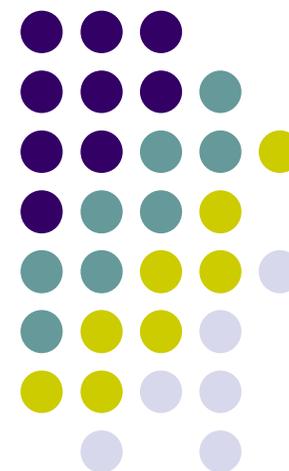


ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ
ЛЕКЦИИ №1-2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

(Для студентов элитного
технического отделения ЭТО-2)





- Содержание лекции
- Уравнения Максвелла
- Волновое уравнение для электромагнитного поля
- Свойства электромагнитных волн
- Энергия электромагнитных волн. Вектор Пойнтинга
- Давление электромагнитных волн
- Шкала электромагнитных волн
- Виды электромагнитных излучений. Излучение диполя
- Излучение и прием электромагнитных волн. Принцип радиосвязи
- Стоячие электромагнитные волны
- Эффект Доплера для световых волн

Уравнения Максвелла

Основные положения теории электромагнитного поля, вытекающие из уравнений Максвелла, состоят в следующем:

- 1) Переменное магнитное поле порождает в любой точке пространства, где оно существует, вихревое электрическое поле.*
- 2) Переменное электрическое поле порождает в любой точке пространства, где оно существует, магнитное поле.*

Из уравнений Максвелла следует, что электромагнитное поле может существовать самостоятельно – без электрических зарядов и токов. При этом изменение его состояния обязательно имеет волновой характер. Такие поля называют электромагнитными волнами. Главную роль в образовании электромагнитных волн играет ток смещения.



Волновое уравнение для электромагнитного поля



Учитывая, что в теории поля показано, что

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{A} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{A} - \nabla^2 \vec{A}; \quad \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{E} - \nabla^2 \vec{E}$$

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E} = \operatorname{rot} \left(-\mu \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right) \quad \nabla^2 \vec{E} = \mu \mu_0 \operatorname{rot} \left(\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right)$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{rot} \vec{H}) \quad \nabla^2 \vec{E} = \mu \mu_0 \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

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

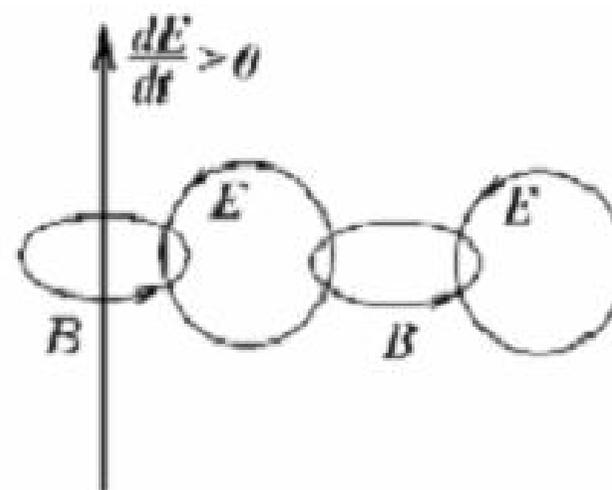
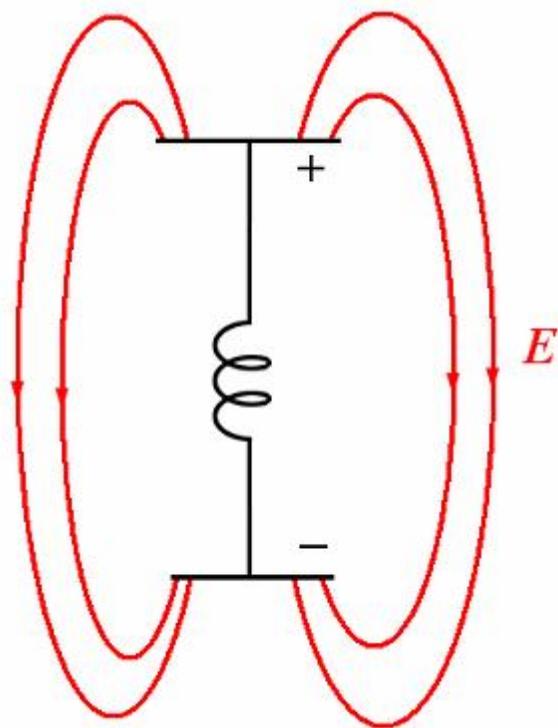
$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \vec{E} = \vec{E}_m \cos(\omega t - \vec{k} \vec{r} + \alpha)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad \vec{H} = \vec{H}_m \cos(\omega t - \vec{k} \vec{r} + \alpha)$$

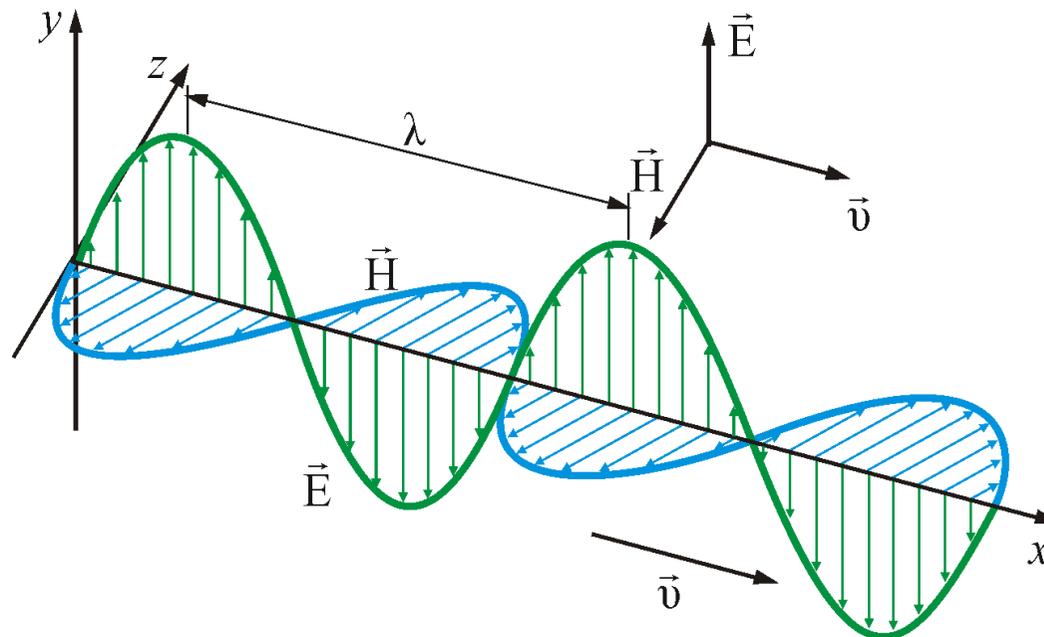


Опыты Герца

- Вибратор Герца – открытый колебательный контур



Электромагнитная волна



Векторы E , H и v образуют правовинтовую тройку векторов.

Свойства электромагнитных волн



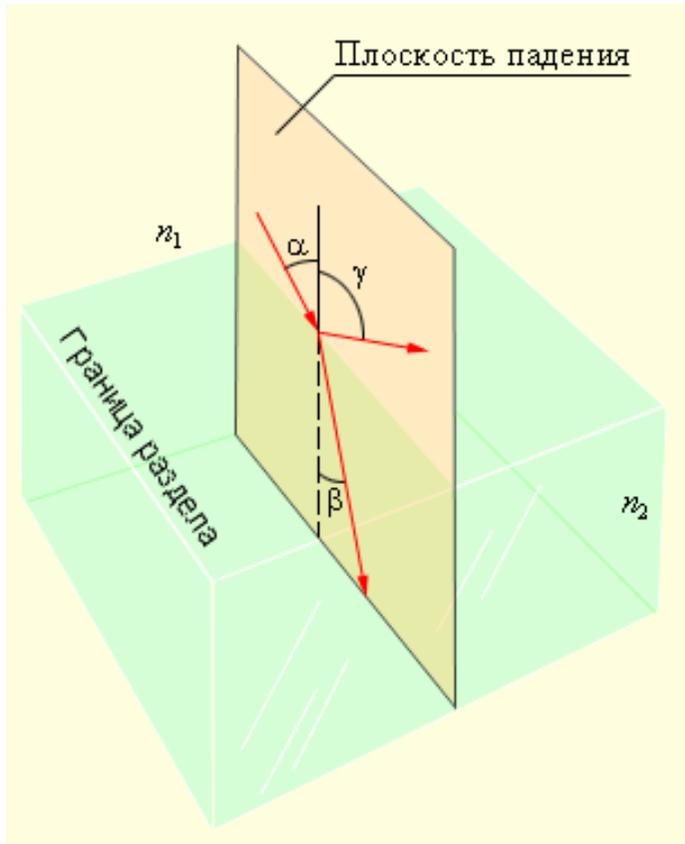
1. Переменное электромагнитное поле распространяется в пространстве в виде электромагнитной волны, фазовая скорость которой

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

2. Векторы \vec{E} и \vec{H} всегда взаимно перпендикулярны и совершают колебания в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны.
3. Векторы \vec{E} и \vec{H} образуют правовинтовую тройку векторов.
4. Связь модулей векторов \vec{E} и \vec{H} в любой момент времени имеет вид
5. Электромагнитная волна, падая на границу раздела сред, частично отражается, а частично преломляется, переходя в другую среду.

$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H$$

Преломление и отражение электромагнитных волн



$$\alpha = \gamma$$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Энергия электромагнитных волн.

Вектор Пойнтинга



Электромагнитные волны переносят энергию. Вектор плотности потока энергии равен объемной плотности энергии электромагнитной волны, умноженной на вектор фазовой скорости.

$$|\vec{S}| = [w_E + w_H = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}]v$$

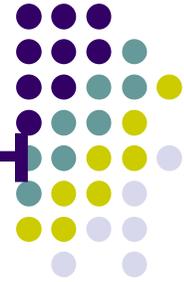
$$\sqrt{\epsilon\epsilon_0} E = \sqrt{\mu\mu_0} H \quad w = \epsilon\epsilon_0 E^2$$

$$E = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}} H \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0 \mu\mu_0}}$$

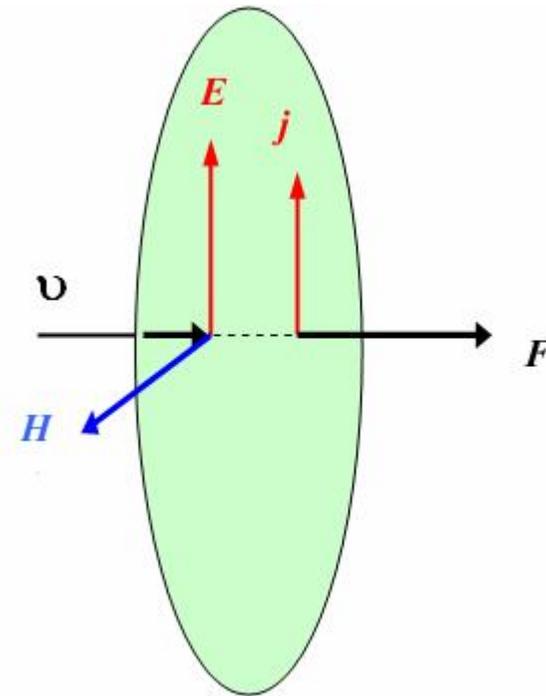
$$w = \frac{1}{v} EH$$

$$\vec{v} = \frac{[\vec{E}\vec{H}]}{EH} v \quad \vec{S} = \frac{1}{v} EH \frac{[\vec{E}\vec{H}]}{EH} v = [\vec{E}\vec{H}]$$

Давление электромагнитных волн



Величина давления электромагнитных волн находится по формуле
где ρ -коэффициент отражения,
то есть отношение
интенсивности отраженной
волны к интенсивности
падающей волны, α —угол между
направлением распространения
волны и нормалью к поверхности тела.



$$p = w(1 + \rho) \cos^2 \alpha$$

Шкала электромагнитных волн

Радиоволны



Название поддиапазона	Длина волны, м	Частота, Гц
Сверхдлинные волны	$>10^4$	$<3 \cdot 10^4$
Длинные волны	10^4-10^3	$3 \cdot 10^4-3 \cdot 10^5$
Средние волны	10^3-10^2	$3 \cdot 10^5-3 \cdot 10^6$
Короткие волны	10^2-10	$3 \cdot 10^6-3 \cdot 10^7$
Метровые волны	$10-1$	$3 \cdot 10^7-3 \cdot 10^8$
Дециметровые волны	$1-0,1$	$3 \cdot 10^8-3 \cdot 10^9$
Сантиметровые волны	$0,1-0,01$	$3 \cdot 10^9-3 \cdot 10^{10}$
Миллиметровые волны	$10^{-2}-10^{-3}$	$3 \cdot 10^{10}-3 \cdot 10^{11}$
Субмиллиметровые волны	$10^{-3}-5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{11}-6 \cdot 10^{12}$

Стоячие электромагнитные волны

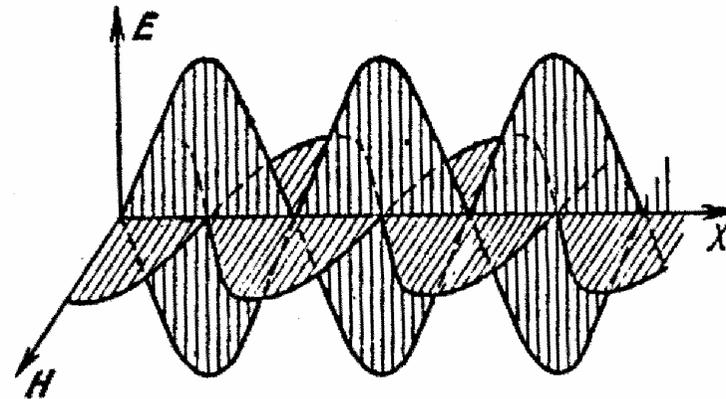


$$E = E_m \cos(\omega t - kx); \quad H = H_m \cos(\omega t - kx)$$

$$E = E_m \cos(\omega t + kx); \quad H = -H_m \cos(\omega t + kx)$$

$$E_{\text{рез}} = 2E_m \cos(kx) \cos \omega t; \quad H_{\text{рез}} = 2H_m \sin(kx) \sin \omega t$$

$$\text{Амплитуда} = |2A \cos kx|$$



Сдвиг фаз между **E** и **H** равен $\pi/2$.

Виды электромагнитных излучений. Излучение диполя



- 1) **Дипольное электромагнитное излучение** - источник излучения в этом случае представляет собой колеблющийся диполь или систему диполей.

$$\vec{p} = \vec{p}_m \cos \omega t \quad \ddot{\vec{p}}^2 = p_m^2 \omega^4 \cos^2 \omega t \quad \overline{P} \sim p_m^2 \omega^4$$

Средняя мощность дипольного излучателя

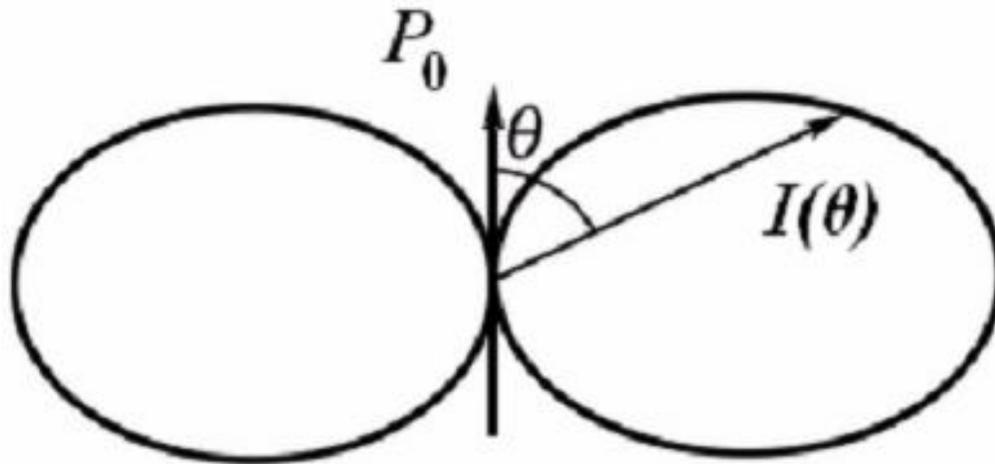
- 2) **Синхротронное излучение** – излучение заряженных частиц, движущихся по криволинейным траекториям (например, в ускорителях заряженных частиц).
- 3) **Свечение Вавилова – Черенкова** – излучение равномерно движущихся заряженных частиц в среде, скорость которых больше скорости света в среде. Если скорость частиц меньше скорости света в среде, то они излучают только при наличии ускорения. Обнаружен эффект для электрона.

Диаграмма направленности дипольного излучения



- Амплитуда волны изменяется с расстоянием: $E_m \sim H_m \sim \frac{1}{r} \sin \theta$.
- Интенсивность электромагнитной волны, то есть среднее значение плотности потока энергии, пропорциональна произведению $E_m H_m$

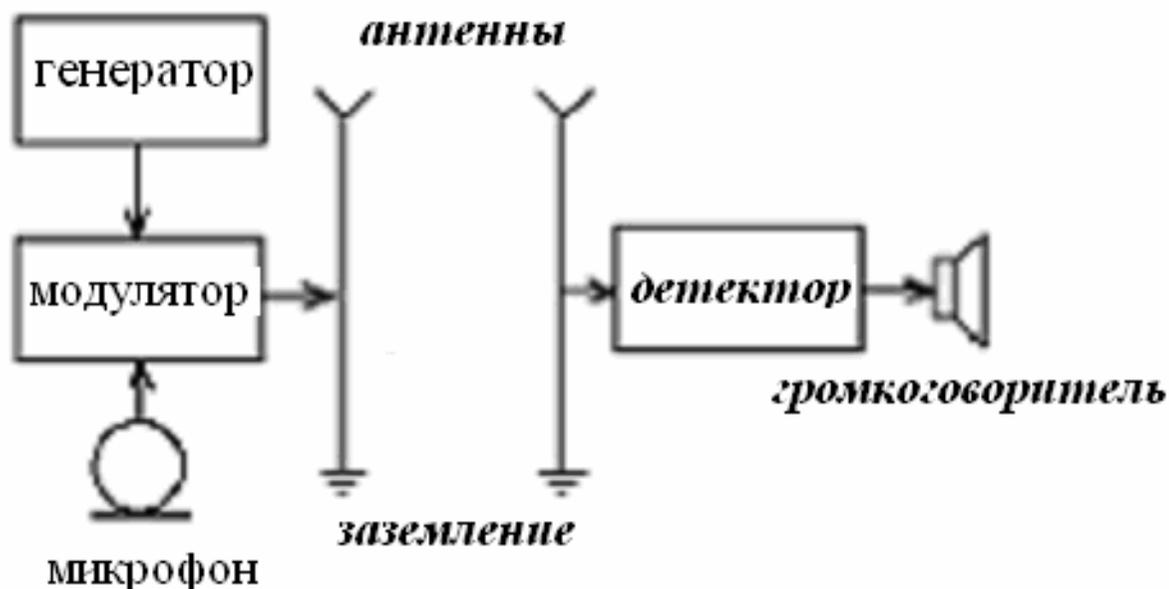
$$I = \bar{S} \sim E_m H_m \sim \frac{1}{r^2} \sin^2 \theta.$$



Излучение и прием электромагнитных волн. Принцип радиосвязи



Передача радиосигналов осуществляется радиопередатчиком . Звуковые колебания поступают в микрофон и преобразуются в электрические колебания звуковой частоты.



излучение и прием электромагнитных волн. Радиопередающий тракт



Передача радиосигналов осуществляется передатчиком. В приемном устройстве происходит демодуляция и передача сигналов звуковой частоты громкоговорителю.

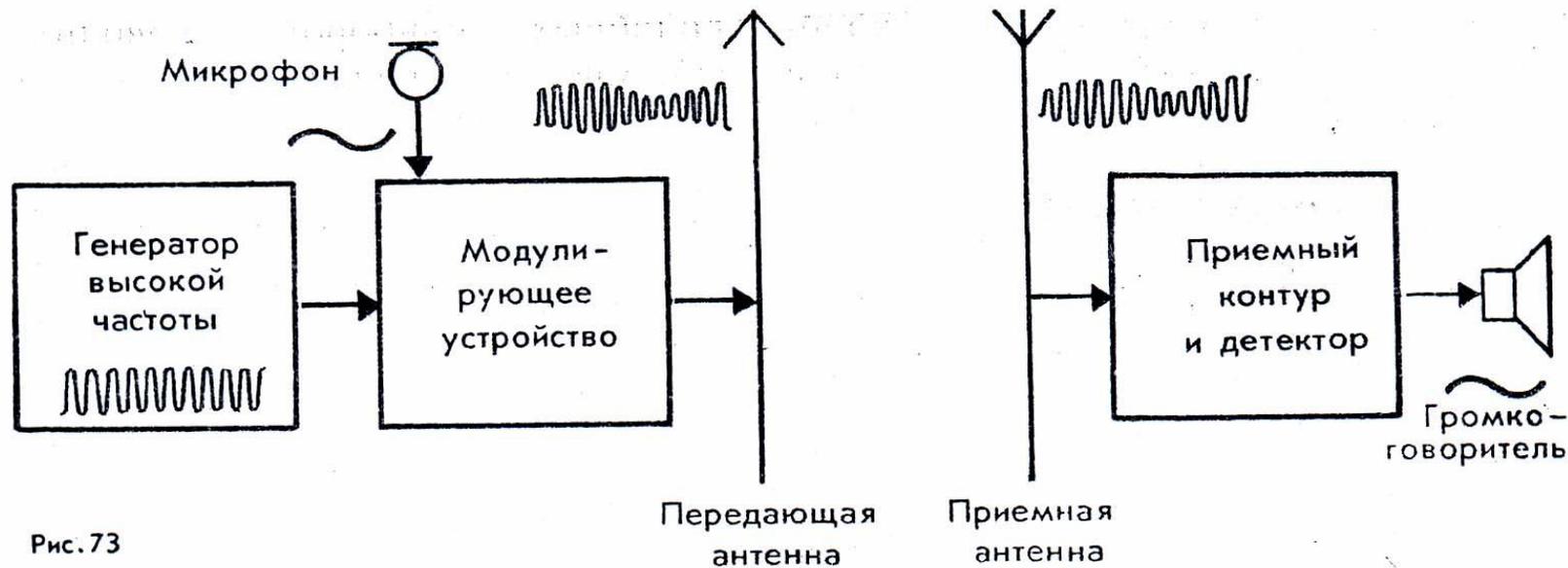
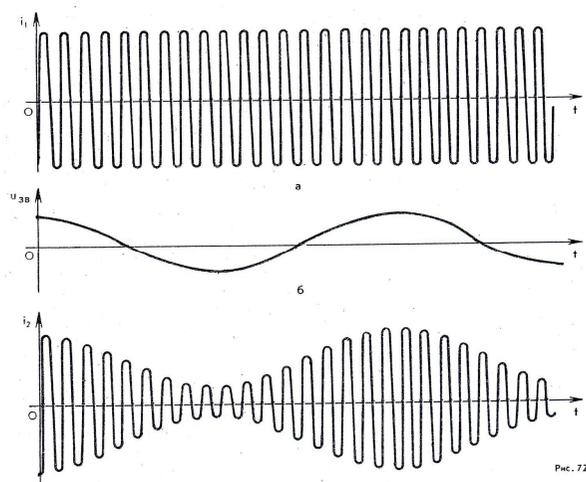


Рис. 73

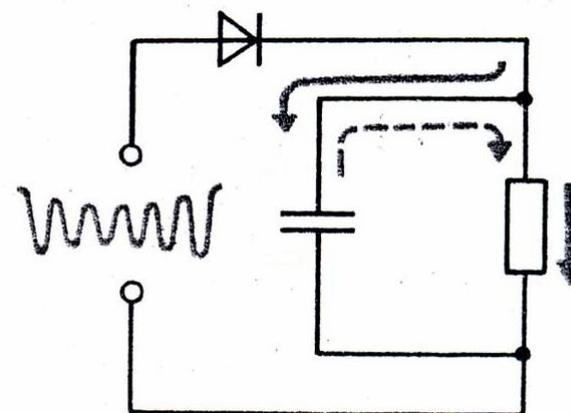


Модуляция и демодуляция

- Модуляция



Детектор



Для излучения и приема электромагнитных волн используются вибраторы (антенны), которые представляет собой открытый колебательный контур. Звуковые колебания поступают в микрофон и преобразуются в электрические колебания звуковой частоты.



Для передачи звука колебания модулируют при помощи модулятора электрическими колебаниями низкой частоты. В приемнике эти колебания демодулируются: из модулированных колебаний высокой частоты после детектирования выделяется низкочастотная (звуковая) составляющая, которая передается на громкоговоритель.

Короткие волны распространяются на большие расстояния за счет отражений от ионосферы и поверхности Земли.

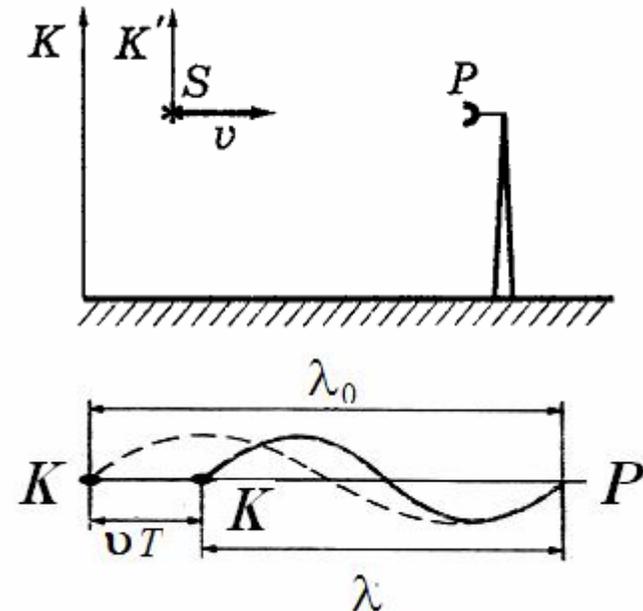
Волны **УКВ**-диапазона (**<10 м**) проникают сквозь ионосферу и практически не огибают поверхность Земли. Поэтому они используются для радиосвязи между объектами, находящимися на расстоянии прямой видимости.

Эффект Доплера для электромагнитных волн



- **Продольный эффект Доплера:**
- движение источника и приемника по лучу света

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 \pm \beta}{1 \mp \beta}} \quad \beta = \frac{v}{c}$$



Верхние знаки относятся к случаю, когда расстояние между источником и приемником уменьшается, а нижние знаки к случаю, когда расстояние между приемником и источником увеличивается.

С помощью эффекта Доплера установлен закон Э. Хаббла – космологическое красное смещение галактик друг относительно друга. Этот эффект лежит в основе теории Большого Взрыва возникновения Вселенной.



Световые волны

- Кривая относительной спектральной чувствительности

