**СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича**

# *Основы инфокоммуникационных систем*

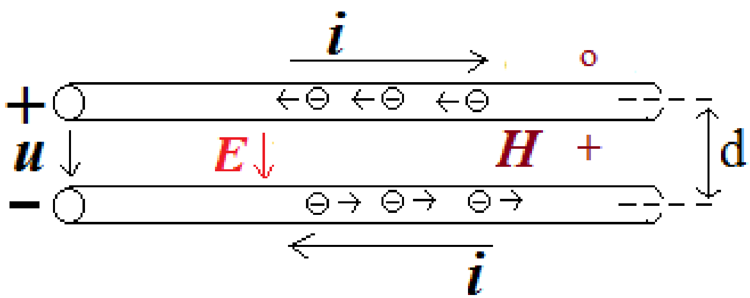
**2016 г.**

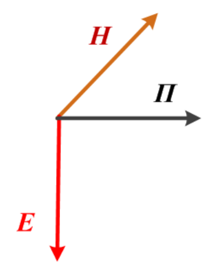
# Физические каналы

## Радиоканал

# Основные понятия

***Электромагнитное колебание*** - взаимосвязанные колебания электрического (***E***) и магнитного (***H***) полей, составляющих единое электромагнитное поле. Скорость движения электромагнитного колебания в вакууме **299 792 458** м/с (300 000 000 м/с).



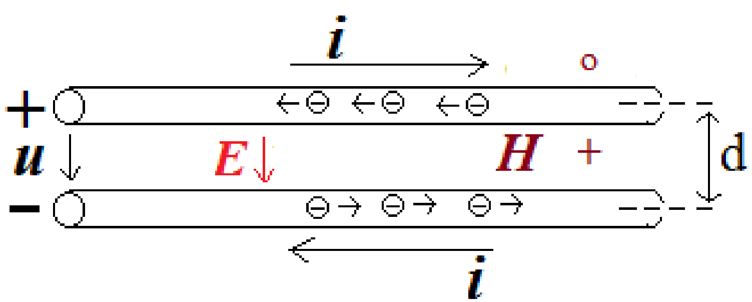



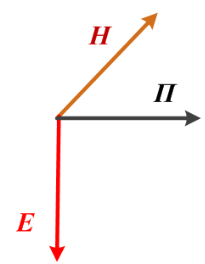

*Плотность мощности* - П;

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} = \frac{В}{м} \cdot \frac{А}{м} \right\rangle;$$

# Основные понятия

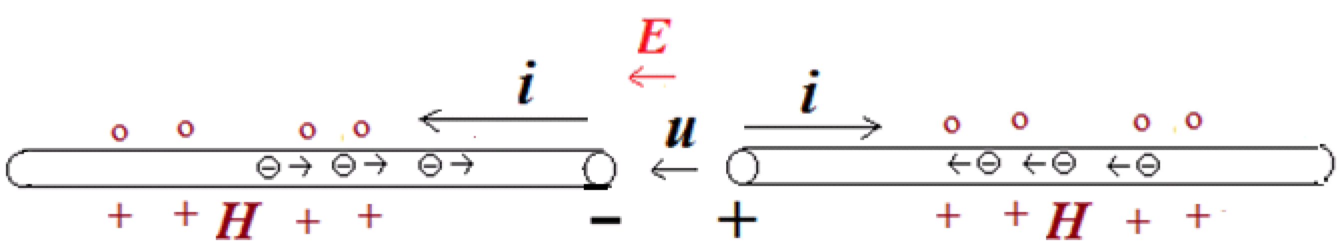
***Электромагнитное колебание*** - взаимосвязанные колебания электрического (***E***) и магнитного (***H***) полей, составляющих единое электромагнитное поле. Скорость движения электромагнитного колебания в вакууме **299 792 458** м/с (300 000 000 м/с).



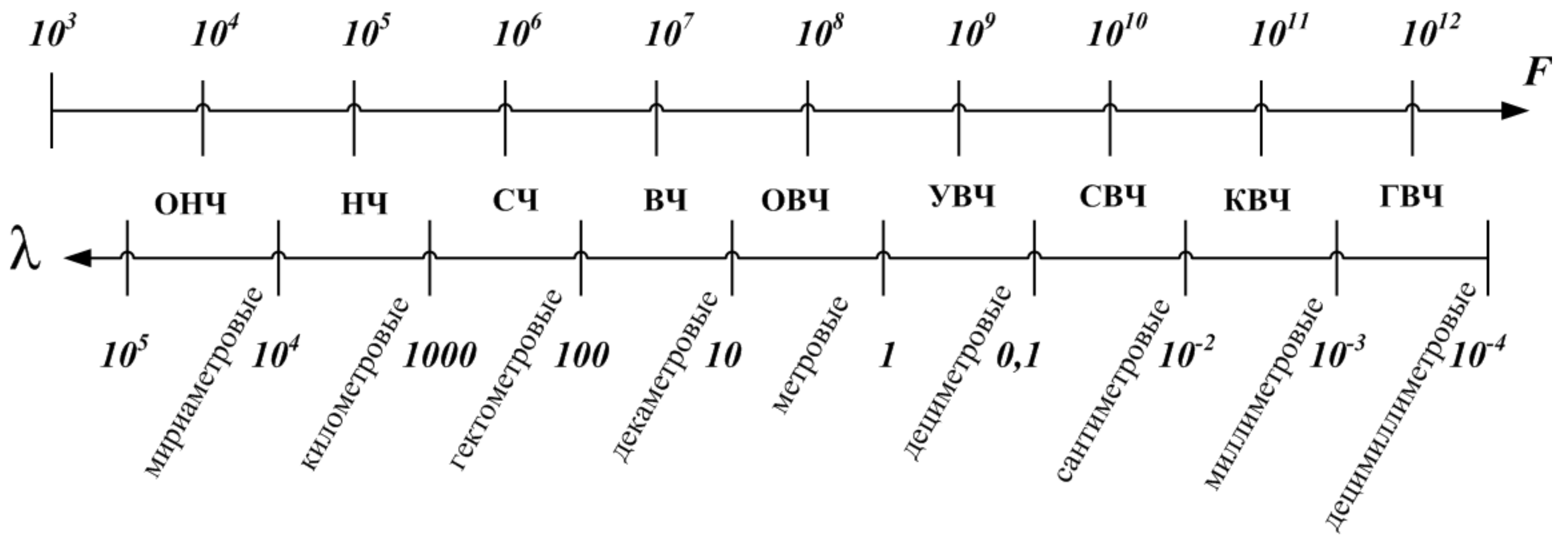




*Плотность мощности* - П;

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \times \vec{H} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} = \frac{В}{м} \cdot \frac{А}{м} \right\rangle;$$

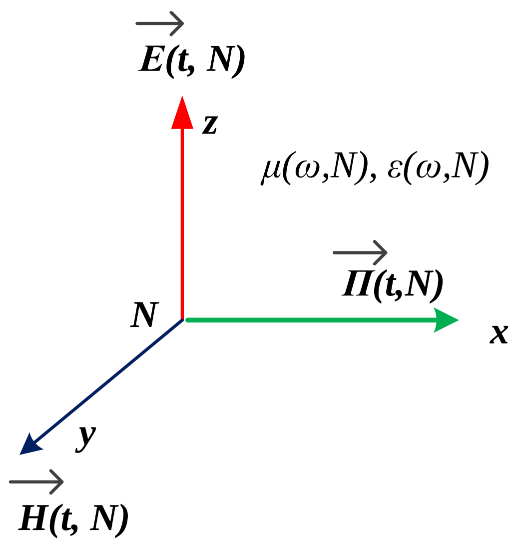


# Диапазоны радиоволн



# Основные понятия

Электромагнитное поле в любой точке среды ***N*** с координатами $x_N$, $y_N$, $z_N$ определяется векторными величинами: напряженностью электрической составляющей ***E(t,N) В/м*** и напряженностью магнитной составляющей ***H(t,N) А/м***




$$\vec{П}(t,N) = \vec{E}(t,N) \cdot \vec{H}(t,N) \qquad Вт/м^2$$

Вектор Пойнтинга определяет плотность мгновенной мощности электромагнитного поля в точке ***N***

# Основные понятия

***Показатели среды распространения ЭМВ***

Магнитная проницаемость - $\underline{\mu}(\omega,N)$ *Гн/м*;
Диэлектрическая проницаемость - $\underline{\varepsilon}(\omega,N)$ *Ф/м;*
Удельная электропроводимость - $\sigma(\omega,N)$ *См/м*.

Вакуум характеризуется значениями:

$\underline{\mu}(\omega) = \mu_0 = 4\cdot\pi\cdot10^{-7}$ *Гн/м*;
$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_0 = 10^{-9}/36\cdot\pi$;
$\sigma(\omega) = \sigma_0 = 0$,

Обобщенная форма комплексной диэлектрической проницаемости

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon(\omega) - j\cdot\frac{\sigma(\omega)}{\omega} = \varepsilon(\omega)\cdot\left[1 - j\cdot\frac{\sigma(\omega)}{\omega\cdot\varepsilon(\omega)}\right]$$

# Основные понятия

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon(\omega) - j \cdot \frac{\sigma(\omega)}{\omega} = \varepsilon(\omega) \cdot \left[ 1 - j \cdot \frac{\sigma(\omega)}{\omega \cdot \varepsilon(\omega)} \right]$$

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \left| \underline{\varepsilon}(\omega) \right| \cdot e^{-j \cdot \delta(\omega)}; \quad \left| \underline{\varepsilon}(\omega) \right| = \varepsilon(\omega) \cdot \sqrt{1 + \left[ \frac{\sigma(\omega)}{\omega \cdot \varepsilon(\omega)} \right]^2}, \quad \delta(\omega) = \arg tg \left[ \frac{\sigma(\omega)}{\omega \cdot \varepsilon(\omega)} \right]$$

# Основные понятия

**Таблица - Электрофизические параметры сред (частоты 0,1… 1,0 ГГц)**

| **Материал** | $\varepsilon_{от}$ | **σ См/м** |
|---|---|---|
| Бетон | 2…10 | $(2{,}5 \ldots 3{,}5)\cdot 10^{-2}$ |
| Асбест | 2…4 | $2{,}5\cdot 10^{-3}$ |
| Кирпич | 2,5÷3,0 | $(7\div 8)\cdot 10^{-3}$ |
| Асфальт | 3.18 | $10^{-3}$ |
| Сухая земля | 4÷7 | $10^{-3}$ |
| Мокрая земля | 25÷30 | $2\cdot 10^{-2}$ |
| Морская вода при 20°C | 80 | 4.3 |
| Пресная вода | 81 | $10^{-2}\div 10^{-3}$ |

# Основные понятия

В теории распространения ЭМВ вводится комплексная функция - $\underline{\gamma}(\omega)$, значение которой принято называть "***постоянной распространения***":

$$\underline{\gamma}^2(\omega) = \omega^2 \cdot \underline{\mu} \cdot \underline{\varepsilon} = \omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon \cdot [1 - j \cdot tg(\delta)] = \omega^2 \cdot \frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)} \cdot e^{-j\delta} \quad (1/\text{м});$$

# Основные понятия

В теории распространения ЭМВ вводится комплексная функция - $\underline{\gamma}(\omega)$, значение которой принято называть "***постоянной распространения***":

$$\underline{\gamma}^2(\omega) = \omega^2 \cdot \underline{\mu} \cdot \underline{\varepsilon} = \omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon \cdot [1 - j \cdot tg(\delta)] = \omega^2 \cdot \frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)} \cdot e^{-j\delta} \quad (1/\text{м});$$

$$\underline{\gamma}(\omega) = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\delta}{2}} = \alpha - j \cdot \beta \qquad (1/\text{м})\ ;$$

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1 + \cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} > 0; \quad \beta = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} \geq 0.$$

$$V_{эм} = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos(\delta)}{1 + \cos(\delta)}}$$

$$V_{эм} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\mu_{от} \cdot \varepsilon_{от}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon_{от}}}$$

# Основные понятия

В теории распространения ЭМВ вводится комплексная функция - $\underline{\gamma}(\omega)$, значение которой принято называть "***постоянной распространения***":

$$\underline{\gamma}^2(\omega) = \omega^2 \cdot \underline{\mu} \cdot \underline{\varepsilon} = \omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon \cdot [1 - j \cdot tg(\delta)] = \omega^2 \cdot \frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)} \cdot e^{-j\delta} \quad (1/\text{м});$$

$$\underline{\gamma}(\omega) = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\delta}{2}} = \alpha - j \cdot \beta \qquad (1/\text{м})\ ;$$

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1+\cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} > 0; \quad \beta = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1-\cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} \geq 0.$$

$$V_{эм} = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos(\delta)}{1+\cos(\delta)}}$$

$$V_{эм} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\mu_{om} \cdot \varepsilon_{om}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon_{om}}}$$

# Основные понятия

В теории распространения ЭМВ вводится комплексная функция - $\underline{\gamma}(\omega)$, значение которой принято называть "***постоянной распространения***":

$$\underline{\gamma}^2(\omega) = \omega^2 \cdot \underline{\mu} \cdot \underline{\varepsilon} = \omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon \cdot [1 - j \cdot tg(\delta)] = \omega^2 \cdot \frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)} \cdot e^{-j\delta} \quad (1/\text{м});$$

$$\underline{\gamma}(\omega) = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\delta}{2}} = \alpha - j \cdot \beta \qquad (1/\text{м})\ ;$$

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1+\cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} > 0; \quad \beta = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1-\cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} \geq 0.$$

$$V_{эм} = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos(\delta)}{1+\cos(\delta)}}$$

$$V_{эм} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\mu_{от} \cdot \varepsilon_{от}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon_{от}}}$$

# Основные понятия

В теории распространения ЭМВ вводится комплексная функция - $\underline{\gamma}(\omega)$, значение которой принято называть "***постоянной распространения***":

$$\underline{\gamma}^2(\omega) = \omega^2 \cdot \underline{\mu} \cdot \underline{\varepsilon} = \omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon \cdot [1 - j \cdot tg(\delta)] = \omega^2 \cdot \frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)} \cdot e^{-j\delta} \quad (1/\text{м});$$

$$\underline{\gamma}(\omega) = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\delta}{2}} = \alpha - j \cdot \beta \qquad (1/\text{м})\ ;$$

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1 + \cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} > 0; \quad \beta = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} \geq 0.$$

$$V_{эм} = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \cos(\delta)}{1 + \cos(\delta)}}$$

$$V_{эм} = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\mu_{от} \cdot \varepsilon_{от}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon_{от}}}$$

# Основные понятия

***Абсолютный показатель преломления среды***:

$$n_{эм} = \frac{3 \cdot 10^8}{V_{эм}} = \sqrt{\mu_{от} \cdot \varepsilon_{от}} \geq 1$$

# Основные понятия

***Абсолютный показатель преломления среды***:

$$n_{эм} = \frac{3 \cdot 10^8}{V_{эм}} = \sqrt{\mu_{от} \cdot \varepsilon_{от}} \geq 1$$

***Волновое сопротивление среды***

$$\underline{Z}_w(\omega) = \sqrt{\frac{\mu(\omega)}{\underline{\varepsilon}(\omega)}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{om}(\omega)}{\varepsilon_{om}(\omega)} \cdot \cos[\delta(\omega)]} \cdot e^{j\frac{\delta(\omega)}{2}} = 120 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\mu_{om}(\omega)}{\varepsilon_{om}(\omega)} \cdot \cos[\delta(\omega)]} \cdot e^{j\frac{\delta(\omega)}{2}}, \quad Ом.$$

# Основные понятия

***Абсолютный показатель преломления среды***:

$$n_{эм} = \frac{3 \cdot 10^8}{V_{эм}} = \sqrt{\mu_{om} \cdot \varepsilon_{om}} \geq 1$$

***Волновое сопротивление среды***

$$\underline{Z}_w(\omega) = \sqrt{\frac{\mu(\omega)}{\underline{\varepsilon}(\omega)}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{om}(\omega)}{\varepsilon_{om}(\omega)} \cdot \cos[\delta(\omega)]} \cdot e^{j\frac{\delta(\omega)}{2}} = 120 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\mu_{om}(\omega)}{\varepsilon_{om}(\omega)} \cdot \cos[\delta(\omega)]} \cdot e^{j\frac{\delta(\omega)}{2}}, \quad Ом.$$

$$Z_{0,w}(\omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\frac{10^{-9}}{36 \cdot \pi}}} = 120 \cdot \pi, \quad Ом.$$

# Основные понятия

***Абсолютный показатель преломления среды*:**

$$n_{эм} = \frac{3 \cdot 10^8}{V_{эм}} = \sqrt{\mu_{от} \cdot \varepsilon_{от}} \geq 1$$

***Волновое сопротивление среды***

$$\underline{Z}_w(\omega) = \sqrt{\frac{\mu(\omega)}{\underline{\varepsilon}(\omega)}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{от}(\omega)}{\varepsilon_{от}(\omega)} \cdot \cos[\delta(\omega)]} \cdot e^{j\frac{\delta(\omega)}{2}} = 120 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\mu_{от}(\omega)}{\varepsilon_{от}(\omega)} \cdot \cos[\delta(\omega)]} \cdot e^{j\frac{\delta(\omega)}{2}}, \quad Ом.$$

$$Z_{0,w}(\omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{\frac{10^{-9}}{36 \cdot \pi}}} = 120 \cdot \pi, \quad Ом.$$

При $\delta(\omega) \approx 0$ радиоканал не вносит потерь в электромагнитное колебание

$$\boxed{Z_w \approx \frac{120 \cdot \pi}{n_{эм}} = \frac{Z_{0.w}}{n_{эм}}, \quad Ом.}$$

# Основные понятия

Мнимая часть постоянной распространения – $\underline{\gamma}(\omega)$, определяет потери мощности колебания при распространении электромагнитного поля.

$$\underline{\gamma}(\omega) = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\delta}{2}} = \alpha - j \cdot \beta \quad ; \qquad \beta = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} \geq 0.$$

# Основные понятия

Мнимая часть постоянной распространения – ***$\underline{\gamma}(\omega)$***, определяет потери мощности колебания при распространении электромагнитного поля.

$$\underline{\gamma}(\omega) = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\delta}{2}} = \alpha - j \cdot \beta \quad ; \qquad \beta = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1-\cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} \geq 0.$$

В диэлектрических средах с малыми потерями [*cos(δ)≈1*]

$$\beta \approx 0,5 \cdot \delta \cdot \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} = 0,5 \cdot Z_w \cdot \sigma \ \geq 0$$

# Основные понятия

Мнимая часть постоянной распространения – $\underline{\gamma}(\omega)$, определяет потери мощности колебания при распространении электромагнитного поля.

$$\underline{\gamma}(\omega) = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\delta}{2}} = \alpha - j \cdot \beta \quad ; \qquad \beta = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1 - \cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} \geq 0.$$

В диэлектрических средах с малыми потерями [$cos(\delta) \approx 1$]

$$\beta \approx 0{,}5 \cdot \delta \cdot \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} = 0{,}5 \cdot Z_w \cdot \sigma \geq 0$$

Вторичные параметры диэлектрических сред с малыми потерями связаны между собой следующим соотношением

$$\beta \cdot V_{эм} \approx 0{,}5 \cdot \omega \cdot \delta$$

# Основные понятия

Мнимая часть постоянной распространения – $\underline{\gamma}(\omega)$, определяет потери мощности колебания при распространении электромагнитного поля.

$$\underline{\gamma}(\omega) = \omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \varepsilon}{\cos(\delta)}} \cdot e^{-j \cdot \frac{\delta}{2}} = \alpha - j \cdot \beta \quad ; \qquad \beta = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{1-\cos(\delta)}{2 \cdot \cos(\delta)}} \geq 0.$$

В диэлектрических средах с малыми потерями [$cos(\delta) \approx 1$]

$$\beta \approx 0{,}5 \cdot \delta \cdot \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} = 0{,}5 \cdot Z_w \cdot \sigma \ \geq 0$$

Вторичные параметры диэлектрических сред с малыми потерями связаны между собой следующим соотношением

$$\beta \cdot V_{эм} \approx 0{,}5 \cdot \omega \cdot \delta$$

$$\underline{\gamma}(\omega) = \alpha - j \cdot \beta = \frac{\omega}{V_{эм}} - j \cdot \frac{\omega}{V_{эм}} \cdot \frac{\delta}{2} \quad ;$$

# Однородная среда

***Однородная среда*** характеризуется постоянством электрофизических величин в любой точке среды распространения электромагнитных волн $\underline{\mu}(\omega, N) = \underline{\mu}(\omega)$, $\underline{\varepsilon}(\omega, N) = \underline{\varepsilon}(\omega)$.

# Однородная среда

***Однородная среда*** характеризуется постоянством электрофизических величин в любой точке среды распространения электромагнитных волн $\underline{\mu}(\omega,N)= \underline{\mu}(\omega)$, $\underline{\varepsilon}(\omega,N)= \underline{\varepsilon}(\omega)$.

Электрическая напряженность поля плоской гармонической электромагнитной волны с частотой - $\omega$, распространяющейся в направлении $r = x$, от выбранной начальной точки ($r = 0$)

$$\underline{E}(t,\omega,r)=\underline{E}(\omega,r)\cdot e^{j\cdot\omega\cdot t}$$

# Однородная среда

***Однородная среда*** характеризуется постоянством электрофизических величин в любой точке среды распространения электромагнитных волн $\underline{\mu}(\omega,N)$= $\underline{\mu}(\omega)$, $\underline{\varepsilon}(\omega,N)$= $\underline{\varepsilon}(\omega)$.

Электрическая напряженность поля плоской гармонической электромагнитной волны с частотой - ***ω***, распространяющейся в направлении ***r*** = ***x***, от выбранной начальной точки (***r*** = ***0***)

$$\underline{E}(t,\omega,r)=\underline{E}(\omega,r)\cdot e^{j\cdot\omega\cdot t}$$

$$\underline{E}(\omega,r)=\underline{E}(\omega.0)\cdot e^{-j\cdot\underline{\gamma}(\omega)\cdot r}=\underline{E}(\omega.0)\cdot e^{-j\cdot\alpha(\omega)\cdot r}\cdot e^{-\beta(\omega)\cdot r}\cdot$$

# Однородная среда

*Однородная среда* характеризуется постоянством электрофизических величин в любой точке среды распространения электромагнитных волн $\underline{\mu}(\omega,N)=\underline{\mu}(\omega)$, $\underline{\varepsilon}(\omega,N)=\underline{\varepsilon}(\omega)$.

Электрическая напряженность поля плоской гармонической электромагнитной волны с частотой - ***ω***, распространяющейся в направлении ***r*** = ***x***, от выбранной начальной точки (***r*** = ***0***)

$$\underline{E}(t,\omega,r)=\underline{E}(\omega,r)\cdot e^{j\cdot\omega\cdot t}$$

$$\underline{E}(\omega,r)=\underline{E}(\omega.0)\cdot e^{-j\cdot\underline{\gamma}(\omega)\cdot r}=\underline{E}(\omega.0)\cdot e^{-j\cdot\alpha(\omega)\cdot r}\cdot e^{-\beta(\omega)\cdot r}\cdot$$

$$\underline{E}(\omega,r)=\underline{E}(\omega,0)\cdot e^{-\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot\frac{\delta}{2}\cdot r}\cdot e^{-j\cdot\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot r}$$

# Однородная среда

***Однородная среда*** характеризуется постоянством электрофизических величин в любой точке среды распространения электромагнитных волн $\underline{\mu}(\omega,N)$= $\underline{\mu}(\omega)$, $\underline{\varepsilon}(\omega,N)$= $\underline{\varepsilon}(\omega)$.

Электрическая напряженность поля плоской гармонической электромагнитной волны с частотой - ***ω***, распространяющейся в направлении ***r*** = ***x***, от выбранной начальной точки (***r*** = ***0***)

$$\underline{E}(t,\omega,r) = \underline{E}(\omega,r)\cdot e^{j\cdot\omega\cdot t}$$

$$\underline{E}(\omega,r) = \underline{E}(\omega.0)\cdot e^{-j\cdot\underline{\gamma}(\omega)\cdot r} = \underline{E}(\omega.0)\cdot e^{-j\cdot\alpha(\omega)\cdot r}\cdot e^{-\beta(\omega)\cdot r}\cdot$$

$$\underline{E}(\omega,r) = \underline{E}(\omega,0)\cdot e^{-\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot\frac{\delta}{2}\cdot r}\cdot e^{-j\cdot\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot r}$$

$$\underline{E}(t,\omega,r) = \underline{E}(\omega,r)\cdot e^{j\cdot\omega\cdot t} = \underline{E}_0(\omega,0)\cdot e^{-\pi\cdot\delta\frac{r}{\lambda}}\cdot e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot\frac{r}{\lambda}} = \underline{E}(\omega,0)\cdot e^{-\pi\cdot\delta\cdot\tau_r}\cdot e^{j\cdot 2\cdot\pi\cdot(t-\tau_r)}$$

# Однородная среда

$$\underline{E}(\omega,r)=\underline{E}(\omega,0)\cdot e^{-\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot\frac{\delta}{2}\cdot r}\cdot e^{-j\cdot\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot r}=\underline{E}(\omega,0)\cdot e^{-\pi\cdot\delta\frac{r}{\lambda}}\cdot e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot\frac{r}{\lambda}}$$

Модуль плотности мощности поля плоской гармонической электромагнитной волны

$$\Pi(\omega,r)=E(\omega,r)\cdot H(\omega,r)=\frac{E^2(\omega,r)}{Z_w};$$

# Однородная среда

$$\underline{E}(\omega,r)=\underline{E}(\omega,0)\cdot e^{-\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot\frac{\delta}{2}\cdot r}\cdot e^{-j\cdot\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot r}=\underline{E}(\omega,0)\cdot e^{-\pi\cdot\delta\frac{r}{\lambda}}\cdot e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot\frac{r}{\lambda}}$$

Модуль плотности мощности поля плоской гармонической электромагнитной волны

$$\Pi(\omega,r)=E(\omega,r)\cdot H(\omega,r)=\frac{E^2(\omega,r)}{Z_w};$$

Передаточная функция плотности мощности плоской электромагнитной волны

$$T_{\Pi}(\omega,r)=\frac{\Pi(\omega,r)}{\Pi(\omega,0)}=e^{-2\cdot\pi\cdot\delta\frac{r}{\lambda}};\quad \Pi(\omega,0)=\frac{E^2(\omega,r)}{Z_w}$$

# Однородная среда

$$\underline{E}(\omega,r)=\underline{E}(\omega,0)\cdot e^{-\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot\frac{\delta}{2}\cdot r}\cdot e^{-j\cdot\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot r}=\underline{E}(\omega,0)\cdot e^{-\pi\cdot\delta\frac{r}{\lambda}}\cdot e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot\frac{r}{\lambda}}$$

Модуль плотности мощности поля плоской гармонической электромагнитной волны

$$\Pi(\omega,r)=E(\omega,r)\cdot H(\omega,r)=\frac{E^2(\omega,r)}{Z_w};$$

Передаточная функция плотности мощности плоской электромагнитной волны

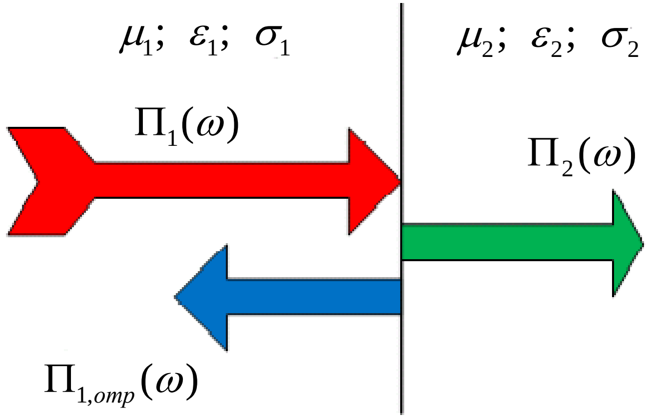
$$T_{\Pi}(\omega,r)=\frac{\Pi(\omega,r)}{\Pi(\omega,0)}=e^{-2\cdot\pi\cdot\delta\frac{r}{\lambda}};\quad \Pi(\omega,0)=\frac{E^2(\omega,r)}{Z_w}$$

Логарифмическая функция плотности мощности плоской электромагнитной волны

$$LT_{\Pi}(r_w)=10\cdot\lg[T_{\Pi}(r_w)]\quad \text{дБ}$$

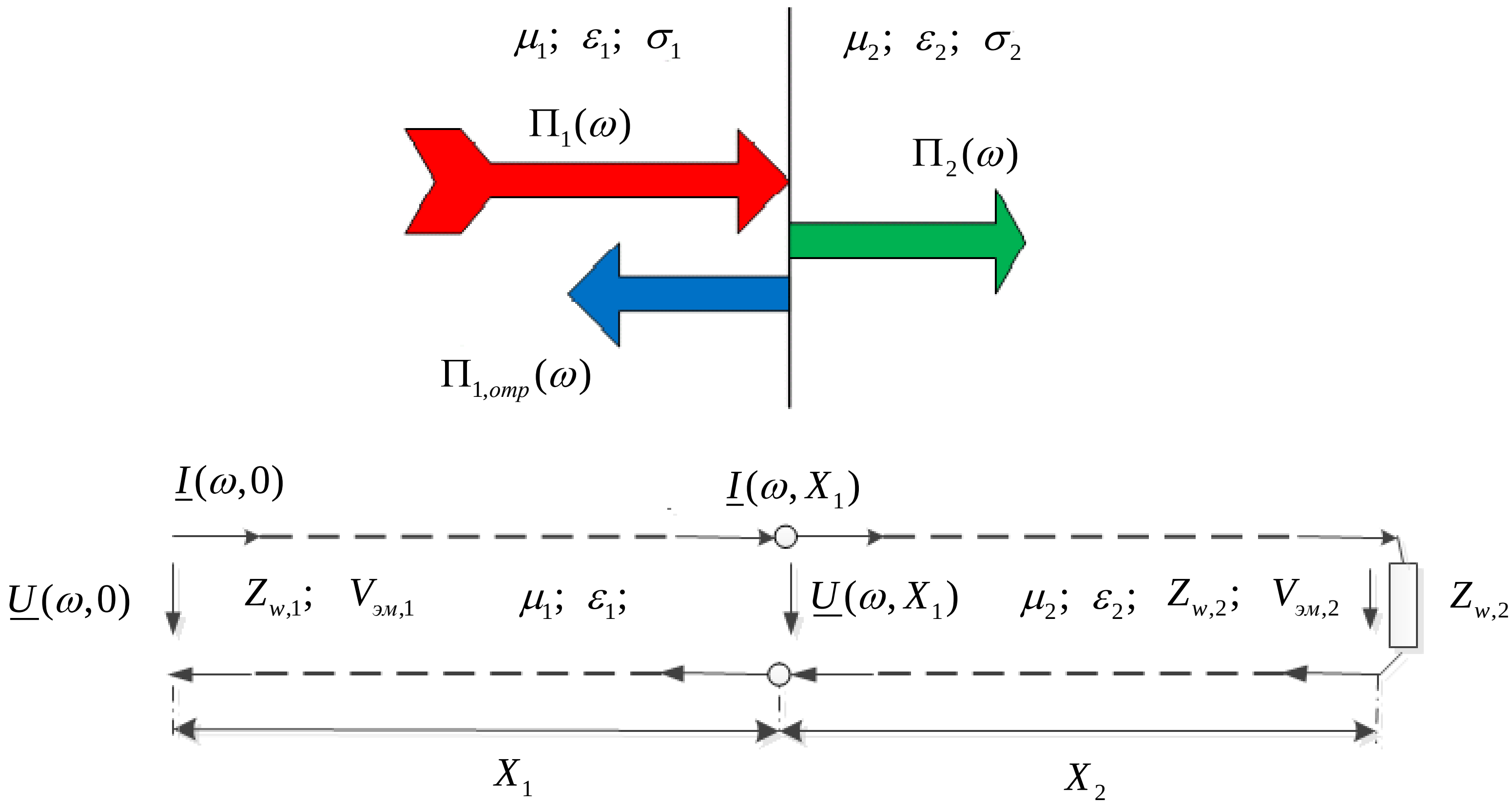
# Двухслойная среда

Перпендикулярное падение плоской ЭМВ на границу раздела двух

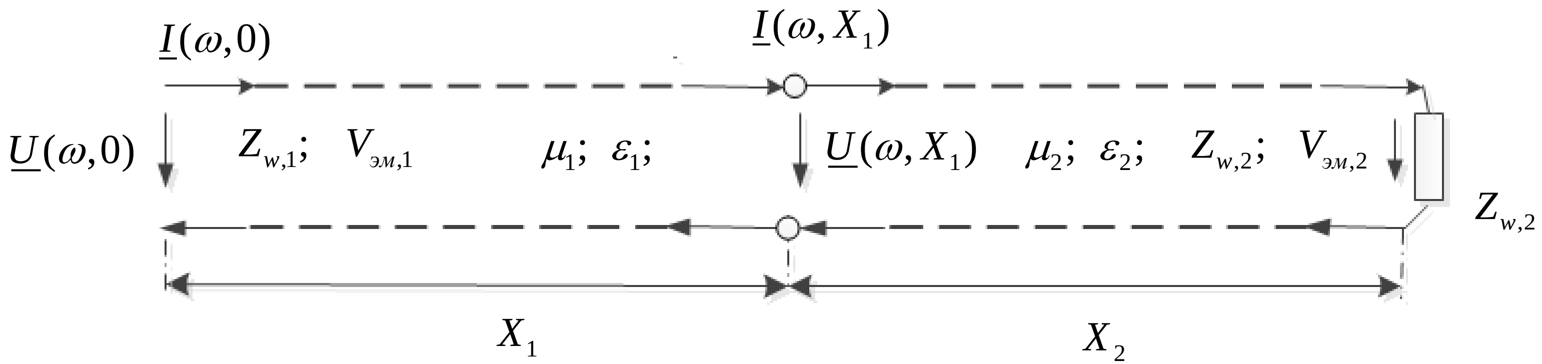


# Двухслойная среда

Перпендикулярное падение плоской ЭМВ на границу раздела двух



# Двухслойная среда



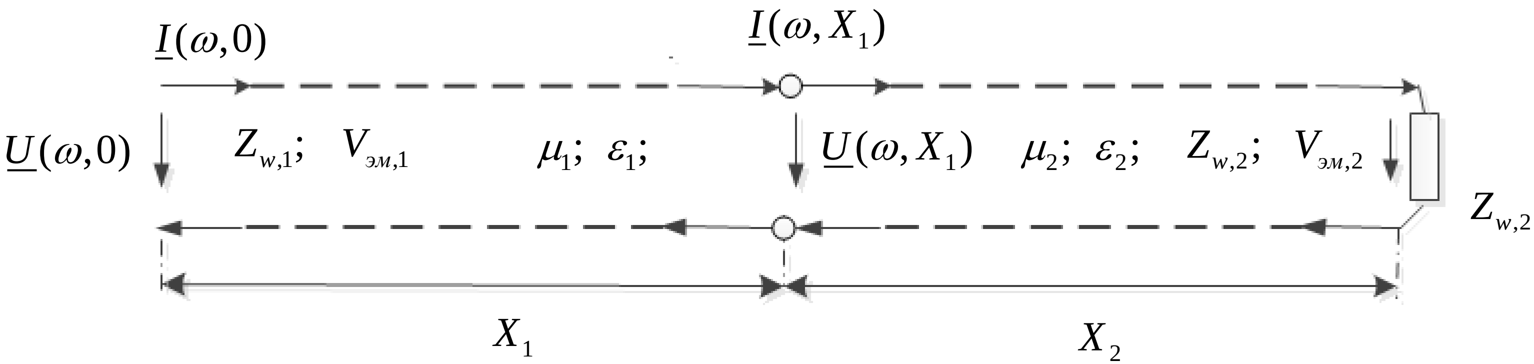

$$\begin{cases} \underline{U}(\omega,0)=\underline{U}(\omega,X_1)\cdot Cos\left[\dfrac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right]+j\cdot Z_{w,1}\cdot \underline{I}(\omega,X_1)\cdot Sin\left[\dfrac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right]; \\ \underline{I}(\omega,0)=\dfrac{j}{Z_{w,1}}\cdot \underline{U}(\omega,X_1)\cdot Sin\left[\dfrac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right]+\underline{I}(\omega,X_1)\cdot Cos\left[\dfrac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right]; \end{cases}$$

$$\underline{Z_{H,X1}}(\omega)=\frac{\underline{U}(\omega,X_1)}{\underline{I}(\omega,X_1)}=Z_{w2}\ ;$$

$$\underline{U}(\omega,0)=\left\{Cos\left(\frac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right)+j\cdot\frac{Z_{w,1}}{Z_{w,2}}\cdot Sin\left(\frac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right)\right\}\cdot\underline{U}(\omega,X_1);$$

$$\underline{I}(\omega,0)=\frac{1}{Z_{w,1}}\cdot\left\{\frac{Z_{w,1}}{Z_{w,2}}\cdot Cos\left(\frac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right)+j\cdot Sin\left(\frac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right)\right\}\cdot\underline{U}(\omega,X_1)$$

# Двухслойная среда



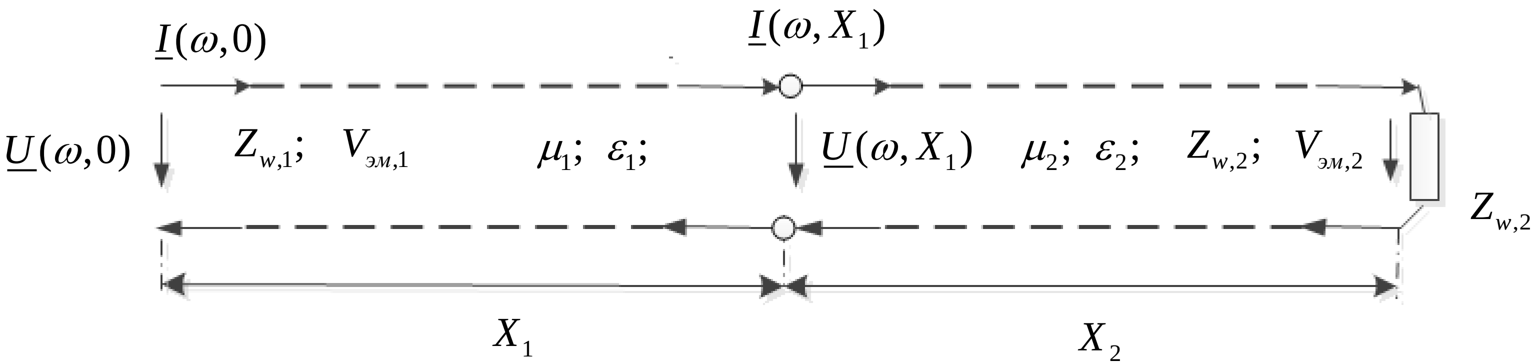

$$\underline{U}(\omega,0)=\left\{Cos\left(\frac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right)+j\cdot\frac{Z_{w,1}}{Z_{w,2}}\cdot Sin\left(\frac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right)\right\}\cdot\underline{U}(\omega,X_1);$$

$$\underline{I}(\omega,0)=\frac{1}{Z_{w,1}}\cdot\left\{\frac{Z_{w,1}}{Z_{w,2}}\cdot Cos\left(\frac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right)+j\cdot Sin\left(\frac{\omega}{V_{w,1}}\cdot X_1\right)\right\}\cdot\underline{U}(\omega,X_1)$$

$$T_P(\omega,X_1+X_2)=\frac{P(\omega,X_1+X_2)}{P(\omega,0)}=\frac{4\cdot Z_{w,1}\cdot Z_{w2}}{\left(Z_{w,1}+Z_{w,2}\right)^2};$$

$$1-T_P(\omega,X_1+X_2)=\frac{\left(Z_{w,1}-Z_{w2}\right)^2}{\left(Z_{w,1}+Z_{w,2}\right)^2};$$

# Двухслойная среда




$$T_P(\omega, X_1+X_2) = \frac{P(\omega, X_1+X_2)}{P(\omega,0)} = \frac{4\cdot Z_{w,1}\cdot Z_{w2}}{\left(Z_{w,1}+Z_{w,2}\right)^2};$$

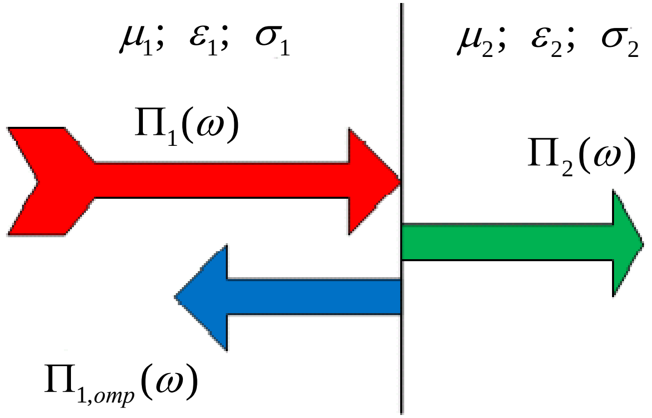
$$1-T_P(\omega, X_1+X_2) = \frac{\left(Z_{w,1}-Z_{w2}\right)^2}{\left(Z_{w,1}+Z_{w,2}\right)^2};$$

$$P_{пр} = \frac{4\cdot Z_{w,1}\cdot Z_{w2}}{\left(Z_{w,1}+Z_{w,2}\right)^2}\cdot P_1;$$

$$P_{1,отр} = \frac{\left(Z_{w,1}-Z_{w2}\right)^2}{\left(Z_{w,1}+Z_{w,2}\right)^2}\cdot P_1;$$

# Двухслойная среда

Перпендикулярное падение плоской ЭМВ на границу раздела двух

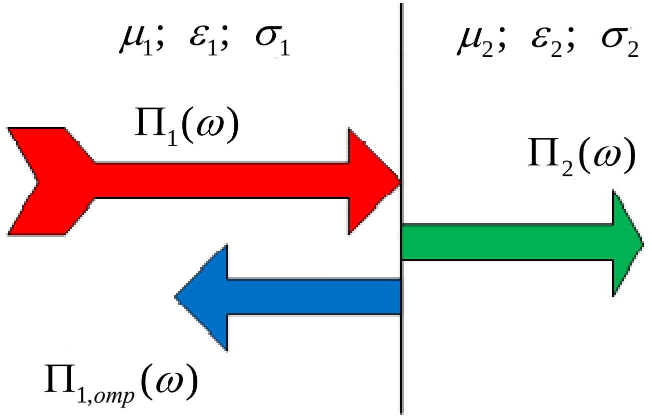



$$\Pi_2(\omega) = \frac{4 \cdot Z_{w,1} \cdot Z_{w2}}{\left(Z_{w,1} + Z_{w,2}\right)^2} \cdot \Pi_1(\omega);$$

$$\Pi_{1,отр}(\omega) = \frac{\left(Z_{w,1} - Z_{w2}\right)^2}{\left(Z_{w,1} + Z_{w,2}\right)^2} \cdot \Pi_1(\omega);$$

# Двухслойная среда

Перпендикулярное падение плоской ЭМВ на границу раздела двух




$$\Pi_2(\omega) = \frac{4 \cdot Z_{w,1} \cdot Z_{w2}}{\left(Z_{w,1} + Z_{w,2}\right)^2} \cdot \Pi_1(\omega);$$

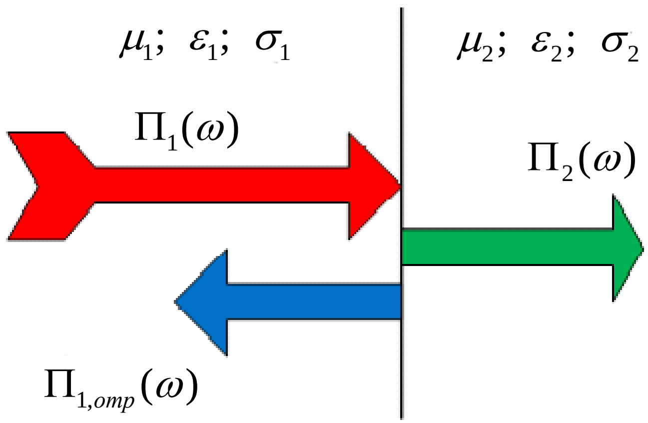
$$\Pi_{1,отр}(\omega) = \frac{\left(Z_{w,1} - Z_{w2}\right)^2}{\left(Z_{w,1} + Z_{w,2}\right)^2} \cdot \Pi_1(\omega);$$

$$\frac{Z_{w,1}}{Z_{w,2}} = \frac{V_{эм,1}}{V_{эм,2}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{от,2}}{\varepsilon_{от,1}}} = n_{21}$$

***$n_{21}$* -** показатель преломления ЭМВ на границе раздела двух сред

# Двухслойная среда

Перпендикулярное падение плоской ЭМВ на границу раздела двух




$$\Pi_2(\omega) = \frac{4 \cdot Z_{w,1} \cdot Z_{w2}}{\left(Z_{w,1} + Z_{w,2}\right)^2} \cdot \Pi_1(\omega);$$

$$\Pi_{1,omp}(\omega) = \frac{\left(Z_{w,1} - Z_{w2}\right)^2}{\left(Z_{w,1} + Z_{w,2}\right)^2} \cdot \Pi_1(\omega);$$

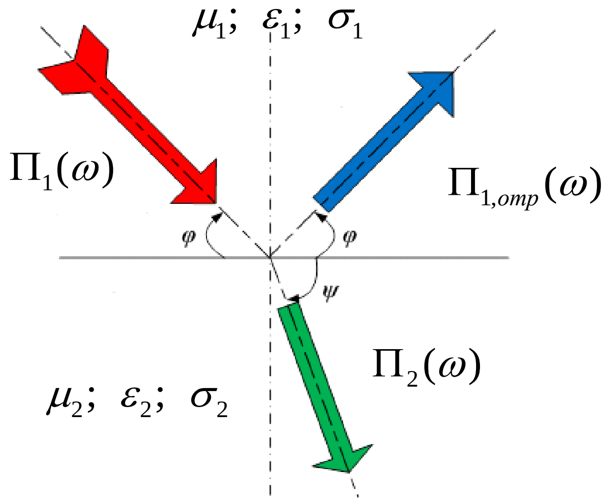
$$\frac{Z_{w,1}}{Z_{w,2}} = \frac{V_{эм,1}}{V_{эм,2}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{om,2}}{\varepsilon_{om,1}}} = n_{21}$$

***$n_{21}$* -** показатель преломления ЭМВ на границе раздела двух сред

$$T_{\Pi,om} = \frac{\left(n_{21} - 1\right)^2}{\left(n_{21} + 1\right)^2}\ ;\quad T_{\Pi,np} = \frac{4 \cdot n_{21}}{(n_{21} + 1)^2}$$

# Двухслойная среда

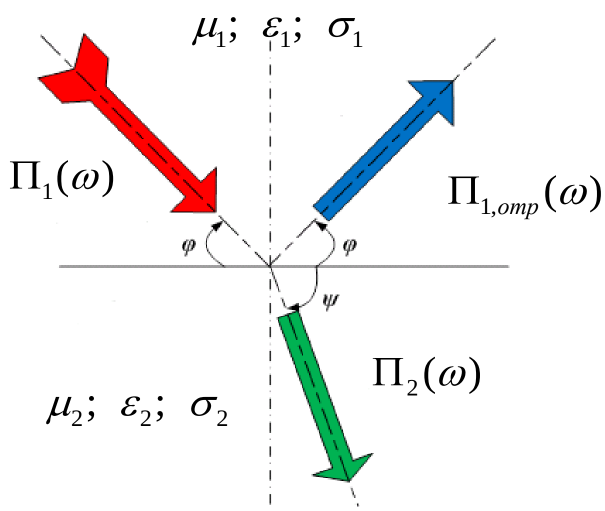
Наклонное падение плоской ЭМВ на границу раздела двух




$\cos\varphi = n_{21} \cdot \cos\psi;$

# Двухслойная среда

Наклонное падение плоской ЭМВ на границу раздела двух




$\cos\varphi = n_{21}\cdot\cos\psi;$

$$K_{\Pi,отр} = \frac{\Pi_{отр}}{\Pi_1} = \frac{n_{21}^2\cdot\sin\varphi - \sqrt{n_{21}^2 - cos^2\varphi}}{n_{21}^2\cdot\sin\varphi + \sqrt{n_{21}^2 - \cos^2\varphi}} = \frac{tg(\varphi-\psi)}{tg(\varphi+\psi)}$$

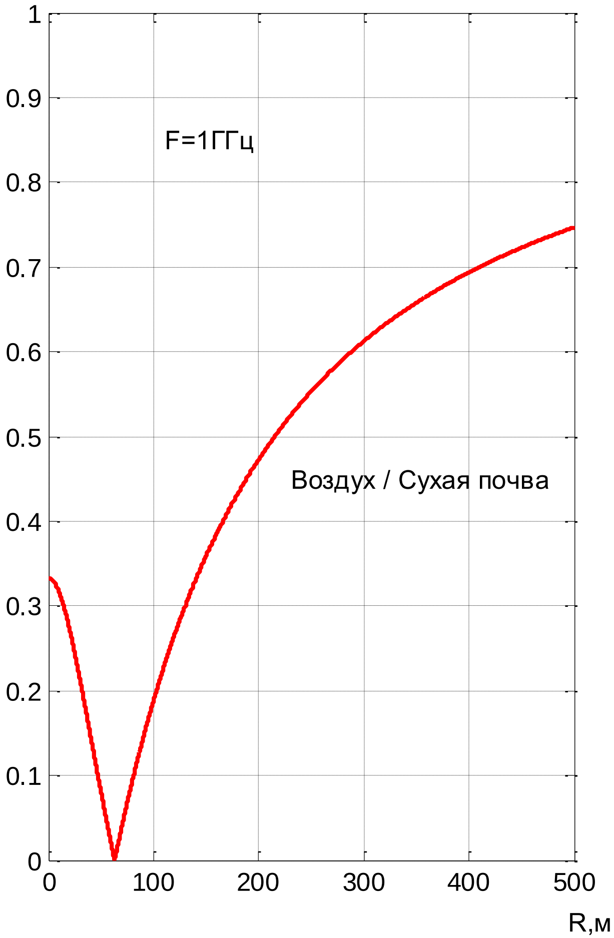
Вертикальная поляризация ЭМВ

$$K_{\Pi,отр} = \frac{\Pi_{отр}}{\Pi_1} = \frac{n_{21}\cdot\sin\psi - \sin\varphi}{n_{21}\cdot\sin\psi + \sin\varphi} = -\frac{\sin(\varphi-\psi)}{\sin(\varphi+\psi)}$$

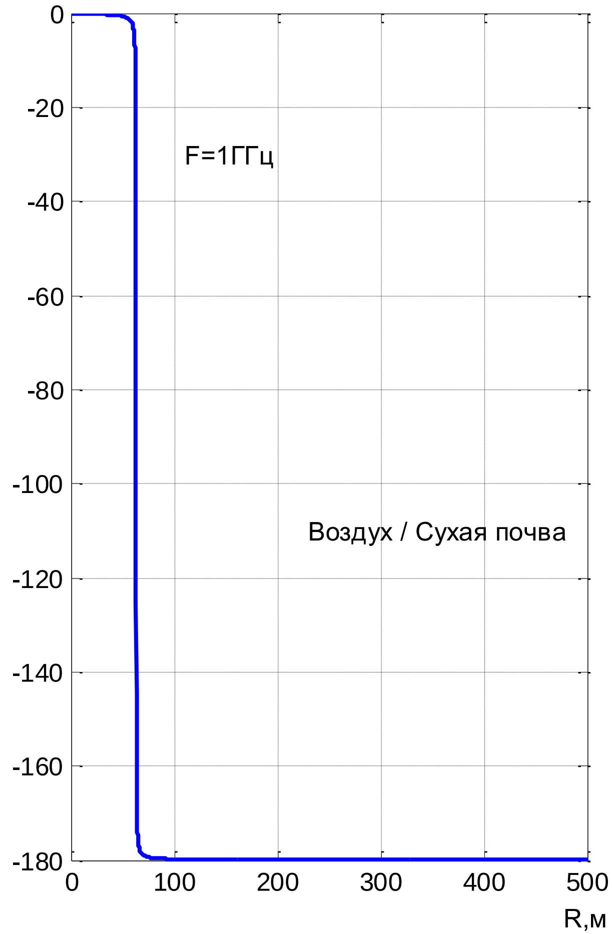
Горизонтальная поляризация ЭМВ

# Двухслойная среда

$K_{E,omp}(R)$




$\varphi_{E,omp}(R)$

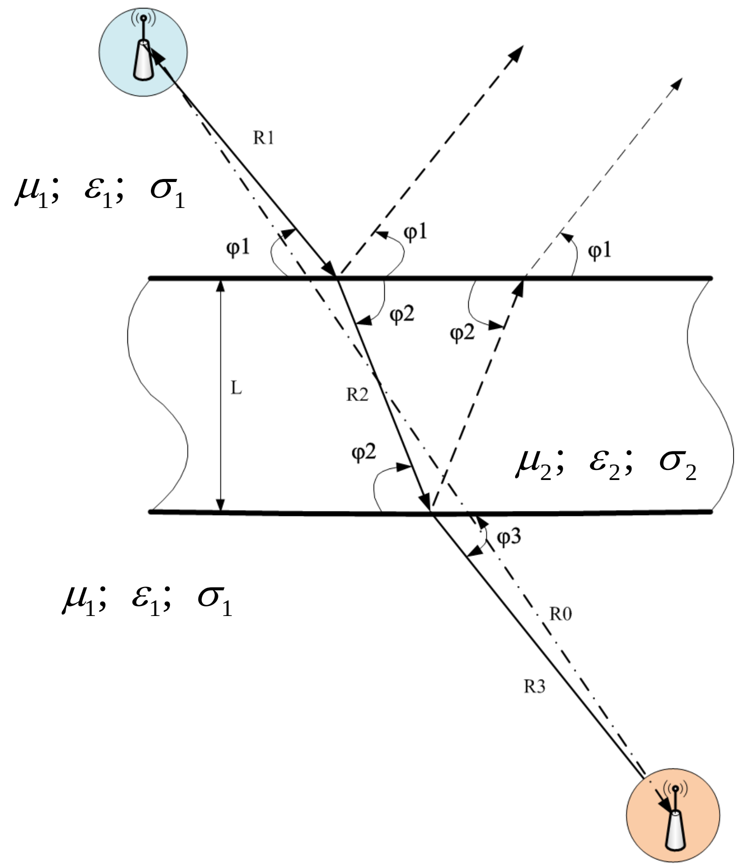



$\mu_1 = 1; \;\; \varepsilon_1 = 1; \;\; \sigma_1 = 10^{-6}$

$\mu_2 = 1; \;\; \varepsilon_2 = 4; \;\; \sigma_1 = 10^{-3}$

Высоты антенн:
передающей - 30 метров;
приёмной - 1,5 метра.

# Трёхслойная среда

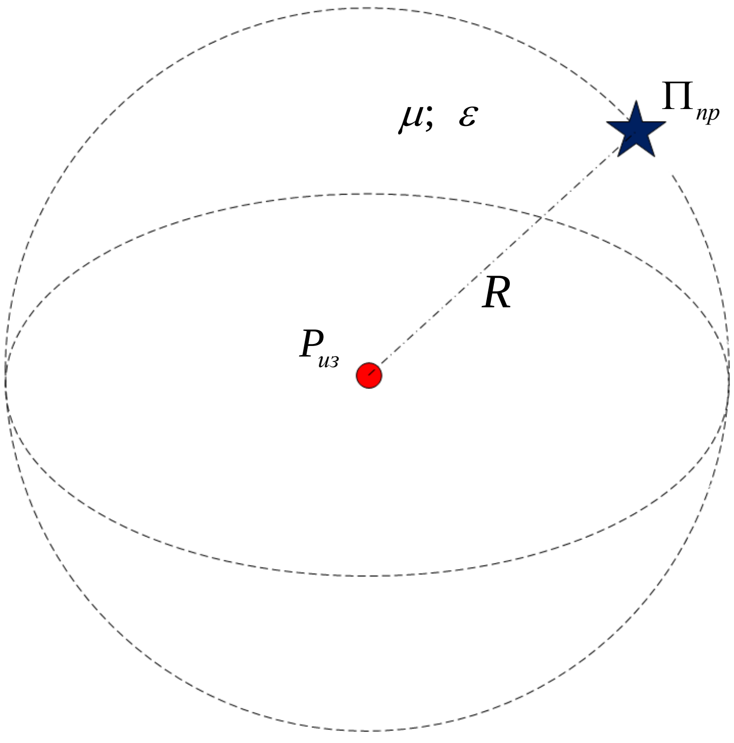


# Трёхслойная среда

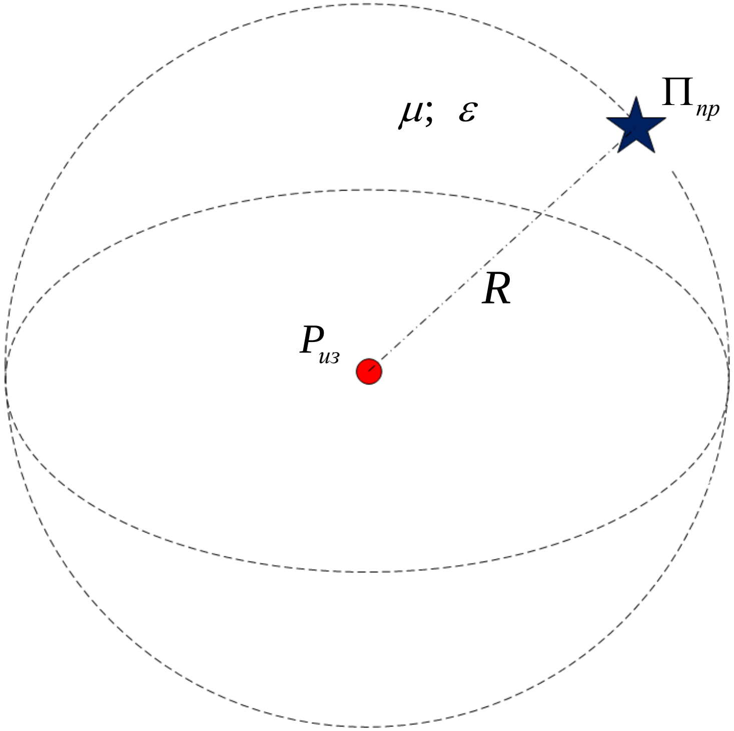
Таблица - Потери плотности мощности ЭМВ в элементах конструкций

| Наименование материала или конструкции | Толщина, см | Затухание (дБм) на частоте | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 3,0 ГГц | 10,0 ГГц | 37,5 ГГц |
| **кирпич** | 12 | 15 | 15 | 15 |
| **штукатурка** | 1,8 | - | 8 | 12 |
| **стекло** | 0,28 | - | 2 | 2 |
| **доска** | 5,0 | 8,4 | - | - |
| **фанера** | 0,4 | - | 1 | 2 |
| **древесностружечная плита** | 1,8 | 3,2 | 20,5 | - |
| **шлакобетонная стена** | 46 | 14,5 | 21 | - |
| **капитальная стена здания** | 70 | 16 | 12 | - |
| **оштукатуренная стена** | 15 | 8 | 22 | - |
| **межэтажная перегородка** | 80 | 20 | 13 | - |

# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь

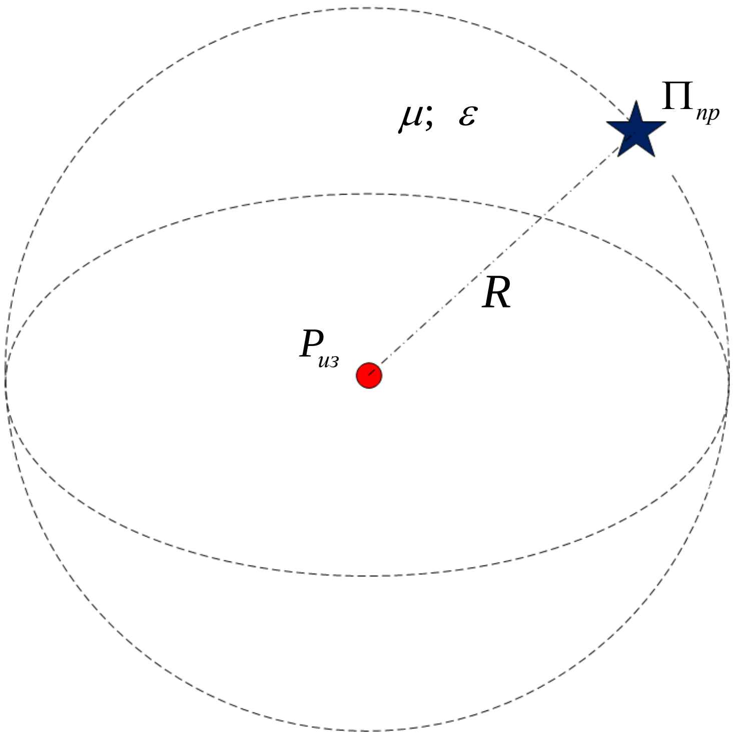


# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь




$$\Pi_{пр} = \frac{P_{из}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} \right\rangle;$$

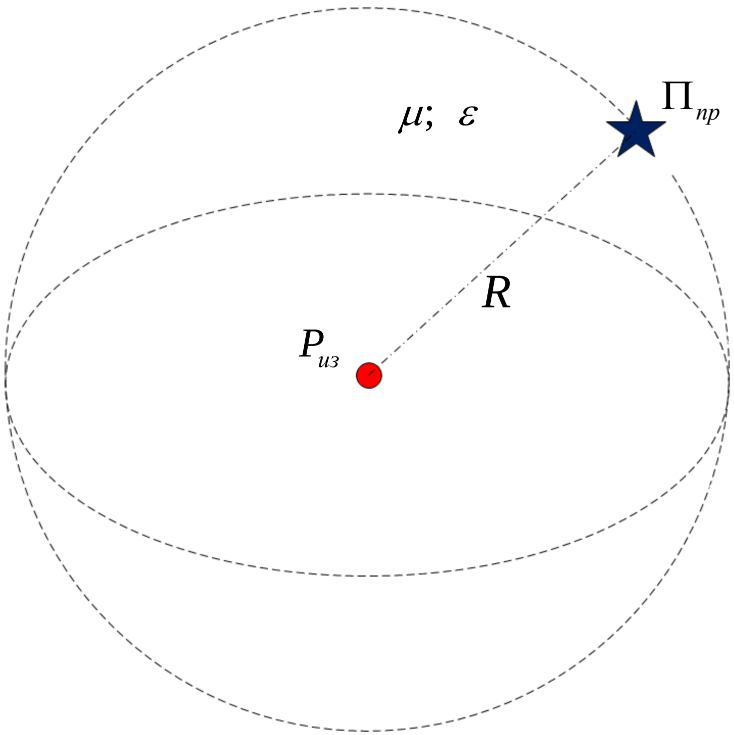
# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь




$$\Pi_{пр} = \frac{P_{из}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} \right\rangle;$$

$$\Pi_{пр} = E_{пр} \cdot H_{пр};$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь

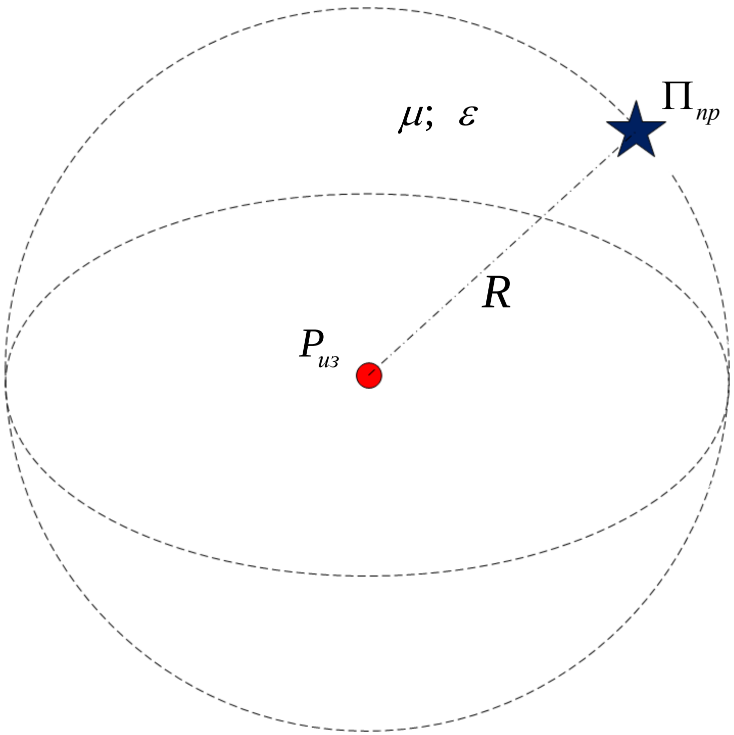



$$\Pi_{пр} = \frac{P_{из}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} \right\rangle;$$

$$\Pi_{пр} = E_{пр} \cdot H_{пр};$$

$$\Pi_{пр} = \frac{E_{пр}^2}{Z_w};$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь



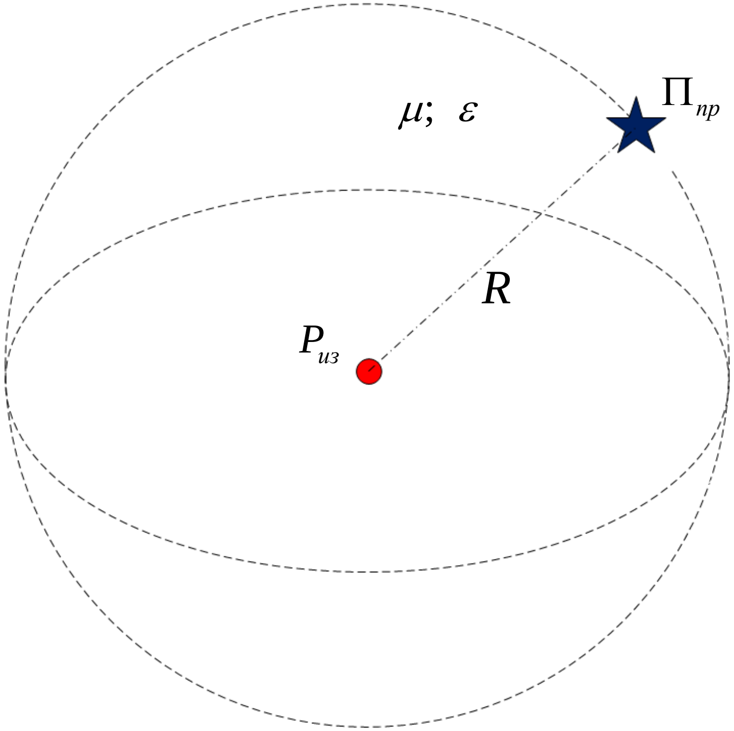

$$\Pi_{пр} = \frac{P_{из}}{4\cdot\pi\cdot R^2} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} \right\rangle;$$

$$\Pi_{пр} = E_{пр}\cdot H_{пр};$$

$$\Pi_{пр} = \frac{E_{пр}^2}{Z_w};$$

$$Z_w \approx \frac{120\cdot\pi}{n_{эм}} = \frac{Z_{0.w}}{n_{эм}}, \quad Ом.$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь




$$\Pi_{пр} = \frac{P_{из}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} \right\rangle;$$

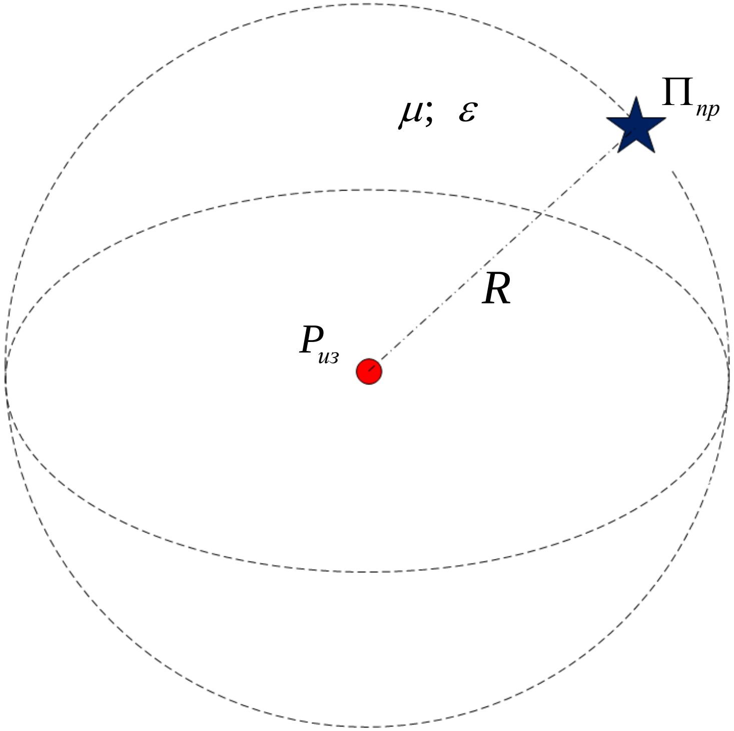
$$\Pi_{пр} = E_{пр} \cdot H_{пр};$$

$$\Pi_{пр} = \frac{E_{пр}^2}{Z_w};$$

$$Z_w \approx \frac{120 \cdot \pi}{n_{эм}} = \frac{Z_{0.w}}{n_{эм}}, \quad Ом.$$

$$n_{эм} = \frac{3 \cdot 10^8}{V_{эм}} = \sqrt{\mu_{от} \cdot \varepsilon_{от}} \geq 1$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь




$$\Pi_{пр} = \frac{P_{из}}{4\cdot\pi\cdot R^2} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} \right\rangle;$$

$$\Pi_{пр} = E_{пр}\cdot H_{пр};$$

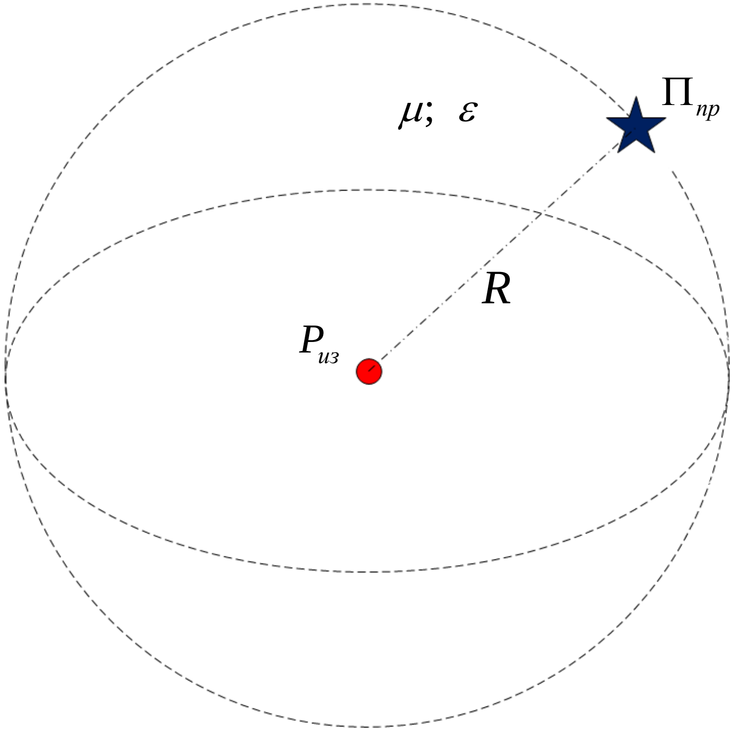
$$\Pi_{пр} = \frac{E_{пр}^2}{Z_w};$$

$$Z_w \approx \frac{120\cdot\pi}{n_{эм}} = \frac{Z_{0.w}}{n_{эм}},\ \ Ом.$$

$$n_{эм} = \frac{3\cdot 10^8}{V_{эм}} = \sqrt{\mu_{от}\cdot\varepsilon_{от}} \ge 1$$

$$\frac{P_{из}}{4\cdot\pi\cdot R^2} = \frac{E_{пр}^2}{Z_w};$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь




$$\Pi_{пр} = \frac{P_{из}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} \right\rangle;$$

$$\Pi_{пр} = E_{пр} \cdot H_{пр};$$

$$\Pi_{пр} = \frac{E_{пр}^2}{Z_w};$$

$$Z_w \approx \frac{120 \cdot \pi}{n_{эм}} = \frac{Z_{0.w}}{n_{эм}}, \quad Ом.$$

$$n_{эм} = \frac{3 \cdot 10^8}{V_{эм}} = \sqrt{\mu_{от} \cdot \varepsilon_{от}} \geq 1$$

$$\frac{P_{из}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{E_{пр}^2}{Z_w};$$

$$E_{пр} = \sqrt{\frac{P_{из} \cdot 120 \cdot \pi}{4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot n_{эм}}} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{30 \cdot P_{из}}{n_{эм}}}$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь

Если считать источник излучения точечным, расположенным в точке ***r = 0***, то плотность его мощности должна быть бесконечной. На расстоянии ***r = 1*** плотность мощности становиться конечной и равной

$$\Pi_1 = \frac{P_{из}}{4\cdot\pi\cdot 1^2} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} \right\rangle;$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь

Если считать источник излучения точечным, расположенным в точке ***r = 0***, то плотность его мощности должна быть бесконечной. На расстоянии ***r = 1*** плотность мощности становиться конечной и равной

$$\Pi_1 = \frac{P_{из}}{4 \cdot \pi \cdot 1^2} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} \right\rangle;$$

Передаточная функция плотности мощности

$$T_{\Pi}(r) = \frac{\Pi(r)}{\Pi_1} = \frac{1}{r^2}$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде без потерь

Если считать источник излучения точечным, расположенным в точке **$r = 0$**, то плотность его мощности должна быть бесконечной. На расстоянии **$r = 1$** плотность мощности становиться конечной и равной

$$\Pi_1 = \frac{P_{из}}{4 \cdot \pi \cdot 1^2} \quad \left\langle \frac{Вт}{м^2} \right\rangle;$$

Передаточная функция плотности мощности

$$T_{\Pi}(r) = \frac{\Pi(r)}{\Pi_1} = \frac{1}{r^2}$$

Логарифмическая функция затухания плотности мощности

$$LP(r) = -10 \cdot \lg\left[T_{\Pi}(r)\right] = 20\lg(r); \quad дБм$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде с потерями

Логарифмическая функция затухания плотности мощности в среде с малыми потерями

$$LP(\omega,r) = -10 \cdot \lg\left[T_{\Pi}(r)\right] = 20\lg(r) + 1636 \cdot \frac{\sigma(\omega)}{n_{эм}} \cdot r; \qquad дБм$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде с потерями

Логарифмическая функция затухания плотности мощности в среде с малыми потерями

$$LP(\omega,r) = -10\cdot\lg\left[T_{\Pi}(r)\right] = 20\lg(r) + 1636\cdot\frac{\sigma(\omega)}{n_{эм}}\cdot r; \qquad \partial Бм$$

Мощность принимаемых сигналов принято оценивать с использованием понятия "***эффективной площади***" приёмной антенны - $\boldsymbol{S_{эф}}$

$$P(r) = П_{эм}(r)\cdot S_{эф}$$

# Сферическая ЭМВ в однородной среде с потерями

Логарифмическая функция затухания плотности мощности в среде с малыми потерями

$$LP(\omega, r) = -10 \cdot \lg\left[T_{\Pi}(r)\right] = 20\lg(r) + 1636 \cdot \frac{\sigma(\omega)}{n_{эм}} \cdot r; \qquad \partial Бм$$

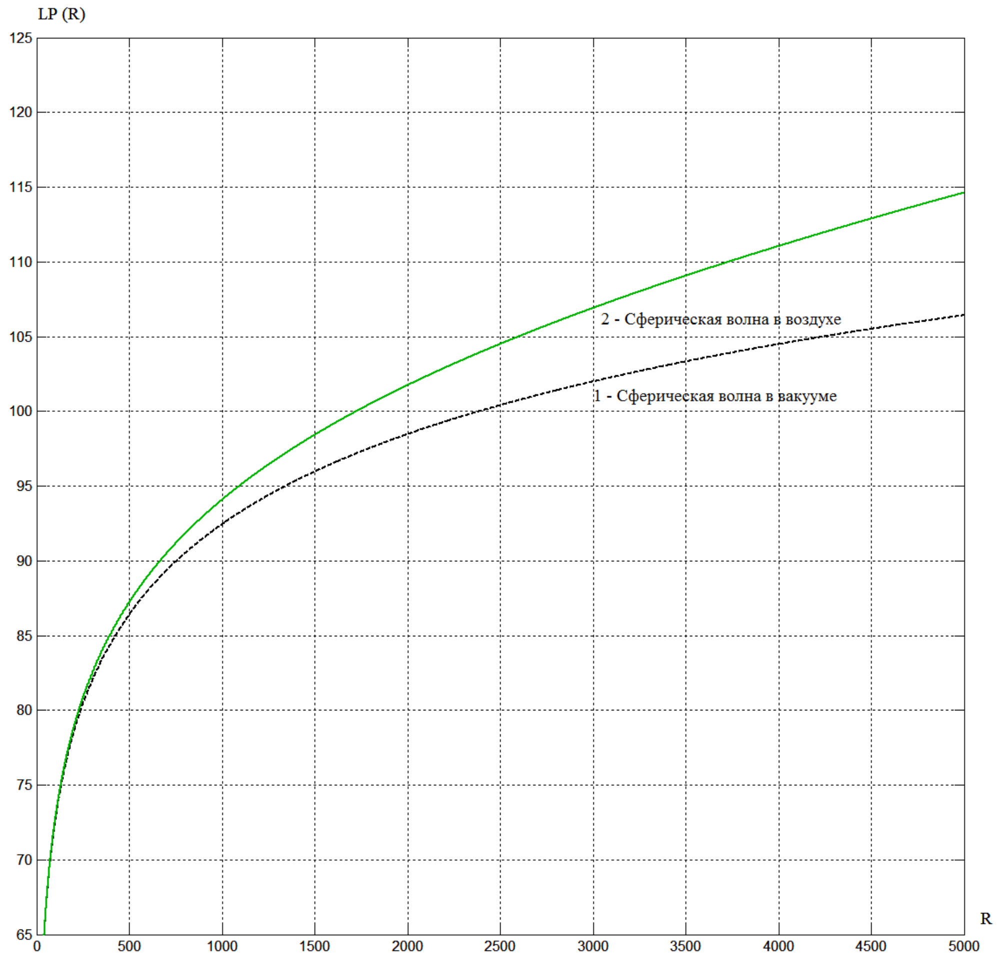
Мощность принимаемых сигналов принято оценивать с использованием понятия "***эффективной площади***" приёмной антенны - $\boldsymbol{S_{эф}}$

$$P(r) = \Pi_{эм}(r) \cdot S_{эф}$$

В теоретической электродинамике принято определять в качестве базовой эффективную площадь антенны соотношением

$$S_{эф} = \frac{\lambda^2}{4\pi} = \frac{V_{эм}^2}{4\pi \cdot f^2} = \frac{V_{эм}^2 \cdot 4 \cdot \pi^2}{4\pi \cdot \omega^2} = \pi \cdot \frac{V_{эм}^2}{\omega^2} = S_{эф}(\omega)$$

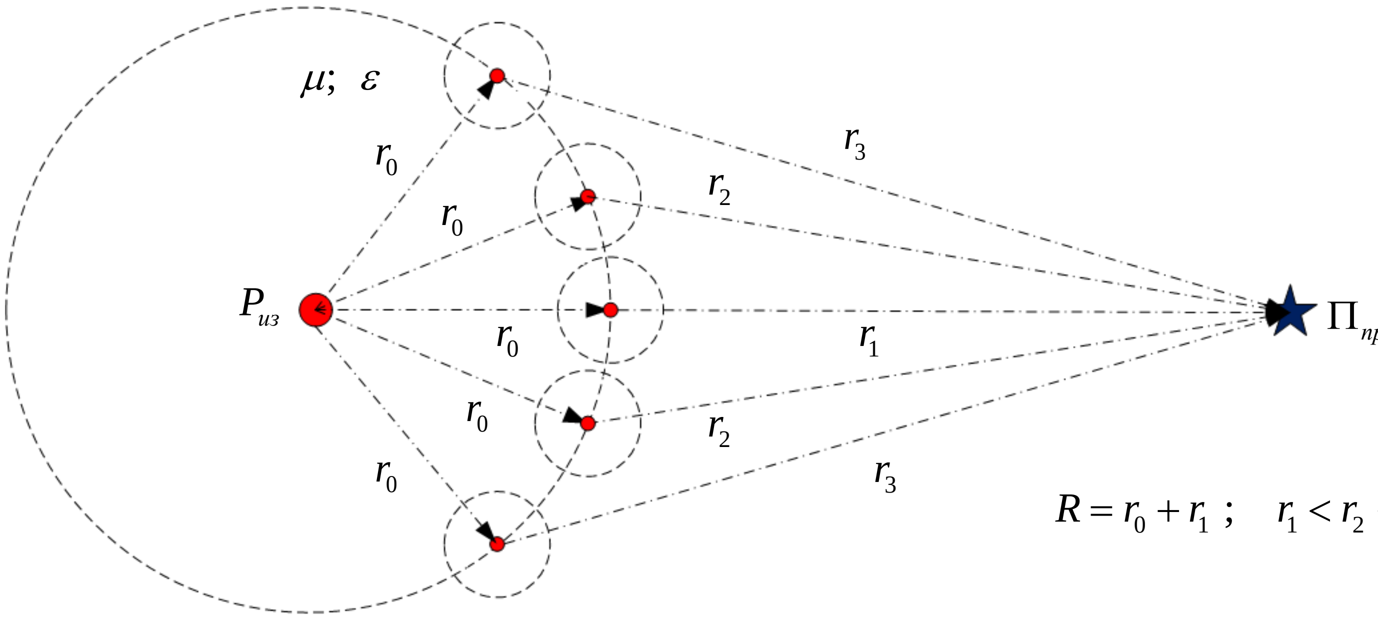
# Сферическая ЭМВ в однородной среде с потерями




F=1 ГГц

# Принцип Гюйгенса

Каждая точка распространяющейся ЭМВ является источником новой сферической волны

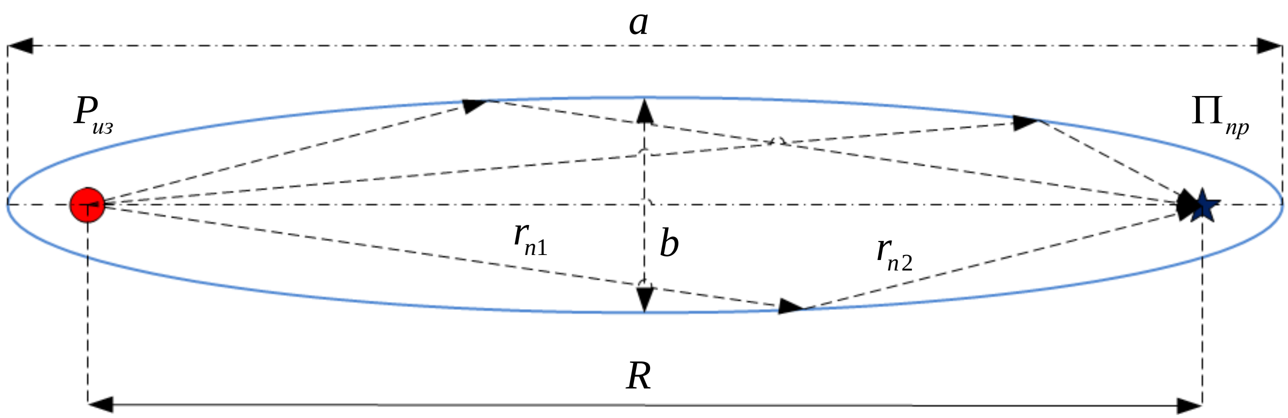



$R = r_0 + r_1\ ;\quad r_1 < r_2 < r_3\ ;$

$$\underline{E}(\omega,R)=\sum_{n=1}^{N}\underline{E}\left[\omega,(r_0+r_n)\right]=\sum_{n=1}^{N}\underline{E}_0(\omega,0)\cdot e^{-j\cdot 2\cdot\pi\cdot\frac{r_0+r_n}{\lambda}} \qquad \psi_n=-2\cdot\pi\cdot\frac{r_0+r_n}{\lambda}\ ;$$

Результирующее электромагнитное поле в выбранной точке приёма сигналов будет определяться интерференцией ЭМВ

# Зона Френеля

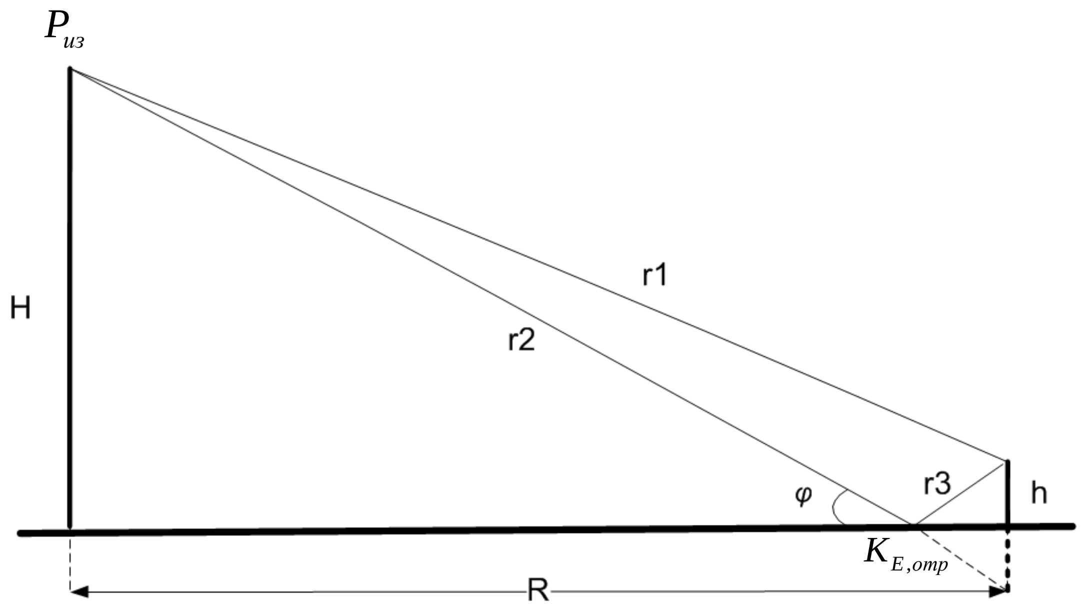



$a = r_{п1} + r_{п2};$ - *большой диаметр эллипсоида вращения*

$b = \sqrt{\lambda \cdot R};$ - *малый диаметр эллипсоида вращения*

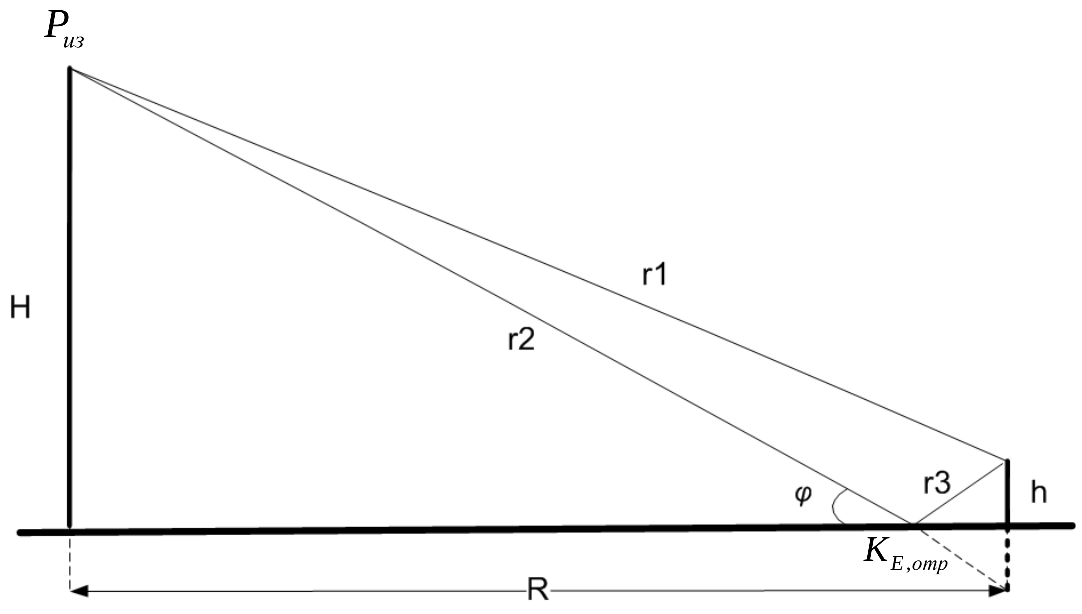
$$r_{п1} + r_{п2} = a = const; \qquad \psi_{п} = -2 \cdot \pi \cdot \frac{a}{\lambda} = const$$

# Двулучевая модель радиоканала

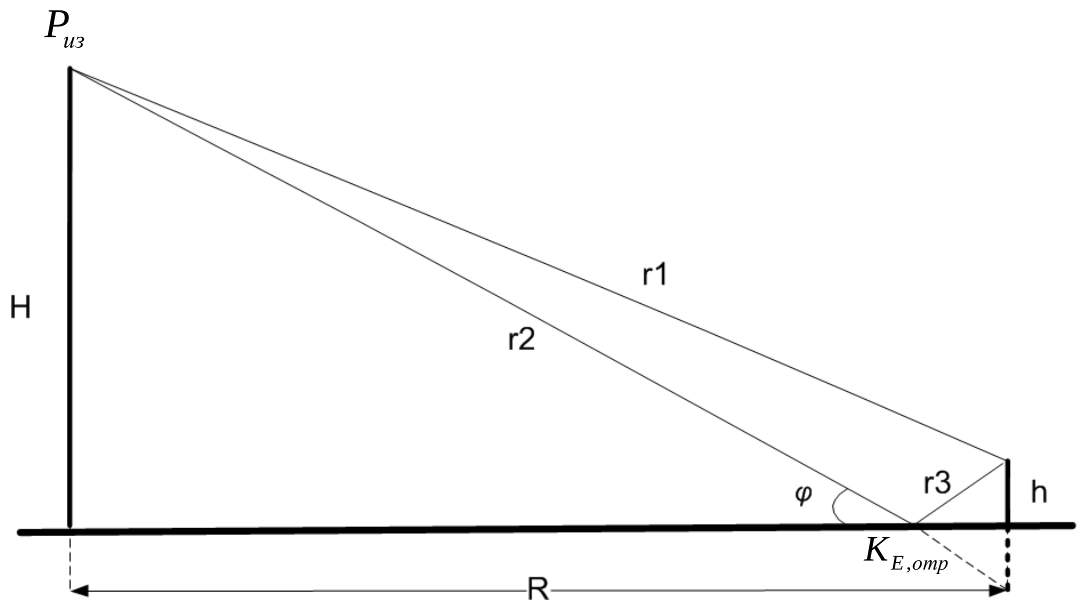


# Двулучевая модель радиоканала

$$r1 = \sqrt{R^2 + (H - h)^2};$$



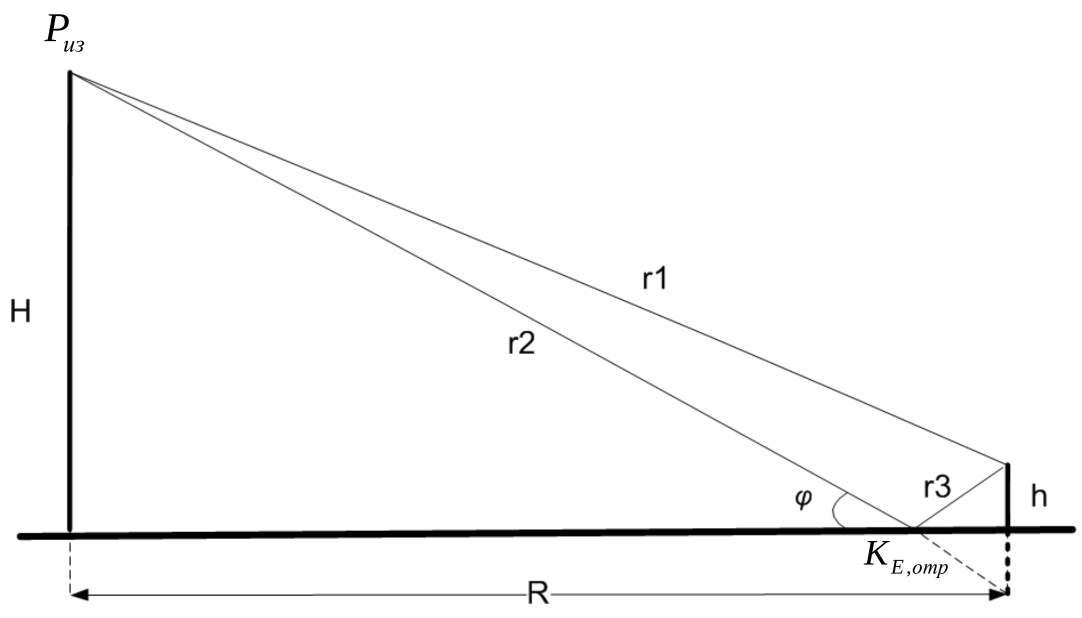
# Двулучевая модель радиоканала




$$r1 = \sqrt{R^2 + (H - h)^2};$$

$$r2 + r3 = \sqrt{R^2 + (H + h)^2};$$

# Двулучевая модель радиоканала

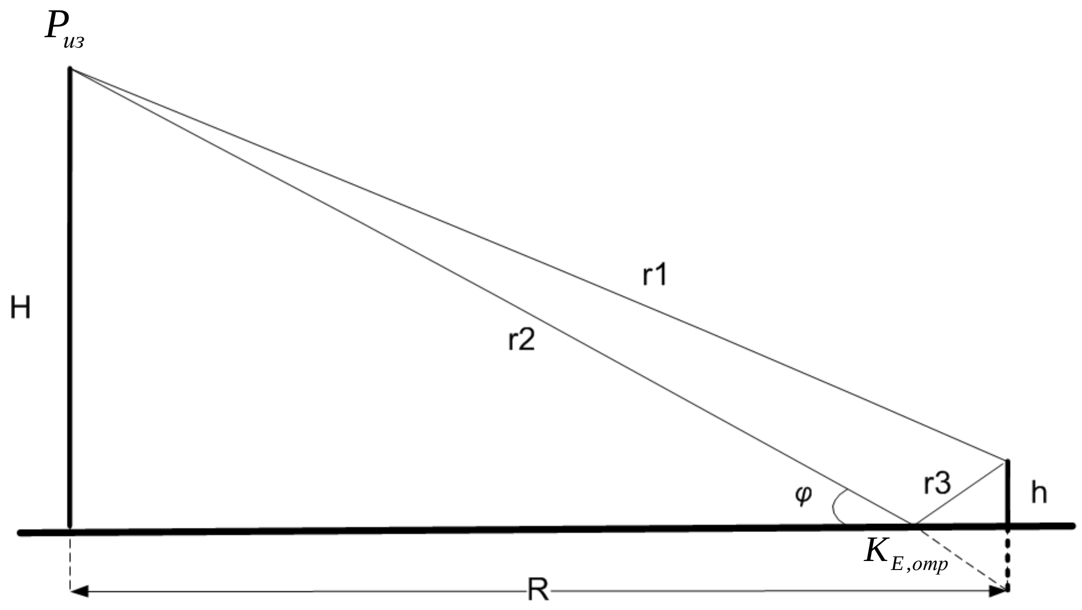



$$r1 = \sqrt{R^2 + (H - h)^2};$$

$$r2 + r3 = \sqrt{R^2 + (H + h)^2};$$

$$\varphi = arctg\left(\frac{H + h}{R}\right);$$

# Двулучевая модель радиоканала



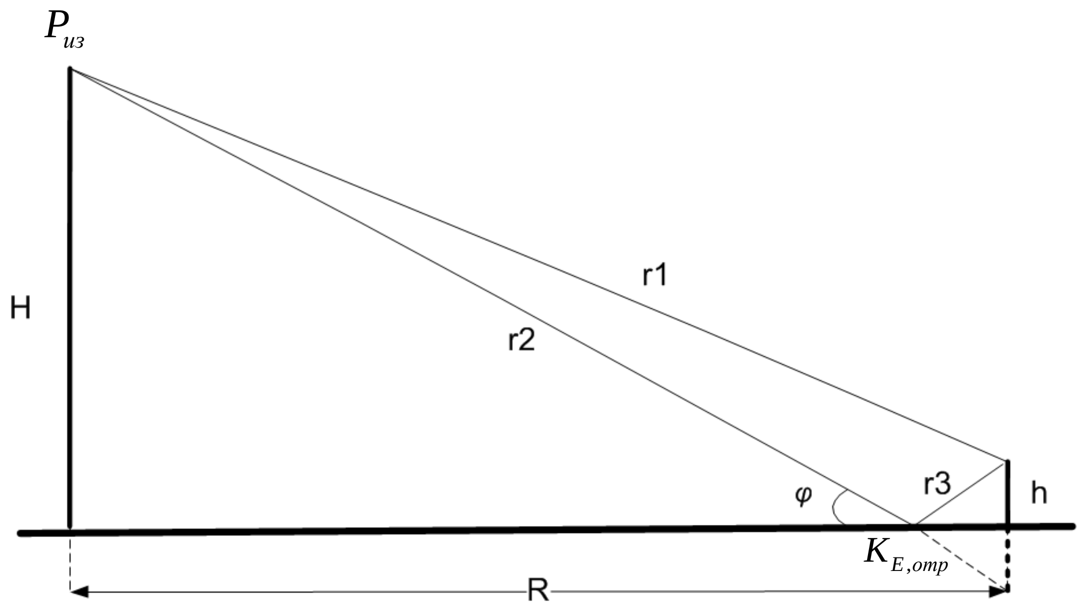

$$r1 = \sqrt{R^2 + (H - h)^2};$$

$$r2 + r3 = \sqrt{R^2 + (H + h)^2};$$

$$\varphi = arctg(\frac{H + h}{R})\ ;$$

$$\Delta r = r2 + r3 - r1$$

# Двулучевая модель радиоканала




$$r1 = \sqrt{R^2 + (H-h)^2};$$

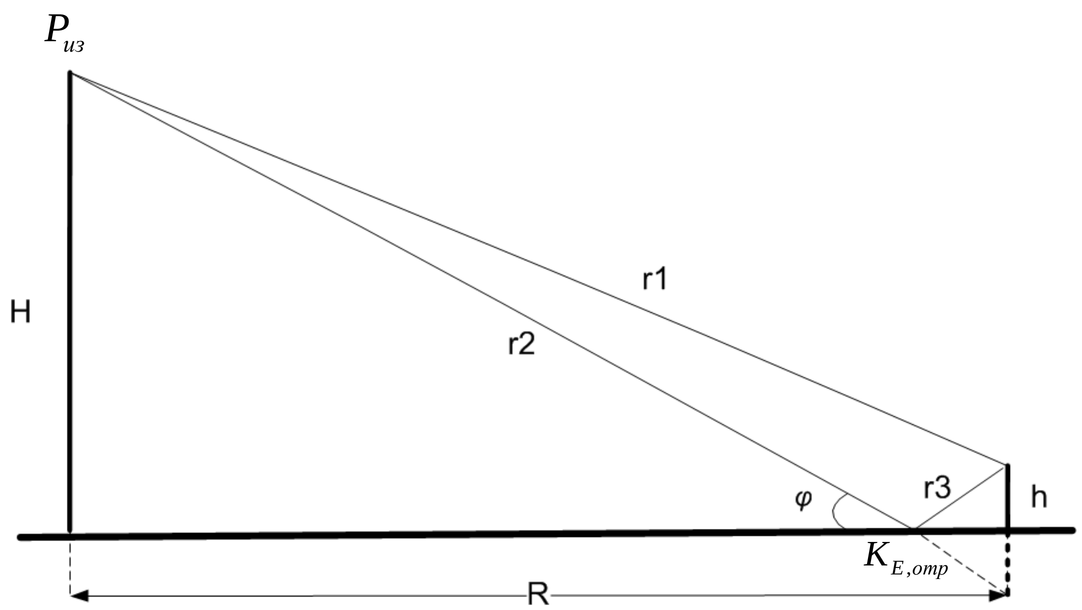
$$r2 + r3 = \sqrt{R^2 + (H+h)^2};$$

$$\varphi = arctg(\frac{H+h}{R});$$

$$\Delta r = r2 + r3 - r1$$

$$\underline{E}(\omega, r_1) = \underline{E}(\omega, 0) \cdot e^{-j \cdot \frac{\omega}{V_{эм}} \cdot r_1}; \quad при \ \delta = 0;$$

# Двулучевая модель радиоканала




$$r1 = \sqrt{R^2 + (H-h)^2};$$

$$r2 + r3 = \sqrt{R^2 + (H+h)^2};$$

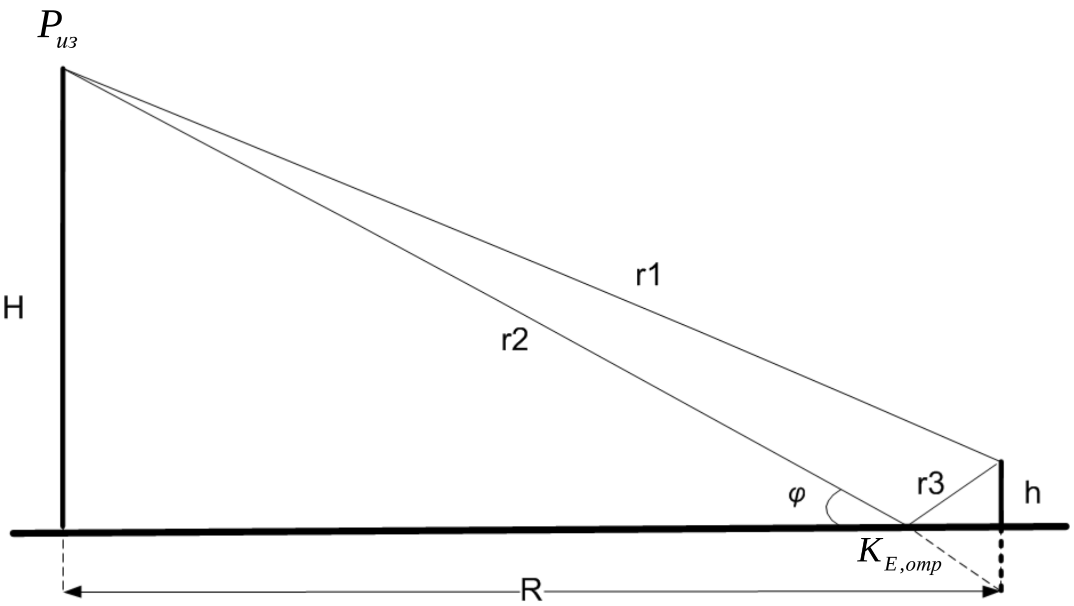
$$\varphi = arctg\left(\frac{H+h}{R}\right);$$

$$\Delta r = r2 + r3 - r1$$

$$\underline{E}(\omega, r_1) = \underline{E}(\omega, 0) \cdot e^{-j \cdot \frac{\omega}{V_{эм}} \cdot r_1}; \quad при \ \ \delta = 0;$$

$$\underline{E}(\omega, r_1 + \Delta r) = \underline{E}(\omega, 0) \cdot e^{-j \cdot \frac{\omega}{V_{эм}} \cdot (r_1 + \Delta r)} \cdot \underline{K}_{E,отр} = \underline{E}(\omega, r_1) \cdot \underline{K}_{E,отр} \cdot e^{-j \cdot \frac{\omega}{V_{эм}} \cdot \Delta r};$$

# Двулучевая модель радиоканала




$$r1 = \sqrt{R^2 + (H-h)^2};$$

$$r2 + r3 = \sqrt{R^2 + (H+h)^2};$$

$$\varphi = arctg(\frac{H+h}{R})\ ;$$

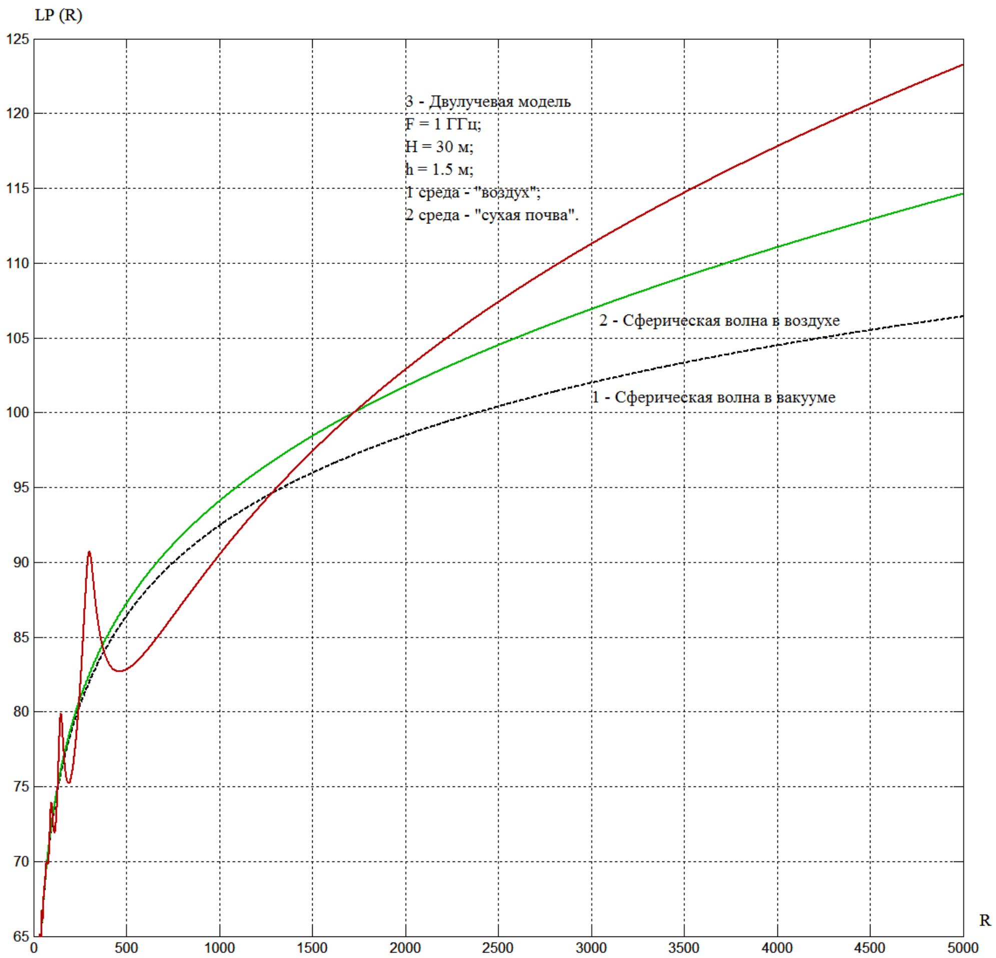
$$\Delta r = r2 + r3 - r1$$

$$\underline{E}(\omega, r_1) = \underline{E}(\omega, 0) \cdot e^{-j\cdot\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot r_1};\ \ при\ \ \delta = 0;$$

$$\underline{E}(\omega, r_1 + \Delta r) = \underline{E}(\omega, 0) \cdot e^{-j\cdot\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot(r_1+\Delta r)} \cdot \underline{K}_{E,отр} = \underline{E}(\omega, r_1) \cdot \underline{K}_{E,отр} \cdot e^{-j\cdot\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot\Delta r};$$

$$\underline{E}(\omega, R) = \underline{E}(\omega, r_1) + \underline{E}(\omega, r_1 + \Delta r) = \underline{E}(\omega, 0) \cdot e^{-j\cdot\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot(r_1+\Delta r)} = \underline{E}(\omega, r_1) \cdot (1 + \underline{K}_{E,отр} \cdot e^{-j\cdot\frac{\omega}{V_{эм}}\cdot\Delta r});$$

# Двулучевая модель радиоканала



***Спасибо за внимание.***