

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### Содержание

---

1. Электромагнитное поле и его характеристики
  2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн
  3. Излучение и прием электромагнитных волн
  4. Свободное распространение электромагнитных волн
  5. Распространение электромагнитных волн в атмосфере Земли
  6. Электромагнитные волноводы
  7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы
-

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 1. Электромагнитное поле и его характеристики

*электромагнитное поле* —

форма матери, посредством которой происходит передача электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами, которое характеризуется силовыми параметрами

*электрической напряженностью*  $\vec{E}$  [В/м] и *индукцией*  $\vec{D}$  [Кл/м<sup>2</sup>], со связью между ними  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ ,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м электрическая постоянная,  $\epsilon$  - электрическая проницаемость среды,  $\vec{P} = N \cdot \vec{p}$  - поляризация среды, где  $N$  - концентрация,  $\vec{p} = q \cdot \vec{l}$  - дипольный момент;

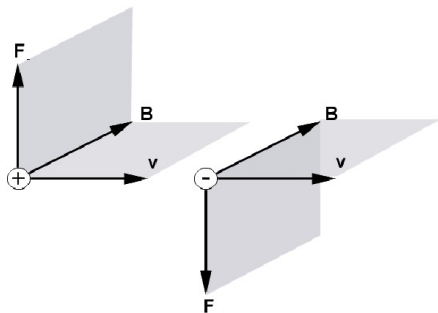
*магнитной индукцией*  $\vec{B}$  [Тл] и *напряженностью*  $\vec{H}$ , [А/м], со связью между ними  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu \mu_0 \vec{H}$ ,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная,  $\mu$  - магнитная проницаемость среды,  $\vec{M} = N \cdot \vec{m}$  - намагниченность среды, где  $N$  - концентрация,  $\vec{m} = I \cdot \vec{S}$  - магнитный момент;

# 1. Электромагнитное поле и его характеристики

электромагнитное поле —

сила  $\vec{F}$ , действующая на электрический заряд  $q$ , движущийся со скоростью  $\vec{V}$ , со стороны электромагнитного поля с электрической напряженностью  $\vec{E}$  и магнитной индукцией  $\vec{B}$ :

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q\vec{E} + q[\vec{V} \times \vec{B}]$$



сила Лоренца включает электрическую составляющую

$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

и магнитную составляющую

$$\vec{F}_m = q[\vec{V} \times \vec{B}]$$

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 1. Электромагнитное поле и его характеристики: уравнения Максвелла

#### 1. закон электромагнитной индукции

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_S \vec{B} d\vec{S} \quad - \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

#### 2. закон полного тока

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_S \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} \quad - \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

#### 3. теорема Гаусса-Остроградского

$$\oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \iiint_V \rho dV \quad - \quad \text{div} \vec{D} = \rho \qquad \oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad - \quad \text{div} \vec{B} = 0$$

здесь  $L$  - определяет замкнутый контур, на который опирается поверхность  $S$ , или  $S$  - замкнутая поверхность, охватывающая объем  $V$ ;

#### 4. уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \vec{j} = 0 \quad (\text{где } \vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \text{ закон Ома})$$

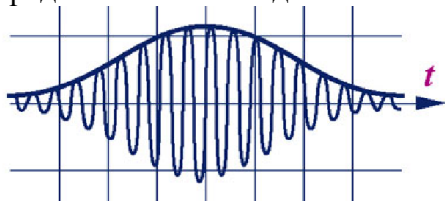
здесь  $\rho$  объемная плотность зарядов,  $\vec{j}$  - плотность тока проводимости

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 1. Электромагнитное поле и его характеристики: волновой пакет

волновой пакет —

распространяющиеся в пространстве возмущения электромагнитного поля, представляемое в виде волнового пакета - набора гармонических волн поля



- любое возмущение электромагнитного поля можно разложить в ряд Фурье по гармоническим составляющим

$$\begin{Bmatrix} \vec{E} \\ \vec{H} \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^N \begin{Bmatrix} \vec{E}_{mi} \\ \vec{H}_{mi} \end{Bmatrix} \sin(\omega_i t - \vec{k}_i \vec{r} + \varphi_0),$$

здесь  $E_{mi}$ ,  $H_{mi}$  - амплитуды электрической и магнитной составляющей волны,  $\omega_i$  - циклическая частота,  $k_i$  - волновой вектор,  $\varphi_0$  - начальная фаза  $i$ -волны, в скобках полная фаза волны, для гармонических волн

$$\omega = 2\pi\nu \quad \vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\vec{c}}{c} \right) \quad \nu\lambda = c$$

здесь  $\nu$  - частота,  $\lambda$  - длина волны,  $c=299792,5\pm 0,1$  км/сек - скорость света в вакууме (фазовая скорость), фундаментальная постоянная,  $\nu < c$  - скорость распространения пакета (энергии), групповая скорость

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 1. Электромагнитное поле и его характеристики: структура волны

ЭМВ — представляет поперечную волну со связанными колебаниями напряженностей электрического  $\mathbf{E}$  и магнитного  $\mathbf{H}$  полей, происходящих во взаимно перпендикулярных плоскостях и перпендикулярных направлению

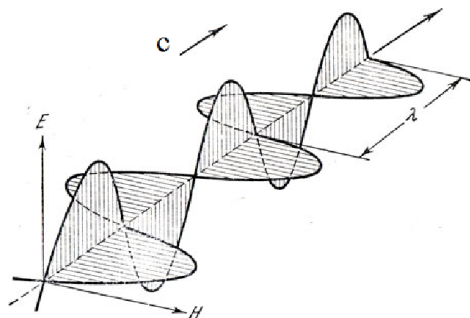
распространения, так что в вакууме:

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \vec{B} \quad \vec{k} \times \vec{H} = -\omega \vec{D};$$

в ЭМВ в любой момент времени напряженности электрического  $\mathbf{E}$  и магнитного  $\mathbf{H}$  полей связаны между собой волновым сопротивлением среды (импедансом):

$$z = z' + iz'' = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}};$$

среда характеризуется комплексным показателем преломления  $\tilde{n} = n - i\kappa/2$  где  $n = \sqrt{\varepsilon\mu} = c/v$  - показатель преломления,  $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$  - скорость в вакууме,  $v = c/n$  - скорость в среде,  $\kappa$  - показатель потерь (поглощения).

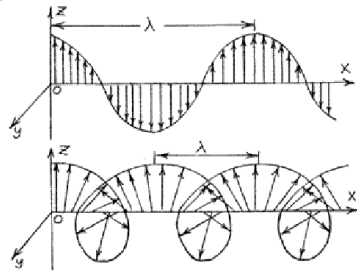
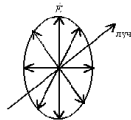


## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 1. Электромагнитное поле и его характеристики: поляризация волны поляризация волны —

так как ЭМВ по структуре является поперечной волной, то её свойства при распространении зависят от ориентации в пространстве плоскости колебаний вектора напряженности электрического  $E$  поля (и плоскости колебаний магнитного  $H$  поля), которая называется плоскостью поляризации: т.е. плоскость образованная векторами  $\vec{E}$   $\vec{k}$  : различают

- неполяризованную волну с естественную поляризацией, когда в любой момент времени и любой точке поля плоскость поляризации ориентирована случайным образом с равной вероятностью по всем направлениям;
- поляризованную волну с линейной (ориентация не изменяется), круговой (ориентация поворачивается на  $360^\circ$  градусов на длине волны/периоде) и эллиптической (поворачивается с изменением амплитуды волны) поляризацией



## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 1. Электромагнитное поле и его характеристики: параметры

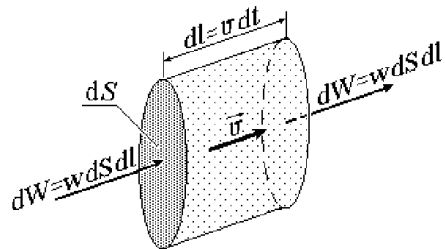
энергетические характеристики волны —

в электромагнитном поле сосредоточена энергия, плотность которой равна в любой момент времени

$$w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \varepsilon \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2 = \frac{1}{2} (\vec{E} \vec{D} + \vec{B} \vec{H}) \text{ в Дж/м}^3$$

также, в любой момент времени поток энергии переносимой электромагнитной волной определяется вектором Умова-Пойтинга

$$\vec{S} = w \vec{v} = [\vec{E} \times \vec{H}] \text{ в Вт/м}^2;$$



средняя энергия переносимая электромагнитной волной в единицу времени через нормальную единичную площадку - интенсивность волны

$$I = \langle |\vec{S}| \rangle = \frac{1}{2} E_m H_m = \frac{1}{4} (\varepsilon \varepsilon_0 E_m^2 + \mu \mu_0 H_m^2) \frac{c}{n} = \frac{1}{2} z H_m^2 = \frac{1}{2z} E_m^2 \text{ в Вт/м}^2;$$

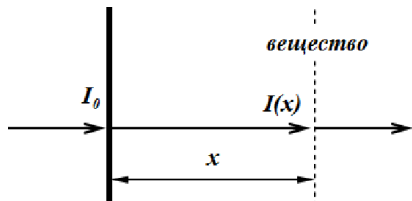
здесь  $E_m$ ,  $H_m$  - амплитуды электрической и магнитной составляющей волны



## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 1. Электромагнитное поле и его характеристики: параметры

коэффициент поглощения — при прохождении среды вдоль оси  $x$  происходит уменьшение интенсивности в следствие поглощения, рассеяния и др., если интенсивность электромагнитной волны на входе в вещество:  $I_0$ ,



а по прохождении расстояния  $x$ :  $I(x)$ , тогда

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x),$$

здесь  $\alpha$  [1/м] коэффициент поглощения; в комплексном показателе преломления

$$\tilde{n} = n - i\kappa/2,$$

$n = c/v$  - показатель преломления;  $\kappa$  - показатель потерь (поглощения);

в случае, бегущей электромагнитной волны  $E = E_m \exp[i(\omega t - kx + \varphi_0)]$ ,

где  $k = 2\pi/\lambda = (\omega/v) = \tilde{n}(\omega/c)$  - волновое число (вектор), отсюда получаем

$E = E_m \exp[-\kappa\omega x/2c] \exp[i(\omega t - (n\omega/c)x + \varphi_0)]$ , так как интенсивность

$I = \text{const} \cdot E_m^2$ , тогда коэффициент и показатель поглощения среды

$$\alpha = (\omega/c)\kappa = \kappa k$$

и

$$\kappa = \alpha(c/\omega) = \alpha\lambda/2\pi.$$

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

основные электромагнитные характеристики физической среды — это

– электрическая постоянная  $\epsilon_0=8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м (для вакуума);

– магнитная постоянная  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м (для вакуума)

и относительные проницаемости для других сред относительно вакуума

– тензор электрической проницаемости среды  $\hat{\epsilon}(\vec{E}, \vec{H}) = \|\epsilon_{ij}\|$

– тензор магнитной проницаемости среды  $\hat{\mu}(\vec{E}, \vec{H}) = \|\mu_{ij}\|$

которые являются тензорами комплексных величин, определяющими электромагнитные свойства среды, в общем случае зависящие как свойств среды, так и от величины электромагнитного поля, все остальные свойства определяются свойствами электрического и магнитного тензоров;

в линейном приближении изотропной физической среды отклик на электрическое поле ( $\epsilon=\text{const}$ ) и на магнитное поле ( $\mu=\text{const}$ ) определяются

*комплексным показателем преломления* -  $\tilde{n} = \sqrt{\epsilon\mu}$ , где  $\tilde{n} = n - i\alpha\lambda/4\pi$ ;

*волновым сопротивлением* -  $z = z_0\sqrt{\mu/\epsilon}$ , где  $z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ ;

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

в физической среде с комплексным показателем преломления  $\tilde{n} = n - i\alpha\lambda/4\pi$  и волновым сопротивлением  $z = (E/H)$  уравнение бегущей волны представляется в виде

$$E = \{E_m \exp[-\alpha x/2]\} \cdot \exp[i(\omega t - nkx + \varphi_0)],$$

где  $n$  - показатель преломления среды,  $\alpha$  - коэффициент поглощения среды физические среды по отклику на воздействие электромагнитного поля разделяются на

- *вакуум* (идеальная среда) - без дисперсионная физическая среда;
- *магнетики* - физические среды, откликающиеся на воздействие магнитного поля волны;
- *диэлектрики* - физические среды, откликающиеся на воздействие электрического поля волны, характеризуется отсутствием свободных зарядов (электронов);
- *проводники* - физические среды, откликающиеся на воздействие электрического поля волны, характеризуется наличием свободных зарядов (электронов);

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

*Дополнение —*

связь коэффициента затухания  $\gamma$  и коэффициента поглощения  $\alpha$ :  
уравнение вынужденных колебаний под действием силы  $F$  тела массой  $m$

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = F/m$$

при распространении возмущения от колебательного процесса затухание произойдет так, что

$$\gamma = \alpha \cdot c ,$$

где скорость распространения волны  $c = \lambda f$  ( $\lambda$  - длина волны,  $f$  - частота).  
*для колебательного и волнового процессов (по определению)*

$$\gamma = \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dt} \text{ и } \alpha = \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dl} ,$$

тогда так как пройденное волной расстояние  $l = t \cdot c$ , то получаем исходное соотношение между коэффициентами затухания и поглощения.

Т. о. показатель поглощения или коэффициент потерь  $\kappa$  по энергии процесса связан с коэффициентом затухания  $\alpha$  и поглощения  $\gamma$  как

$$\kappa = \alpha\lambda/2\pi = \gamma/f2\pi .$$

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

*основные электромагнитные характеристики вакуума* —

вакуум рассматривается как идеальная физическая среда, которая в широком диапазоне интенсивностей электромагнитного поля остается

- *линейной*, т.е. её свойства не зависят от величины электрического и магнитного поля, действующего в нем,  $\epsilon_0 = \text{const}$ ,  $\mu_0 = \text{const}$ ;
- *изотропной и однородной*, т.е. её свойства не зависят от направления распространения волны и её поляризации, расстояния;
- *без дисперсионной*, т.е. её свойства не зависят от частоты возмущающего поля;

данные свойства вакуума делают его средой с которой сравнивают другие физические среды и определяют универсальные постоянные

скорость света в вакууме  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299792 \text{ км/сек}$

комплексный показатель преломления  $\tilde{n} = 1 + i \cdot 0$

удельное волновое сопротивление вакуума  $z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \text{ Ом} = 377 \text{ Ом}$

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

основные характеристики магнитных свойств физических сред —

магнетики по магнитной проницаемости  $\mu$  делятся на

- *диамагнетики*, вещества (газы, жидкости и т.д.) с  $\mu \leq 1$  зависимое от внешнего магнитного поля и незначительно ослабляющее его (магнитная восприимчивость  $\chi = \mu - 1$  от  $10^{-4}$  до  $10^{-6}$ , вода:  $\chi = -13 \cdot 10^{-6}$ );
- *парамагнетики*, вещества (металлы, электронный газ, плазма и т.д.), с  $\mu \geq 1$  зависимое от внешнего магнитного поля и незначительно усиливающее его (при комнатной температуре магнитная восприимчивость  $\chi = \mu - 1$  от  $10^{-4}$  до  $10^{-6}$ , вольфрам:  $\chi = +68 \cdot 10^{-6}$ );
- *ферромагнетики*, вещества в твердой фазе, с  $\mu \gg 1$  зависимое от внешнего магнитного поля и значительно усиливающее его (при T ниже температуры Кюри более 100000, например, железо:  $\chi_{max} = 22000$ );

### магнитная проницаемость физических сред

для большинства веществ, принимается равной 1 не зависящей от частоты, с ростом частоты отличие от 1 уменьшается;

комплексная величина и может принимать, чисто мнимое значение;

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

*основные характеристики электрических свойств физических сред —*

- удельное электрическое сопротивление  $\rho$  в Ом·м;
  - удельная электрическая проводимостью  $\sigma = \rho^{-1}$  в  $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1} = \text{Сименс}/\text{м}$ ;
- которая определяется из закона Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \text{ где}$$

$\vec{j}$  - плотность тока [ $\text{А}/\text{м}^2$ ],  $\vec{E}$  - напряженность электрического поля [ $\text{В}/\text{м}$ ]

*материалы по проводимости делятся на проводники и диэлектрики*

при комнатной температуре удельная электрическая проводимость серебра  $6,2 \cdot 10^7$  См/м, железо  $10^7$  См/м, вода 3 См/м (морская) и  $10^{-4}$  См/м (дистиллированная), стекло  $10^{-11}$  См/м;

в общем случае по электронной теории Друде-Лоренца, электронная удельная проводимость металлов

$$\sigma = (e/m_e) N_e e \tau,$$

$e/m_e$  - удельный заряд электрона,  $N_e$  - концентрация электронов,  $e$  - заряд электрона,  $\tau$  - время свободного пробега электрона между столкновениями

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

дополнение — закон Ома в дифференциальной форме

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

по электронной теории Друде-Лоренца, плотность тока определяется концентрацией электронов ( $N_e$ ) в металле, зарядом носителя ( $e$ , электрона), средней скоростью ( $\langle \vec{u} \rangle$ ) направленного движения по полю  $\vec{E}$ :

$$\vec{j} = eN_e \langle \vec{u} \rangle;$$

под действием электрического поля  $\vec{E}$  на электрон массой  $m_e$  по 2 закону Ньютона действует сила

$$e\vec{E} = m_e \langle \vec{u} \rangle / \tau,$$

здесь  $\tau$  - время свободного пробега электрона между столкновениями, отсюда получаем для средней скорости направленного движения электрона

$$\langle \vec{u} \rangle = (e/m_e) \tau \vec{E}, \text{ тогда плотность тока } \vec{j} = (e^2/m_e) N_e \tau \vec{E},$$

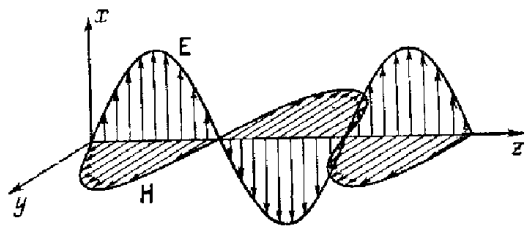
отсюда получаем выражение для проводимости

$$\sigma = (e/m_e) N_e e \tau.$$



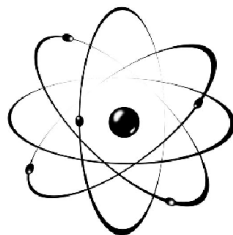
## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн взаимодействия ЭМВ со связанными и свободными электронами вещества



*Электромагнитная волна*

### *Связанные электроны*



*Свободные электроны*

т.е. взаимодействие с проводниками и диэлектриками

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

*диэлектрики и проводники: основные электромагнитные характеристики*  
влияние на распространение ЭМВ свободных и связанных зарядов связано с взаимодействием переменного электрического и магнитного полей с электронами (модель Друде-Лоренца): в одномерной модели, если электронная система имеет собственную частоту колебаний  $\omega_0$  и коэффициент затухания колебаний  $\gamma$ , то воздействие электромагнитной гармонической волны напряженностью  $E$  на частоте  $\omega$  будет описываться уравнением вынужденных колебаний с затуханием

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = (e/m_e) E, \text{ при } E = E_m \exp(-i\omega t)$$

решение которого дается  $x = \frac{(e/m_e)}{\omega_0^2 - \omega^2 - 2i\omega\gamma} E$  - смещение электронов

такое колебание электрона вызывает смещение всех  $N_e$  электронов в веществе и поляризует вещество с поляризацией  $P = N_e e x$ , отсюда

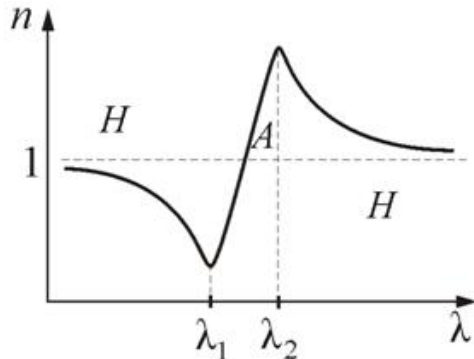
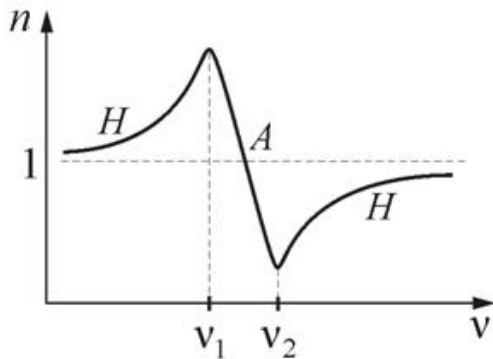
$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} = 1 + \frac{(N_e e^2 / \varepsilon_0 m_e)}{\omega_0^2 - \omega^2 - 2i\omega\gamma}, \text{ так как } \vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

диэлектрики: дисперсия электромагнитных волн т.е.  $n(\omega)$  — область аномальной дисперсии в диэлектриках вблизи собственных частот

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{(N_e e^2 / \varepsilon_0 m_e)}{\omega_0^2 - \omega^2 - 2i\omega\gamma}, \text{ где } N_e - \text{число связанных электронов: } n = \sqrt{\varepsilon\mu}$$



нормальная (область H) дисперсия  $(dn/d\nu) > 0$ ;  $(dn/d\lambda) < 0$

аномальная (область A) дисперсия  $(dn/d\nu) < 0$ ;  $(dn/d\lambda) > 0$

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

диэлектрики: дисперсия электромагнитных волн т.е.  $n(\omega)$  — электромагнитные волны радиодиапазона (т.е. волны на частотах много меньше оптических частот) соответствуют условию  $\omega \ll \omega_0$  и  $\gamma \ll \omega_0$ , тогда

$$\varepsilon(\omega) \approx 1 + \left( \frac{e}{m_e} \right) \frac{N_e e}{\varepsilon_0 \omega_0^2} \approx \text{const}(\omega),$$

отсюда следует, что в диэлектриках в поле волны радиодиапазона

$$\tilde{n} = \sqrt{\varepsilon(\omega) \mu} = n - i \alpha \lambda / 4\pi \approx n = \sqrt{1 + (\omega_p / \omega_0)^2},$$

здесь  $\omega_p = \sqrt{N_e e^2 / \varepsilon_0 m_e}$  - некоторая постоянная, плазменная (Лэнгмюровская) частота,  $\omega_0$  - собственная частота колебаний электрона в атоме  $\omega_0 \sim \omega_p$  (частота колебаний связанных электронов); как видно,

- $n \approx \text{const}(\omega)$  - показатель преломления не зависит от частоты поля электромагнитной волны;
- $\alpha \approx 0$  поглощение отсутствует;

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

диэлектрики: дисперсия электромагнитных волн т.е.  $n(\omega)$  — дисперсия электромагнитных волн в проводниках со свободными электронами ( $\omega_0=0$ )

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + 2i\omega\gamma},$$

где  $\omega_p = \sqrt{N_e e^2 / \varepsilon_0 m_e}$  - плазменная (лэнгмюровская) частота

заряд электрона  $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, масса электрона  $m_e=9,1 \cdot 10^{-31}$  кг/м<sup>3</sup> электрическая постоянная  $\varepsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, или  $(1/4\pi\varepsilon_0)=9 \cdot 10^9$  м/Ф, отсюда

плазменная частота  $f_p [Hz] = (\omega_p / 2\pi) = 9 \sqrt{N_e [m^{-3}]}$ ;

в случае металла  $N_e=10^{28} \div 10^{29}$  м<sup>-3</sup> отсюда  $f_p \approx 10^{15}$  Гц, т.е. для металлов плазменная частота находится в области оптических частот

замечание: корень из комплексного числа

$$\sqrt{a+ib} = \pm \left[ \sqrt{\left(a + \sqrt{a^2 + b^2}/2\right)} + (\text{sgn } b) i \sqrt{\left(-a + \sqrt{a^2 + b^2}/2\right)} \right].$$

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

проводники: дисперсия электромагнитных волн т.е.  $n(\omega)$  —

– случай свободных электронов ( $\omega_0=0$ ) в области низких частот ( $\omega \ll \gamma$ ), т.е. случай металла в электромагнитной волне низкой частоты

$$\varepsilon(\omega) \approx 1 + i \frac{\omega_p^2}{2\omega\gamma}, \text{ так как } \gamma = \frac{1}{2\tau} = \frac{e^2 N_e}{2m_e \sigma}, \text{ то } \varepsilon(\omega) \approx 1 + i(\sigma/\omega\varepsilon_0)$$

таким образом в металлах на низких частотах при  $\mu=1$  и при  $\sigma/\omega\varepsilon_0 \gg 1$  например, для ЭМВ оптического диапазона  $\omega=3,8 \cdot 10^{15}$  рад/сек ( $\lambda=0,5$  мкм), тогда серебра  $(\sigma/\varepsilon_0) = (6,2 \cdot 10^7 [S/m]/8,85 \cdot 10^{-12} [F/m]) = 7 \cdot 10^{18} \text{ rad/s} \gg \omega$  показатель преломления

$$\tilde{n} = n - i\kappa/2 = \sqrt{\varepsilon\mu} \approx \sqrt{1 + i(\sigma/\omega\varepsilon_0)} \approx \sqrt{i} \sqrt{\sigma/\omega\varepsilon_0} = \pm \sqrt{\sigma/2\omega\varepsilon_0} (1 + i)$$

волновое сопротивление

$$z = z' + iz'' = z_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \approx z_0 \sqrt{\frac{1}{1 + i(\sigma/\omega\varepsilon_0)}} \approx z_0 \sqrt{-i} \sqrt{\varepsilon_0/\omega\sigma} = \pm z_0 \sqrt{\varepsilon_0/2\omega\sigma} (1 - i)$$

замечание:

$$\sqrt{i} = \pm(1+i)/\sqrt{2}; \quad \sqrt{-i} = \pm(1-i)/\sqrt{2};$$

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 2. Физическая среда в распространении электромагнитных волн

проводники: дисперсия электромагнитных волн т.е.  $n(\omega)$  —

- случай свободных электронов ( $\omega_0=0$ ) в области высоких частот ( $\omega \gg \gamma$ ), т.е. случай металла в электромагнитной волне высокой частоты

$$\varepsilon(\omega) \approx 1 - (\omega_p/\omega)^2$$

- если  $\gamma \ll \omega \ll \omega_p$ , то электрическая проницаемость отрицательна  $\varepsilon(\omega) < 0$  и при  $\mu=1$  имеем чисто мнимые значения для

показатель преломления  $\tilde{n} = \sqrt{\varepsilon\mu} = i\kappa/2 \approx i(\omega_p/\omega);$

волновое сопротивление  $z = z_0\sqrt{\mu/\varepsilon} = iz'' \approx iz_0(\omega/\omega_p);$

т.е. имеем случай полного отражения и поглощения материалом

- если  $\omega \gg \omega_p$  и  $\omega \gg \gamma$ , то электрическая проницаемость имеет положительное значение  $\varepsilon(\omega) > 0$  близкое к 1 и при  $\mu=1$  имеем

показатель преломления  $n = \sqrt{\varepsilon\mu} \approx 1;$

волновое сопротивление  $z = z_0\sqrt{\mu/\varepsilon} \approx z_0;$

т.е. имеем случай полностью прозрачного материала

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 3. Излучение и прием электромагнитных волн: понятие

*излучение электромагнитных волн — излучающие антенны* — генерация на длине волны много больше длины волны оптического излучения, т.е. много больше *мкм*, связана с ускоренным движением заряженных частиц или ускоренным движением тел обладающих магнитным моментом, а также изменением самого электрического и магнитного поля; это определяется уравнениями Максвелла

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}, \operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}, \operatorname{div}\vec{D} = \rho, \operatorname{div}\vec{B} = 0, \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}, \vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$$

любые изменения электромагнитного поля вызывают генерацию электромагнитной волны, к подобным системам относятся

- переменный электрический диполь;
- переменный магнитный диполь (рамка);

также, в качестве излучающей антенны может выступать любой проводник с изменяющимся током, который генерирует переменное магнитное поле, в свою очередь, которое формирует вихревое (замкнутое) электрическое поле, переходящее в волновое движение, переходные процессы протекают на расстояниях порядка длины волны излучаемого поля.

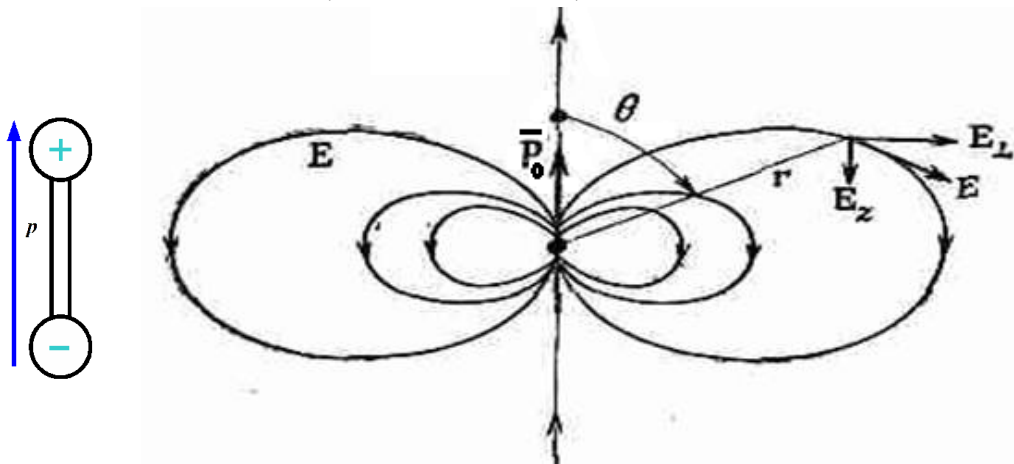


### 3. Излучение и прием электромагнитных волн

дополнение: поле электрического диполя в дальней зоне

электрическое поле диполя  $\vec{p}_0 = q\vec{l}$  в дальней зоне на расстоянии  $r \gg l$  —

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{p_0}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left( 3 \left( \frac{\vec{r} \cdot \vec{p}_0}{r p_0} \right) \left( \frac{\vec{r}}{r} \right) - \frac{\vec{p}_0}{p_0} \right) = \frac{p_0}{4\pi\epsilon_0 r^3} \left( 3 \frac{\vec{r}}{r} \cos \theta - \frac{\vec{p}_0}{p_0} \right)$$

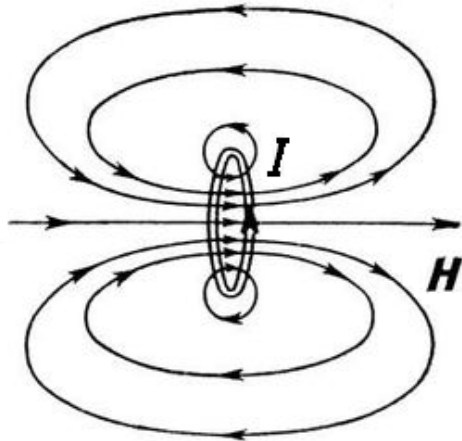
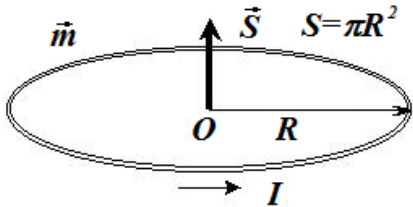


### 3. Излучение и прием электромагнитных волн

дополнение: поле магнитного диполя в дальней зоне

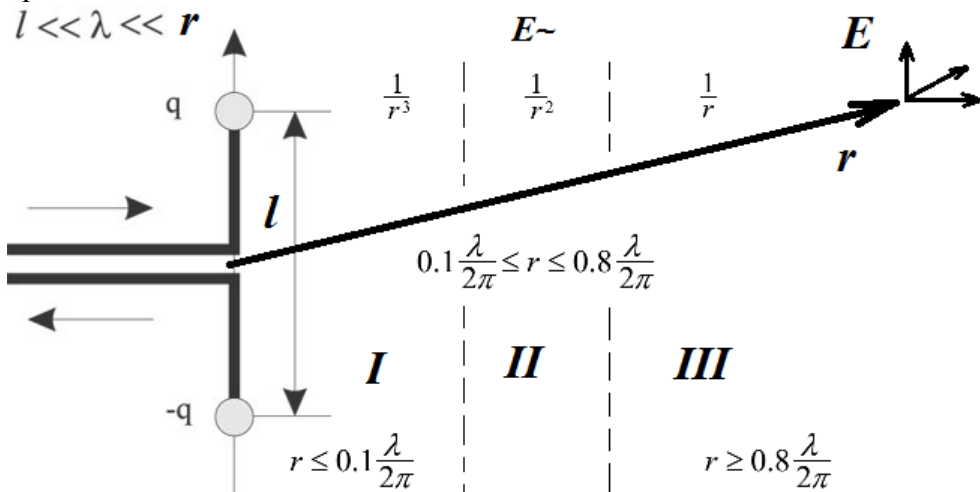
магнитное поле диполя  $\vec{m}_0 = I\vec{S}$  в дальней зоне на расстоянии  $r$ :  $\pi r^2 \gg S$  —

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{m_0}{4\pi\mu_0 r^3} \left( 3 \left( \frac{\vec{r} \cdot \vec{m}_0}{r m_0} \right) \left( \frac{\vec{r}}{r} \right) - \frac{\vec{m}_0}{m_0} \right) = \frac{m_0}{4\pi\mu_0 r^3} \left( 3 \frac{\vec{r}}{r} \cos\theta - \frac{\vec{m}_0}{m_0} \right)$$



### 3. Излучение и прием электромагнитных волн

излучение диполя — связано с ускоренным движением заряженных частиц в замкнутом пространстве, простейшим источником которого является электрический диполь, с зарядом движущимся со скоростью меньшей скорости света



### 3. Излучение и прием электромагнитных волн

результатирующее поле диполя разбивается на области —

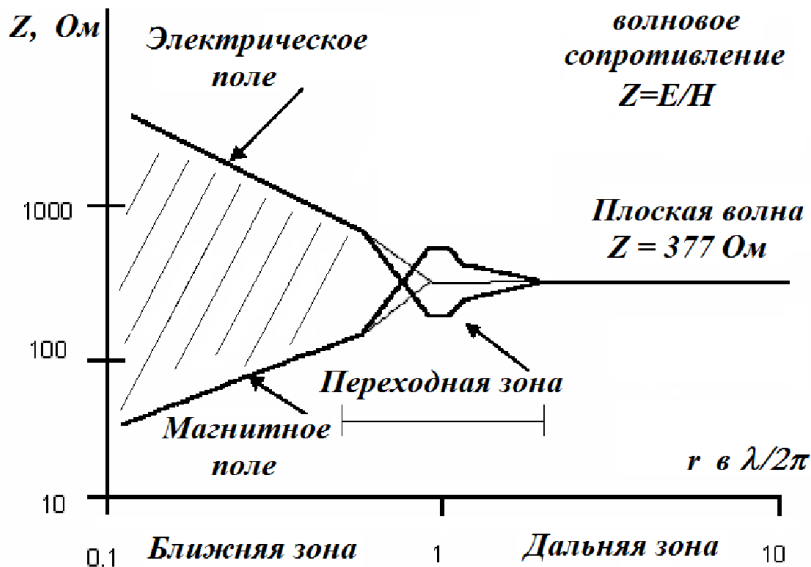
в результате движения заряда генерируется электрические поля  $E \sim (r^{-1}; r^{-3})$  и магнитные поля  $H \sim (r^{-1}; r^{-2})$

- I. ближняя зона (зона Френеля, квазистационарного область), соответствующая  $(r \ll \lambda/2\pi): r \leq 0.1\lambda/2\pi$ , в которой доминирует  $E \sim (r^{-3})$  - поле соответствует стационарному полю диполя;
- II. промежуточная зона (переходная область, индукционная область), соответствующая  $(r \sim \lambda/2\pi): 0.1\lambda/2\pi \leq r \leq 0.8\lambda/2\pi$ , в которой доминирует  $H \sim (r^{-2})$  - стационарному магнитному полю тока;
- III. дальняя зона (зона Фраунгофера, волновая зона), соответствующая расстоянию  $(r \gg \lambda/2\pi): r \geq 0.8\lambda/2\pi$ , в которой доминирует  $E \sim (r^{-1})$  и  $H \sim (r^{-1})$  - волновое поле с сферическим фронтом

граничное условие перехода от одной области к другой:  $(\lambda/2\pi r) = 1$

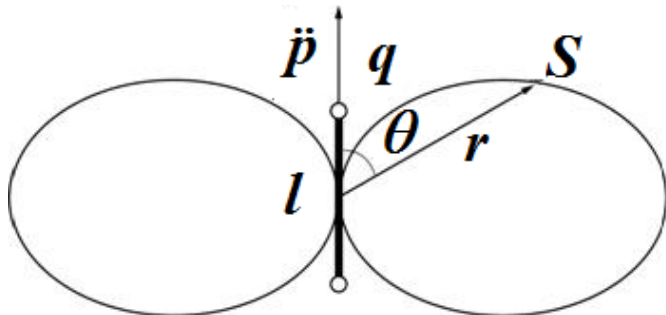
### 3. Излучение и прием электромагнитных волн

результатирующее поле диполя в различных областях —  $z = (E/H)$



### 3. Излучение и прием электромагнитных волн

результатирующее поле электрического диполя в волновой области, т.е. при  $r \gg \lambda/2\pi$  — имеет диаграмму направленности



$$p = ql$$

$$S \sim \sin^2 \theta / r^2$$

диполь  $\vec{p}_0 = q\vec{l}$  с изменяющимся по гармоническому закону моментом  $\vec{p} = \vec{p}_0 \cos \omega t$  имеет интенсивность излучения  $I = \langle \vec{S} \rangle \sim \ddot{\vec{p}}^2 \sim \omega^4$ , а общая излучаемая диполем мощность

$$P = \oiint \vec{S} d\vec{s} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left( \frac{\omega^4 p_0^2}{6\pi \varepsilon_0 c^3} \right) \cos^2(\omega t - 2\pi r/\lambda) \text{ и } \langle P \rangle = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \left( \frac{\omega^4 p_0^2}{12\pi \varepsilon_0 c^3} \right).$$

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 3. Излучение и прием электромагнитных волн

результатирующее поле магнитного диполя в волновой области, т.е. при  $r \gg \lambda/2\pi$  — имеет диаграмму направленности

магнитный диполь с  
переменным магнитным  
моментом

$$\vec{m} = \vec{m}_0 \cos \omega t$$

с максимальным значением

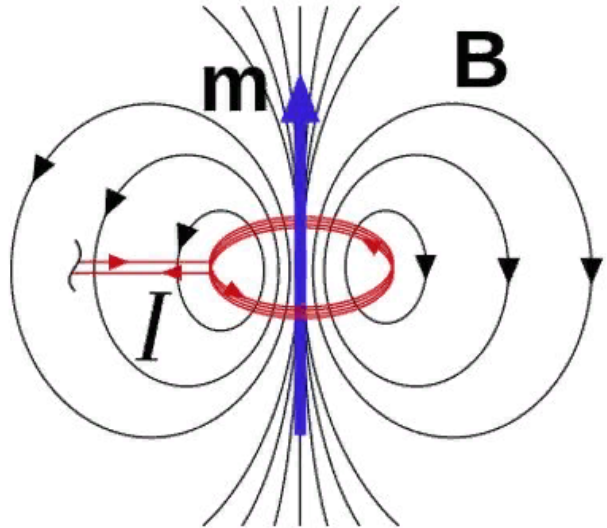
$$\vec{m}_0 = I \vec{S}$$

излучает электромагнитные  
волны интенсивностью

$$I = \langle \vec{S} \rangle \sim \ddot{\vec{m}}^2 \sim \omega^4$$

излучаемая мощность

$$\langle P \rangle \sim (\omega^4 m_0^2)$$

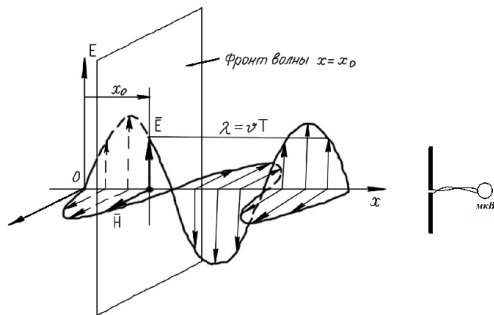


### 3. Излучение и прием электромагнитных волн

регистрация электромагнитного излучения — принимающие антенны  
 обратное включение излучающей антенны на прием излучения вблизи неё  
 позволят регистрировать электромагнитные волны;

при помещении антенны (проводника) в область распространения  
 электромагнитного излучения в ней возникает ЭДС, величина которого

- пропорциональна напряженности электромагнитного поля ( $E_m$ );
- ориентации электромагнитного поля относительно антенны;
- изменяется во времени с частотной характеристикой поля;



электрические дипольные антенны

$$\text{ЭДС} = hE_m$$

здесь  $h$  - действующая высота  
 приемной антенны;

характеристика антенны:

$A$  - эффективная площадь антенны,  
 равная отношению принимаемой  
 антенной без потерь мощности к  
 полной падающей на неё мощности



## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 3. Излучение и прием электромагнитных волн

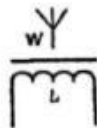
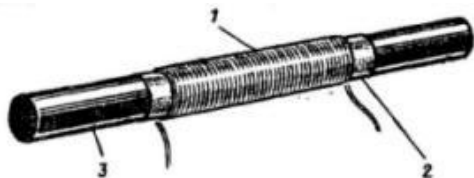
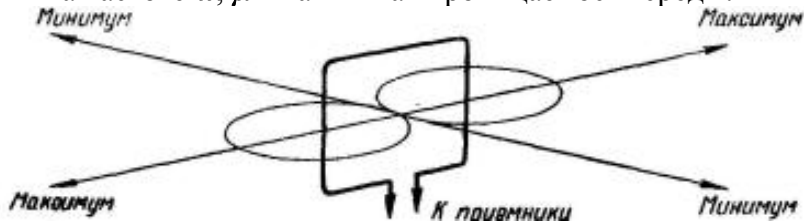
регистрация электромагнитного излучения — принимающие антенны

магнитные антенны -

на основе электромагнитной индукции Фарадея в катушке индуктивности

$$\mathcal{E}ДС = S \cdot \omega \cdot \mu \mu_0 \cdot H_m$$

здесь  $S$  - площадь катушки индуктивности,  $H_m$  - амплитуда магнитного поля волны на частоте  $\omega$ ,  $\mu$  - магнитная проницаемость среды.



Вид приемной антенны

- 1 - катушка
- 2 - изолятор
- 3 - сердечник

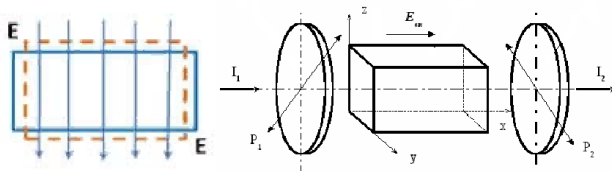
## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 3. Излучение и прием электромагнитных волн

дополнение: регистрация электромагнитного излучения —

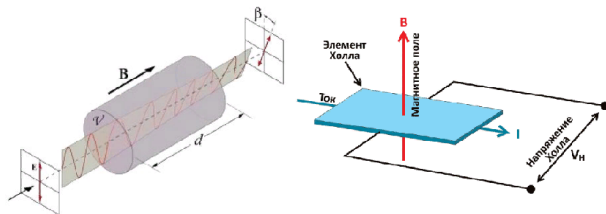
квазистационарных электрических полей (на частотах менее 3000 Гц) используется

- электрооптические эффекты
- обратный пьезоэлектрический эффект



квазистационарных магнитных полей (на частотах менее 3000 Гц) используется

- магнитооптические эффекты
- электромагнитная индукция
- эффект Холла



## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 4. Свободное распространение электромагнитных волн

распространение электромагнитной волны сопровождается всеми основными эффектами присущими волнам, в частности, *потери свободного пространства* — изменение интенсивности волны вследствие расходимости волны при удалении от источника:

- интенсивность плоской волны  $I = P_0 / S = \text{const}(r)$
- интенсивность цилиндрической волны  $I = P_0 / 2\pi r l \sim r^{-1}$
- интенсивность сферической волны  $I = P_0 / \pi r^2 \sim r^{-2}$

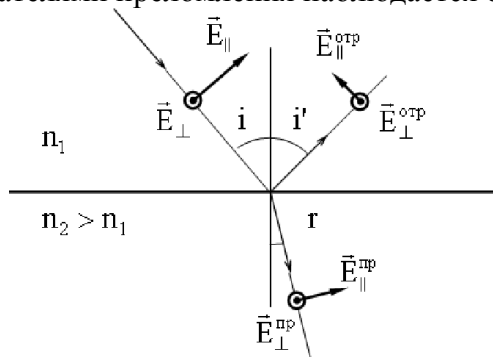
*дифракция* — отклонение от прямолинейного распространения, огибание препятствий размерами  $D$  меньших и порядка длины волны  $\lambda$  и создание тени длиной  $L = D^2 / 4\lambda$ , например, достижение радиоволн приемника за препятствием вне прямой видимости;

*интерференция* — наложение когерентных волн, приводящее к перераспределению интенсивности в волновом поле в зависимости от фазового согласования между отдельными волнами

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 4. Свободное распространение электромагнитных волн

*эффекты на границе* — отражение и преломление, формула Френеля при прохождении электромагнитной волны через границу раздела двух диэлектрических сред с разными волновыми сопротивлениями или показателями преломления наблюдается отражение и преломление волн



$$E_{\perp}^{\text{отр}} = -E_{\perp} \frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)},$$

$$E_{\perp}^{\text{пр}} = E_{\perp} \frac{2 \cos i \cdot \sin r}{\sin(i + r)},$$

$$E_{\parallel}^{\text{отр}} = E_{\parallel} \frac{\text{tg}(i - r)}{\text{tg}(i + r)},$$

$$E_{\parallel}^{\text{пр}} = E_{\parallel} \frac{2 \cos i \cdot \sin r}{\sin(i + r) \cdot \cos(i - r)}$$

определяемые граничными условиями:

неразрывностью тангенциальной  $E_t$  и нормальной  $B_n$  составляющих поля (или для  $H_t$  и  $D_n$ ) на границе не проводящих сред (нет токов);

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 4. Свободное распространение электромагнитных волн

*эффекты на границе* — отражение и преломление, формула Френеля  
коэффициенты отражения  $r$  и прохождения  $t$  по полю

для поляризации падающей волны перпендикулярно плоскости падения

$$r_{\perp} = \frac{E_{\perp}^r}{E_{\perp}^0} = \frac{(\cos \varphi / z_1) - (\cos \psi / z_2)}{(\cos \varphi / z_1) + (\cos \psi / z_2)} \quad t_{\perp} = \frac{E_{\perp}^t}{E_{\perp}^0} = \frac{2(\cos \varphi / z_1)}{(\cos \varphi / z_1) + (\cos \psi / z_2)}$$

для поляризации падающей волны параллельно плоскости падения

$$r_{\parallel} = \frac{E_{\parallel}^r}{E_{\parallel}^0} = \frac{(\cos \varphi / z_2) - (\cos \psi / z_1)}{(\cos \varphi / z_2) + (\cos \psi / z_1)} \quad t_{\parallel} = \frac{E_{\parallel}^t}{E_{\parallel}^0} = \frac{2(\cos \varphi / z_1)}{(\cos \varphi / z_2) + (\cos \psi / z_1)}$$

здесь  $\varphi$  - угол падения,  $\psi$  - угол преломления на границе двух сред с волновым сопротивлением  $z_1$  и  $z_2$ ,

в случае нормального падения  $\varphi = \psi = 0$  для напряженностей полей

$$r_E = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \quad t_E = \frac{2z_2}{z_1 + z_2} \quad \text{и} \quad r_H = -r_E = \frac{-z_1 + z_2}{z_1 + z_2} \quad t_H = \frac{2z_1}{z_1 + z_2}$$

для интенсивностей  $R = r_E r_H = \left( \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} \right)^2$   $T = t_E t_H = \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2}$  и  $R + T = 1$

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 4. Свободное распространение электромагнитных волн

*эффекты на границе* — отражение и преломление, формула Френеля при падении на границу раздела двух диэлектрических сред электромагнитного излучения произвольной поляризации - происходит изменение поляризации в отраженном и преломленном луче, что связано с различием коэффициентов отражения/преломления для излучения с поляризацией в плоскости падения и перпендикулярно ей.

*закон Брюстера* — угол Брюстера  $\operatorname{tg} \varphi_B = n_2/n_1 = (\mu_2 z_1)/(\mu_1 z_2)$  - угол падения при котором отраженная волна полностью поляризована перпендикулярно плоскости падения, т.е.  $R_{\parallel} = 0$ , а все волны поляризованные в плоскости падения проходят полностью с частью поляризованных перпендикулярно так как  $R_{\perp} \neq 1$ ;

*полное внутреннее отражение* —  $\varphi \geq \varphi_{cr} = \arcsin(n_2/n_1) = \arcsin(\mu_2 z_1/\mu_1 z_2)$  при  $n_2/n_1 = (\mu_2 z_1)/(\mu_1 z_2) < 1$ , то электромагнитная волна полностью отражается;

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 4. Свободное распространение электромагнитных волн

отражение от проводящих средах —

при нормальном падении коэффициент отражения по интенсивности

$$R = \left| \frac{\tilde{n} - 1}{\tilde{n} + 1} \right|^2 = \left| \frac{n - i\kappa/2 - 1}{n - i\kappa/2 + 1} \right|^2 = \frac{(n-1)^2 - \kappa^2/4}{(n+1)^2 - \kappa^2/4}$$

так как для электромагнитной волны низкой частоты и высоким поглощением  $\omega \ll \gamma \ll \omega_p$  имеем  $\varepsilon(\omega) \approx 1 - i(\sigma/\omega\varepsilon_0)$  и  $\tilde{n} = \sqrt{\varepsilon\mu}$ , тогда

$\tilde{n} = n - i\kappa/2 \approx \sqrt{\mu\sigma/2\omega\varepsilon_0} (1+i)$ , где  $n \approx \sqrt{\mu\sigma/2\omega\varepsilon_0}$  и  $\kappa \approx \sqrt{2\mu\sigma/\omega\varepsilon_0}$ , тогда

$$R = \left| \frac{\tilde{n} - 1}{\tilde{n} + 1} \right|^2 = \left| \frac{\sqrt{\sigma/2\omega\varepsilon_0} - 1 + i\sqrt{\sigma/2\omega\varepsilon_0}}{\sqrt{\sigma/2\omega\varepsilon_0} + 1 + i\sqrt{\sigma/2\omega\varepsilon_0}} \right|^2 = \frac{1 + \sigma/\omega\varepsilon_0 - \sqrt{2\sigma/\omega\varepsilon_0}}{1 + \sigma/\omega\varepsilon_0 + \sqrt{2\sigma/\omega\varepsilon_0}} \rightarrow 1$$

то получим почти полное отражение, так как в металлах  $\sigma \gg \omega\varepsilon_0$

при этом электромагнитная волна проникает внутрь металла на глубину

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{c}{\kappa\omega} = 1/\sqrt{2\mu\mu_0\omega\sigma}, \text{ так как } \kappa = \alpha \frac{\lambda}{2\pi} \approx \sqrt{2\sigma\mu/\omega\varepsilon_0};$$

которая определяет ослабление интенсивности в  $e$ -раз (2,71828 раза).

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 4. Свободное распространение электромагнитных волн

отражение от проводящих средах —

при отражении от плазмы электромагнитной волны высокой частоты, когда  $\gamma \ll \omega \ll \omega_p$  и  $\varepsilon(\omega) \approx 1 - (\omega_p/\omega)^2$ , то  $\varepsilon(\omega) \approx -(\omega_p/\omega)^2 < 0$  электрическая проницаемость отрицательна и комплексный показатель преломления имеет чисто мнимое значение  $\tilde{n} = \sqrt{\varepsilon\mu} = i\kappa/2 \approx i(\omega_p/\omega)$ , тогда

$$R = \left| \frac{\tilde{n} - 1}{\tilde{n} + 1} \right|^2 = \left| \frac{1 - i\kappa/2}{1 + i\kappa/2} \right|^2 = 1$$

такое отражение называется плазменным, так как наблюдается при отражении от газообразной плазмы

плазма характеризуется плазменной (лэнгмюровской) частотой

$$\omega_p = \sqrt{N_e e^2 / \varepsilon_0 m_e}$$

для газового разряда  $N_e = 10^{12} \div 10^{18} \text{ м}^{-3}$   $\omega_p = 5,7 \cdot 10^6 \div 5,7 \cdot 10^9 \text{ рад/сек}$



## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 4. Свободное распространение электромагнитных волн: дополнение

*Дебаевский радиус экранирования  $r_D$*  —

характерный пространственный масштаб  $r_D$  в плазме, электролитах или полупроводниках, на котором экранируется поле заряженной частицы за счёт накапливающегося вокруг неё облака зарядов противоположного знака [1923 П. Дебаем (P. Debye)],

$$r_D = \sqrt{\varepsilon_0 kT / N_e e^2},$$

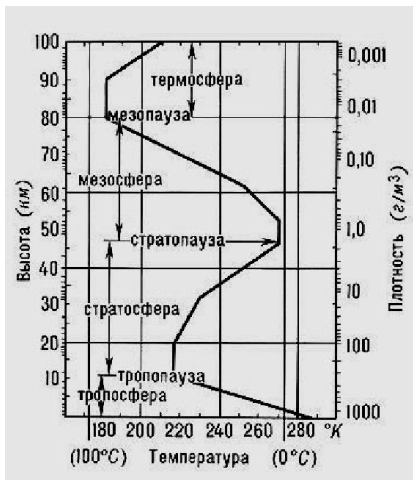
где  $T$  - температура плазмы,  $N_e$  - концентрация носителей заряда. Величина  $r_D$  зависит от свойств среды: концентрации заряженных частиц, их массы, величины заряда и скорости;  $r_D$  мал по сравнению с пространственными размерами плазмы, и она в целом является квазинейтральной. Нарушение квазинейтральности возможно в слоях толщиной порядка  $r_D$ . Такие слои возникают, например, в пограничных областях при контакте плазмы с твёрдым телом. Отрицательный потенциал в таких слоях препятствует уходу электронов из объёма плазмы на поверхность твёрдого тела;

*электромагнитная индукция*, токи Фуко (вихревые токи), возбуждение токов в металле электромагнитной волной;

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 5. Распространение электромагнитных волн в атмосфере Земли

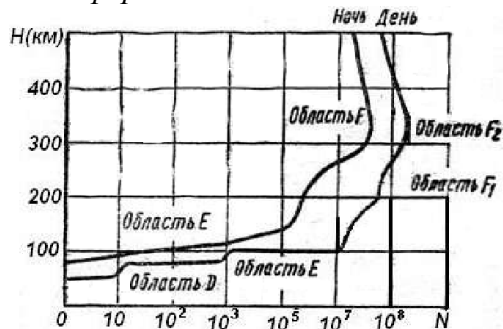
**атмосфера** (от греч. *atmos* — пар и *sphaira* — шар) — воздушная оболочка Земли (плотность у поверхности  $1,23 \text{ кг/м}^3$ ), вращающаяся вместе с ней, размещается от поверхности до космического пространства 2000-3000 км.



Атмосфера Земли. Вертикальное распределение температуры и плотности.

атмосферу условно можно разделить на тропосферу (до 12 км), стратосферу (до 50 км), мезосферу (до 80) и выше ионосферу (термосферу). Высота слоев переменная для разных точек Земли и приближительна. В тропосфере сосредоточено около 80% массы атмосферы и около 20% - в стратосфере. Плотность атмосферы в ионосфере крайне мала (менее  $10^{-5} \text{ кг/м}^3$ ), граница между ионосферой и космическим пространством является условным понятием, так как следы атмосферы встречаются даже на высотах более 400 км. Плотные слои атмосферы заканчиваются на высотах около 120 км.

## 5. Распространение электромагнитных волн в атмосфере Земли ионосфера —



ионизированная область верхних слоев атмосферы Земли, которая возникает главным образом под действием ультрафиолетового излучения Солнца, в результате чего образуются положительно заряженные ионы и свободные электроны ( $N_e$ ). Кроме того, в процессе ионизации участвуют рентгеновские лучи, излучаемые солнечной короной и корпускулярные потоки Солнца. Вследствие низкой плотности атмосферы на большой высоте, ионы и свободные электроны рекомбинируют сравнительно медленно, образуется ионизированный слой газа, находящийся в состоянии динамического равновесия.

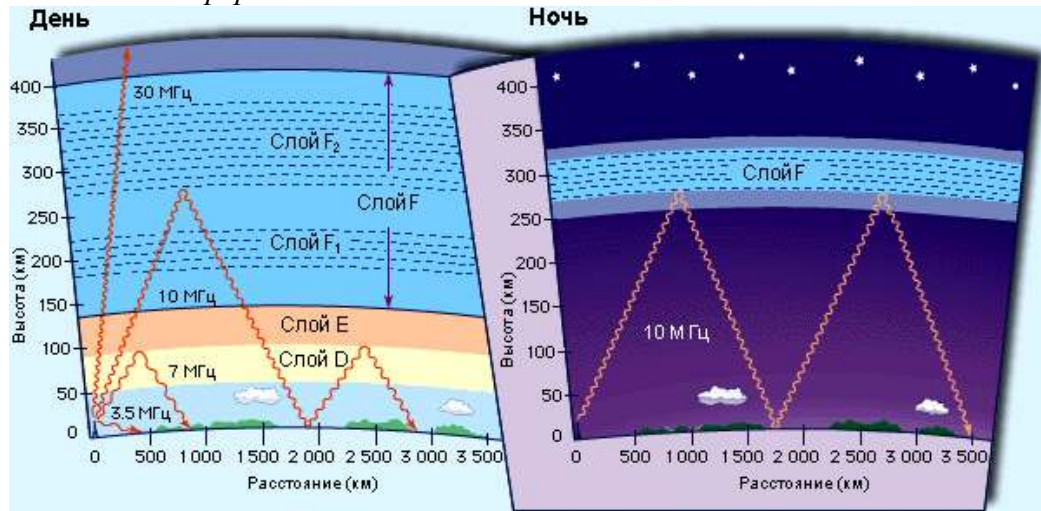
Ионосфера состоит из нескольких основных слоев, плавно переходящих один в другой:

$F_2$  (250-450 км);  $F_1$  (180-200 км);  $E$  (100-120 км);  $D$  (60-80 км).

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 5. Распространение электромагнитных волн в атмосфере Земли

влияние ионосферы на дальнюю связь —



плазменная частота  $f_p [Hz] = (\omega_p / 2\pi) = 9\sqrt{N_e [m^{-3}]}$ , и условие плазменного отражения  $f \ll f_p$  отсюда зависимость  $f$  от высоты

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 5. Распространение электромагнитных волн в атмосфере Земли

*загоризонтная радиолокационная станция* — радиолокация воздушного пространства на расстояниях вплоть до тысяч км («за горизонтом»), на основе эффект отражения коротких радиоволн (от 3 до 30 МГц) от ионосферы и поверхности земли;



радиоволны коротковолновых диапазонов, пригодных для радиолокации, неспособны огибать за счёт дифракции кривизну поверхности планеты. Из-за этого радиус действия классических РЛС ограничен радиогоризонтом.

*Например*, для радара, на мачте высотой 10 метров, горизонт составляет около 13 км (с учётом рефракции атмосферы); для целей над поверхностью земли, радиус радара увеличивается, цель на высоте 10 метров обнаруживается на около 26 км. На практике наземные надгоризонтные РЛС до нескольких сотен км.

### **6. Электромагнитные волноводы**

*направляющие системы или линии передачи* —

в электродинамике называется система тел, обеспечивающих перенос энергии электромагнитного поля в определённом направлении, в которых для направления потока энергии используют металлы (ниже оптических длин волн), распространяющаяся волна - направляемой волной (модой).

условия распространения волн в направляющих системах определяется уравнениями Максвелла и граничными условиями, задаваемыми структурой линии;

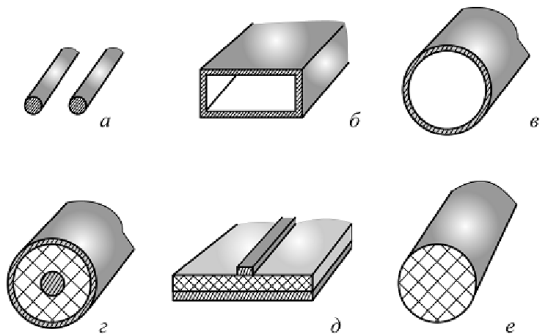
направляющие системы бывают

- открытыми (распространяются по всему пространству) или закрытыми (распространяются внутри ограниченного пространства);
- регулярными, т.е. с неизменными поперечными и продольными параметрами (однородные) или изменяющимися периодически (периодическими)

## 6. Электромагнитные волноводы

закрытые направляющие системы по пропускаемым модам делятся на

- **электрические**, формируемые на основе металлических конструкций, включающие электрические кабели (двухпроводные линии, коаксиальный кабель с частотой до 1 ГГц) и металлические волноводы с частотой до  $1000 \text{ ГГц} = 10^{12} \text{ Гц}$ ;
- **диэлектрические**, формируемые не проводящими конструкциями, включающие оптические волноводы с частотами выше  $10^{13} \text{ Гц}$ ;



а - двухпроводная линия  $< 100 \text{ кГц}$ ;

б - полые металлические прямоугольного сечения  $> 3 \text{ ГГц}$ ;

в - полые металлические круглого сечения  $> 3 \text{ ГГц}$ ;

г - коаксиальные линии передачи от  $100 \text{ кГц}$  до  $3 \text{ ГГц}$ ;

д - полосковые линии передачи выше  $10\text{-}15 \text{ ГГц}$ ;

е - диэлектрические волноводы

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 6. Электромагнитные волноводы

закрытые направляющие системы — распространение ЭМВ в волноводах определяются соотношением между длиной линии ( $l$ ) и длиной волны ( $\lambda$ ):

медный кабель  $(l/\lambda) \leq 1000$ , металлический волновод  $(l/\lambda) \geq 1000$  и оптический кабель  $(l/\lambda) \gg 1000$ ;

в волноводах могут распространяться не все волны

– в двух проводной линии при превышении 100 кГц возрастают потери вследствие излучения в свободное пространство;

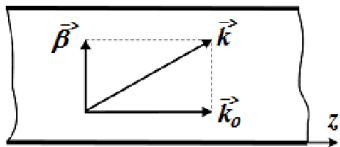
– в полых металлических волноводах условие распространения должно удовлетворять условию для волновых векторов  $\vec{k} = \vec{k}_0 + \vec{\beta}$ :  $k^2 = k_0^2 + \beta^2$

и тогда  $k_0 = \pm \sqrt{k^2 - \beta^2}$ , где  $k$  - волновое число,  $k_0$  - продольное

волновое число,  $\beta$  - поперечное волновое число; отсюда  $\lambda_{cr} = 2\pi/\beta$  при  $k_0=0$

$\lambda_0 = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{cr})^2}$ , если  $k < \beta$ , то  $k_0$

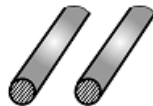
мнимое и волна затухает





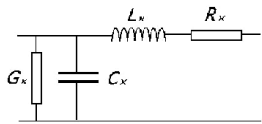
## 6. Электромагнитные волноводы

длинная линия — регулярная линия передачи, длина ( $l$ ) которой существенно превышает длину волны ( $\lambda$ ) и поперечный размер ( $d$ ), так что  $l \gg \lambda \gg d$ ,



особенность длинной линии — распространение двух встречных волн:

- падающая волна от генератора к нагрузке;
  - отраженная волна в обратную сторону от нагрузки к генератору;
- все разнообразие процессов, происходящих в длинной линии, определяется амплитудно-фазовыми соотношениями между падающей и отраженной волнами.



*примеры:* двухпроводная и коаксиальные (фидер) линии, для которых определяется

волновое сопротивление:  $Z = \sqrt{R + i\omega L / G + i\omega C}$ , где

$R, L, G, C$  - погонные сопротивление, индуктивность,

проводимость, емкость линии,  $\omega$  - циклическая частота волны;

коэффициент распространения:  $k = \alpha + i\beta = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}$ , где  $\alpha$  -

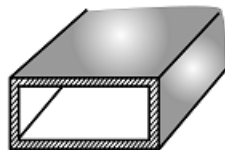
коэффициент ослабления,  $\beta$  - коэффициент фазы;

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 6. Электромагнитные волноводы

*металлические волноводы* —

полые металлические трубы различной формы в сечении, такие что их длина ( $l$ ) много больше поперечного размера ( $d = \sqrt{a^2 + b^2}$ ) и длины волны ( $\lambda$ ), при этом



$$l \gg d \geq \lambda$$

могут распространяться только собственные моды  $\lambda_{mn} \leq \lambda_{cr} = 2\pi/\beta$  для которых поперечные моды определяются выражением в волноводе с прямоугольным сечением  $a \times b$

$$\beta_{mn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

т.е. укладывается целое число половин длин волн, т.о.  $\lambda_{cr} = 2a; 2b$

затухание волны определяется поверхностными токами на границах волновода

внутри волновода электромагнитное поле имеет сложное распределение в поперечном сечении

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 6. Электромагнитные волноводы

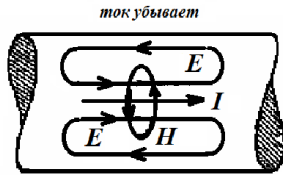
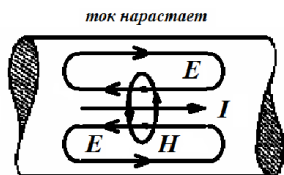
**скин-эффект** (англ. skin-effect) — явление вытеснения зарядов переменного тока из объема проводника на его поверхность при пропускании через проводник высокочастотного тока

вследствие затухания электромагнитных волн по мере их проникновения в проводящую среду, возникает явления невозможности распространения волны в объеме проводников, в результате токи проводимости существуют в тонком при поверхностном слое толщиной

$\delta = 1/\sqrt{2\mu\mu_0\omega\sigma}$ , которая зависит от проводимости, частоты электромагнитного поля и от состояния поверхности образца.

Например, для медного проводника  $\sigma=57 \text{ См/мм}^2$ ,  $\mu=1$  толщина скин-слоя

$\delta [\text{mm}] = 66,7/\sqrt{f [\text{Hz}]}$ : 50 Гц - 9,4 мм; 5 кГц - 0,94 мм, 5 МГц - 94 мкм.



объяснение -

в проводнике электроны создают токи, поле которых компенсирует внешнее поле в объеме проводника

## **7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы**

*электромагнитные ТКУИ* —

каналы утечки информации в котором выходящий из контролируемой зоны информативный сигнал имеет форму электромагнитного излучения, или квазистационарных магнитного поля вокруг проводников и электрического тока в медных кабельных системах

по форме информативного сигнала их можно разделить на два типа

- *волновые* (дальние) — информативный сигнал передается на большие расстояния посредством электромагнитных волн через свободное пространство по периметру контролируемой зоны объекта [в ТСЗИ это электромагнитные ТКУИ];
- *квазистационарные* (ближние) — информативный сигнал передается через кабельные каналы пересекающие периметр контролируемой зоны в виде электрических сигналов, а регистрация его за пределами контролируемой зоны производится посредством прямой регистрации электрических сигналов или с помощью индукционных методов [в ТСЗИ первый канал называется электрическим, а второй индукционным]

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы

характеристика электромагнитных ТКУИ — по структуре делятся на

- *пассивные*, в которых информативный сигнал формируется внутри объекта информатизации и распространяется за его пределы через свободное пространство или штатные/нештатные кабельные системы, т.е. источником информативных полей являются внутренние электронные процессы;
- *активные*, в которых информативный сигнал формируется путем зондирования электромагнитным излучением частей или элементов внутри объекта информатизации через свободное пространство или штатные/нештатные кабельные системы, т.е. источником информативных полей является модулированное зондирующее поле (такие ТКУИ, как правило, называются высокочастотным навязыванием);



## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### **7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы волновой (дальний)** — электромагнитный ТКУИ

является одним из самых опасных каналов, так как связан с электромагнитными излучениями вблизи радиодиапазона, особенностью которого является

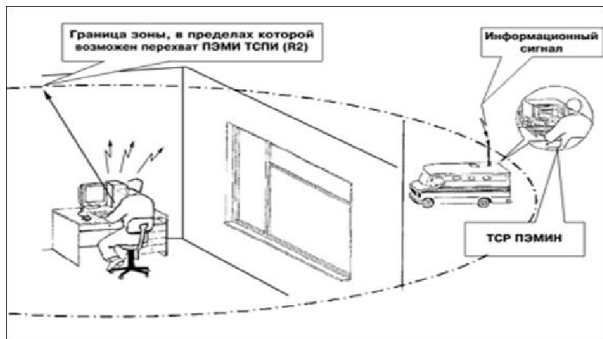
- широкий спектр излучаемых частот от НЧ (кГц) до СВЧ (ГГц);
- высокая проникающая способность во всем спектре частот;
- электромагнитные излучения являются носителями информации о процессах проходящих на объектах, в первую очередь, о работе электронного оборудования в виде побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН);

любой проводник с переменным током является источником ЭМИ, причем основная частота излучения соответствует частоте модуляции тока например, аналоговый телефонный сигнал - характерная частота 1 кГц (длина волны 300 км), излучаемая мощность пропорциональна квадрату тока в проводнике, при таких значениях перехват телефонного трафика возможен на сотнях км.

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы

**квастационарный (ближний)** — индукционный и электрический ТКУИ связан с передачей сигналов по электрическим проводам, сигнал с которого может быть зарегистрирован либо прямым подключением к проводнику или через индукционно связанные проводники, особенностью канала является



- работает в ближней зоне источника излучения, т.е. на расстояниях порядка длины волны  $\lambda$ ;
- требуется максимальная близость к кабелю, по крайней мере нахождение в переходной зоне излучателя;
- ограниченный

в зависимости от расстояния по спектру информативный сигнал (до 100 МГц), сигналы с более высокой частотой быстро затухают;

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### **7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы** *информативный параметр* —

основными информативными параметрами является амплитуда и частота излучения

другие информативные параметры электромагнитного излучения:  
модуляция амплитуды, поляризации, частоты и фазы



## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы

*общая характеристика методов защиты техническими средствами* — целью защиты является предотвращение утечки информации, которое достигается путем применения технических средств защиты информации

ТСЗИ можно разделить на

- *активные*, в которых предотвращение утечки достигается путем электромагнитного зашумления защищаемого сигнала, т.е. путем постановки помехи не позволяющей регистрировать информативный сигнал;
- *пассивные*, в которых производится ослабление выходящих информативных полей путем поглощения, отражения, рассеяния информационного сигнала при пересечении периметра контролируемой зоны

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы

активные методы защиты —

электромагнитное зашумление, постановка помех

условия зашумления

интенсивность шума выше

интенсивности

информативного сигнала в

пределах контролируемой

зоны



Создание шумовых помех в инженерных коммуникациях

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### **7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы**

*пассивные методы защиты* — электромагнитные экраны

экранирование – локализация или ослабление энергии электромагнитного поля в определенном пространстве за счет ограничения распространения электромагнитного излучения путем поглощения, рассеяния; отражения, преломления; расхождения; интерференции и дифракции; целью электромагнитного экранирования является

- защита человека от воздействия электромагнитного излучения;
- защита каналов связи, аппаратуры, приборов, частей приборов от электромагнитных помех естественной и искусственной природы;
- защита информации от формирования каналов утечки из информационных систем и телекоммуникаций на основе электромагнитных излучений;

различают

электростатическое экранирование (на частотах менее 3000 Гц);

магнитостатическое экранирование (на частотах менее 3000 Гц);

электромагнитное экранирование (на частотах свыше 3000 Гц);

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы

*пассивные методы защиты* — электромагнитные экраны —

устройство, элемент конструкции или совокупность элементов устройств, предназначенных для получения эффекта экранирования,

эффективность экранирования определяется по отношению уровня электромагнитного поля в некоторой точке пространства без экрана к уровню электромагнитного поля при наличии экрана, для чего используются

*коэффициент экранирования* — отношение амплитуд напряженностей электромагнитного поля в некоторой точке пространства без экрана к уровню при наличии экрана:

$$K_H = (H/H_0), \quad K_E = (E/E_0)$$

*показатель эффективности экранирования*  $S$  вычисляют по формулам:

$$S_H = 20 \lg(H/H_0), \quad S_E = 20 \lg(E/E_0), \quad S_I = 10 \lg(I/I_0)$$

где  $H$  (А/м),  $E$  (В/м),  $I$  (ВА/м<sup>2</sup>) - соответственно напряженность магнитного ( $H$ ), электрического ( $E$ ) полей или плотность потока мощности ( $I$ ) в заданной точке при отсутствии экрана,  $H_0$ ,  $E_0$ ,  $I_0$  - то же при наличии экрана.

**7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы**  
 пассивные методы защиты —

эффективность экранирования определяется как сумму потерь

$$S = S_D + S_R + S_M, \text{ где}$$

$S_D$  - за счет поглощения ЭМИ в объеме материала толщиной  $d$  с глубиной проникновения  $\delta$ :

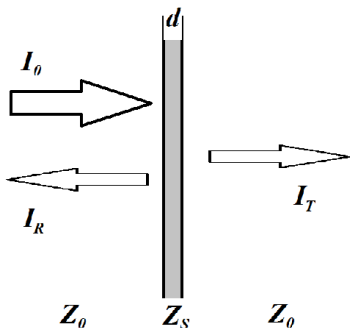
$$S_D = 10 \lg(I/I_0) = 10 \lg(e^{d/\delta}) = 4.34 \cdot (d/\delta)$$

$S_R$  - за счет отражения ЭМИ от двух поверхностей экрана с волновым сопротивлением  $Z_S$  находящегося в среде с волновым сопротивлением  $Z_0$ :

$$S_R = 2 \cdot 10 \lg \left( (Z_0 + Z_S)^2 / 4Z_0Z_S \right)$$

$S_I$  - за счет многократных внутренних отражений:

$$S_M = 2 \cdot 10 \lg \left( 1 - e^{-d/\delta} (Z_0 - Z_S)^2 / (Z_0 + Z_S)^2 \right)$$



## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы пассивные методы защиты — электромагнитные экраны



*электромагнитное экранирование*, осуществляется с помощью экрана из материала с высокой электропроводностью, эффект достигается благодаря влиянию вихревых токов, индуцируемых в материале экрана за счет энергии поля помех, возникающие токи образуют магнитные потоки, противоположные магнитному потоку самой катушки, в результате чего в пространстве вне экрана получается суммарный магнитный поток, меньший, чем при отсутствии экрана.

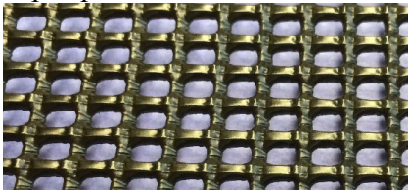
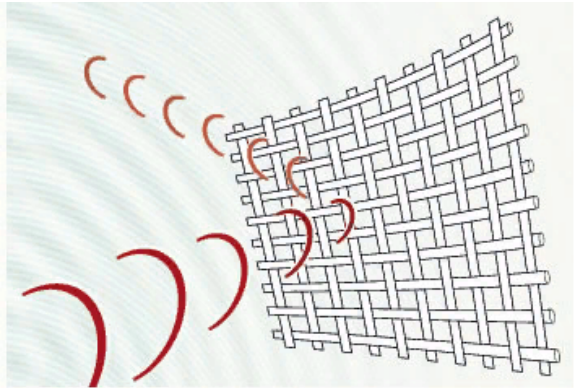
эффективность экранирования зависит от частоты, от материала и толщины экрана.

экраны изготавливают из немагнитных и ферромагнитных металлов, что дает одновременное ослабление электрической и магнитной составляющих поля.

## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### 7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы пассивные методы защиты — электромагнитные экраны изготавливаются из

- металлических материалов, в том числе сеточные и фольговые материалы;
- металлизация поверхностей;
- стекла с токопроводящими покрытиями;
- специализированные ткани с металлизированными нитями;
- токопроводящие краски;
- электропроводящий клей



## Лекция 4. Электромагнитное излучение

### *Вопросы к лекции*

1. Электромагнитное поле и его характеристики: силовые характеристики (напряженность и индукция), уравнения Максвелла, волновой пакет, структура волны, поляризация, энергия и интенсивность, поглощение;
2. Физическая среда в распространении электромагнитной волны: электрическая и магнитная проницаемость, показатели преломления и поглощения, волновое сопротивление, идеальная среда (вакуум), магнетики, проводники и диэлектрики, дисперсия электромагнитной волны в проводниках и диэлектриках, плазменная частота;
3. Излучение и прием электромагнитных волн: переменный электрический и магнитный диполь, ближняя и дальняя зона излучения диполя, приемная антенна;
4. Свободное распространение электромагнитных волн: потери свободного пространства, дифракция и интерференция, отражение и преломление (формула Френеля), отражение от проводников;
5. Распространение электромагнитных волн в атмосфере Земли: структура атмосферы, влияние ионосферы, загоризонтная радиолокация;



#### Лекция 4. Электромагнитное излучение

6. Электромагнитные волноводы: типы линий передач, моды волновода, длинная линия, металлические волноводы, скин-эффект;
7. Электромагнитные каналы утечки информации и методы борьбы: волновые (дальние) и квазистационарные (ближние) ТКУИ, пассивные и активные ТКУИ, характеристика методов технических средств защиты информации (активные и пассивные),