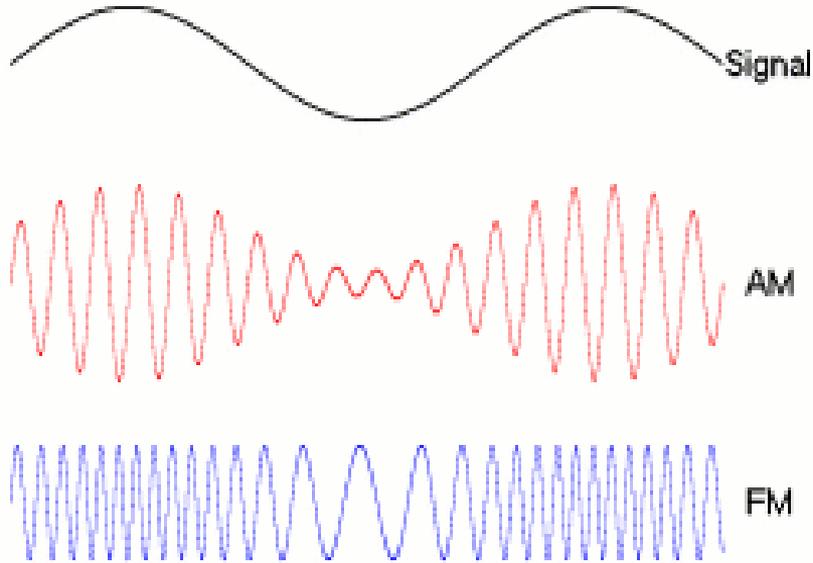


output



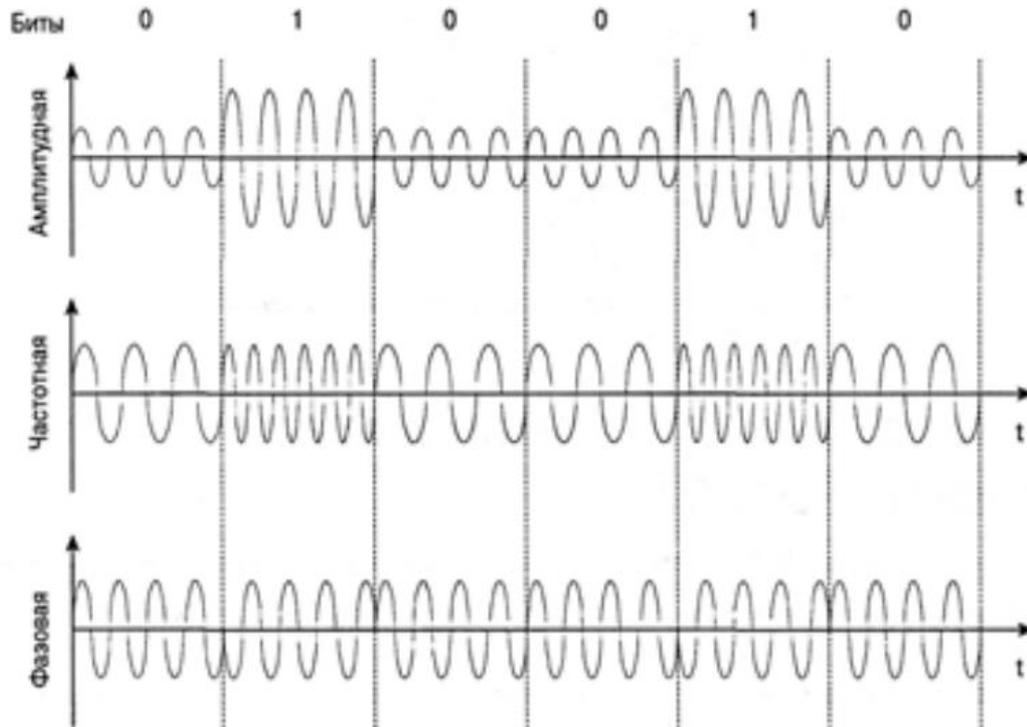
- FM диапазон, SECAM,

AM vs FM



Цифровая модуляция

Преобразование битов в аналоговые сигналы



Тригонометрические формы ряда Фурье

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi}{T} kt + b_k \sin \frac{2\pi}{T} kt \right)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \left(\frac{2\pi}{T} kt \right) dt, \quad k = \overline{0, \infty}$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin \left(\frac{2\pi}{T} kt \right) dt, \quad k = \overline{1, \infty}$$

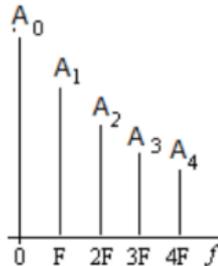
Тригонометрические формы ряда Фурье

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cos\left(\frac{2\pi}{T} kt + \varphi_k\right), \quad \omega_1 = \frac{2\pi}{T} \quad F_1 = \frac{1}{T}$$

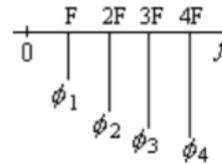
частота 1-й гармоники

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad A_0 = \frac{a_0}{2} \quad \varphi_k = -\operatorname{arctg} \frac{b_k}{a_k}$$

амплитудный спектр



фазовый спектр



Спектр периодического сигнала - дискретный

Примеры разложения сигналов в ряд Фурье

1. Сигнал в форме меандра:

$$s(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \left(\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) - \frac{1}{3} \cos\left(3\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{1}{5} \cos\left(5\frac{2\pi}{T}t\right) - \dots \right)$$

2. Сигнал треугольной формы:

$$s(t) = \frac{8A}{\pi^2} \left(\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{1}{3^2} \cos\left(3\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{1}{5^2} \cos\left(5\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots \right)$$

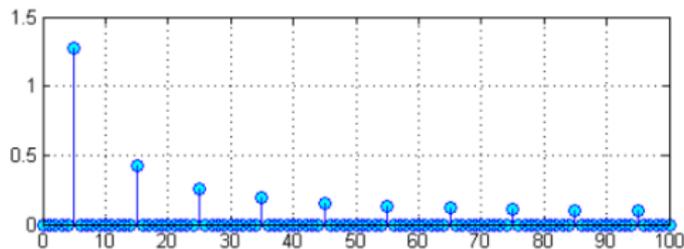
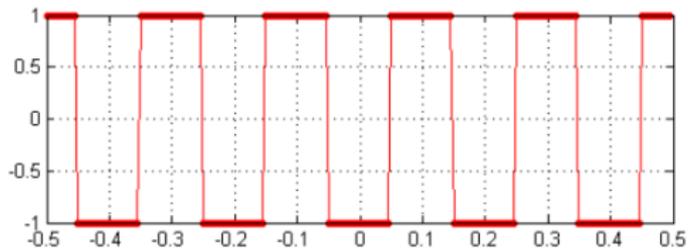
3. Пилообразный сигнал:

$$s(t) = \frac{2A}{\pi} \left(\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) - \frac{1}{2} \sin\left(2\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{1}{3} \sin\left(3\frac{2\pi}{T}t\right) - \frac{1}{4} \sin\left(4\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots \right)$$

Примеры разложения сигналов в ряд Фурье

1. Сигнал в форме меандра:

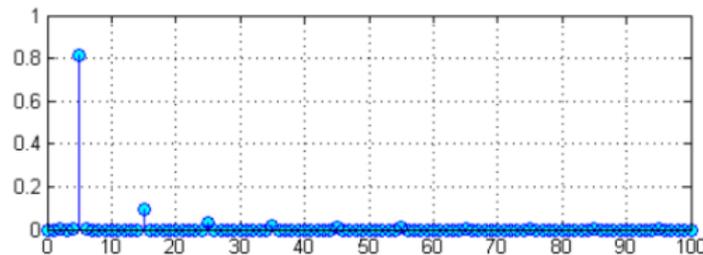
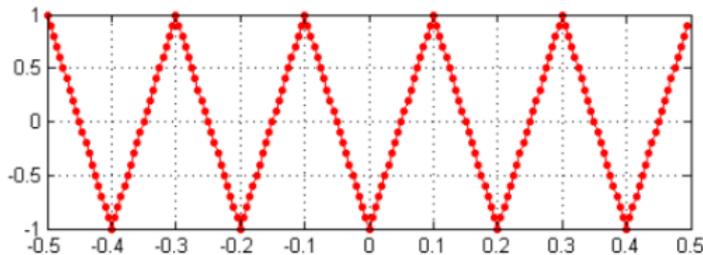
$$s(t) = \frac{A}{2} + \frac{2A}{\pi} \left(\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) - \frac{1}{3} \cos\left(3\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{1}{5} \cos\left(5\frac{2\pi}{T}t\right) - \dots \right)$$



Примеры разложения сигналов в ряд Фурье

2. Сигнал треугольной формы:

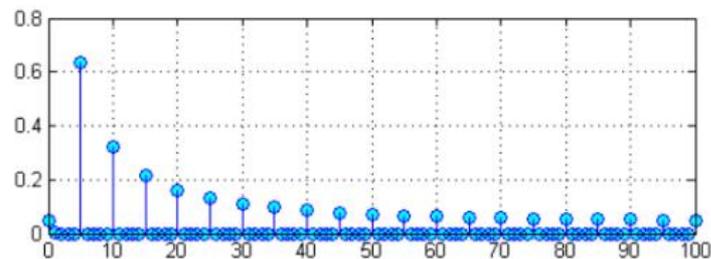
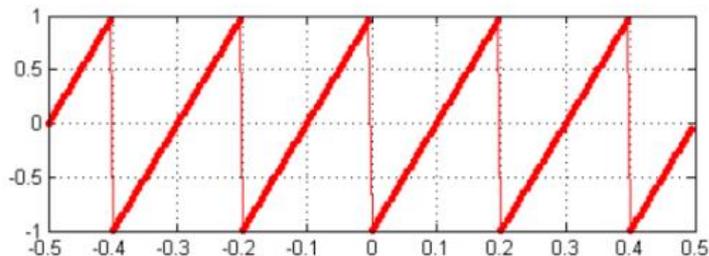
$$s(t) = \frac{8A}{\pi^2} \left(\cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{1}{3^2} \cos\left(3\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{1}{5^2} \cos\left(5\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots \right)$$



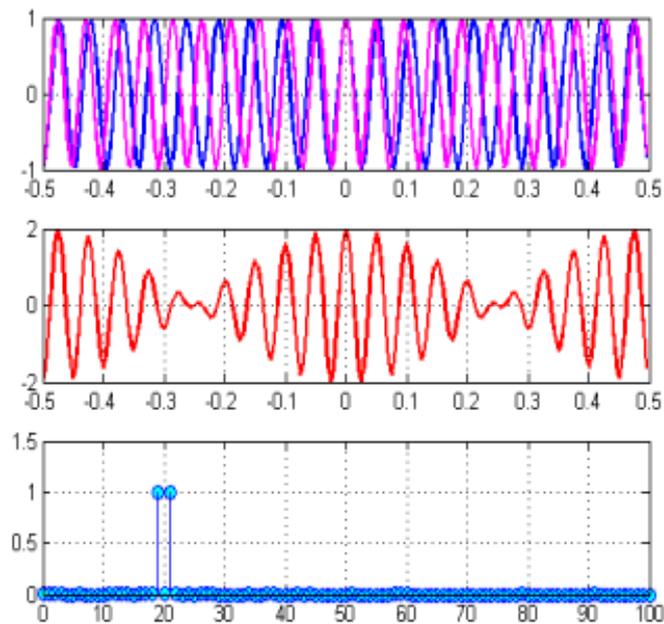
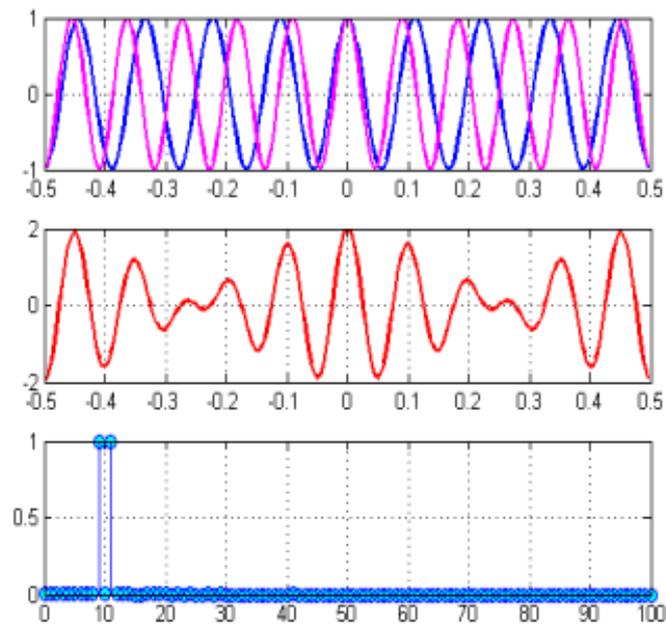
Примеры разложения сигналов в ряд Фурье

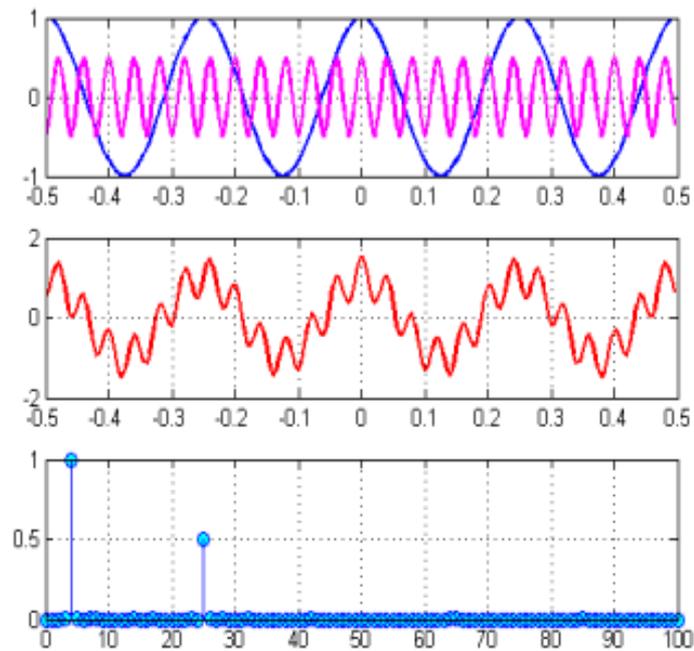
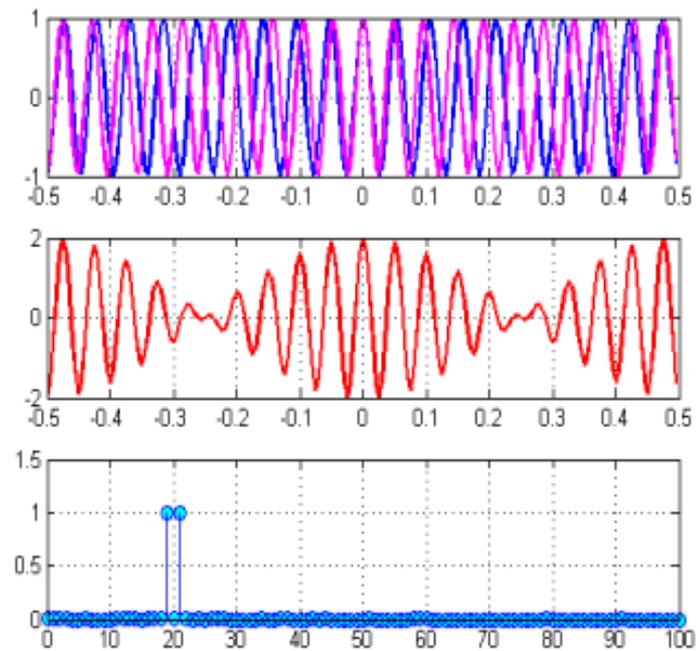
3. Пилообразный сигнал:

$$s(t) = \frac{2A}{\pi} \left(\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) - \frac{1}{2}\sin\left(2\frac{2\pi}{T}t\right) + \frac{1}{3}\sin\left(3\frac{2\pi}{T}t\right) - \frac{1}{4}\sin\left(4\frac{2\pi}{T}t\right) + \dots \right)$$



Суммирование двух гармонических сигналов с близкими частотами





Задание к лекции. Вариант № 1.



1. Какие физические принципы использует приложение Shazam.
2. Покажите, что уравнение сферической волны является решением волнового уравнения.
3. Что называют спектральным анализом сигналов?
4. Запишите свой голос, оцените амплитуду, частоту, проанализируйте спектр. Можно использовать самостоятельно разработанные или готовые инструменты, например Phyfox.

Задание к лекции. Вариант № 2



Моделирование амплитудной модуляции сигнала.

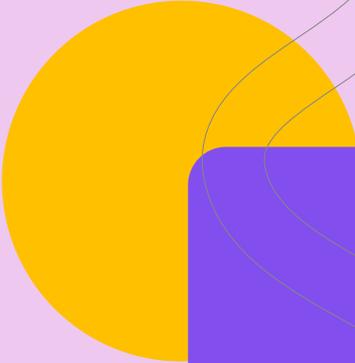
Входные параметры: частота несущего колебания, частота информационного сигнала, коэффициент модуляции или амплитуды колебаний.

Внешний вид модели: несущий сигнал, информационный сигнал, результат модуляции, спектры всех сигналов.

Моделирование частотной модуляции сигнала.

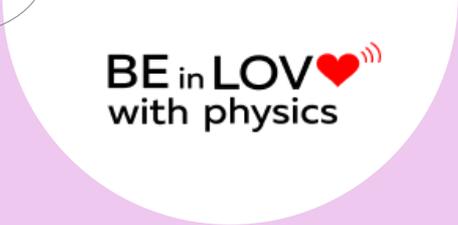
Входные параметры: частота несущего колебания, частота информационного сигнала, девиация частоты.

Внешний вид модели: несущий сигнал, информационный сигнал, результат модуляции, спектры всех сигналов.



**Спасибо
за внимание!**

muzychenko@itmo.ru



BE in LOV  
with physics