

Електромагнетика



Дејан Тошић



Униформни равни електромагнетски таласи

Електромагнетски таласи

- Из потпуног система Максвелових једначина следи да се електрично и магнетско поље **узајамно индукују**
- Поље које настане под дејством генератора може да **настави да постоји** и по престанку дејства генератора

Електромагнетски таласи

- Посебан вид поља које се само одржава јесу **електромагнетски таласи**
- Талас има основну особину да се поље постепено **удаљава** од извора

Врсте таласа

- **Слободни таласи** су таласи који се простиру у хомогеној средини
- **Вођени таласи** су таласи који се воде (каналашу) жељеним путем помоћу структура за вођење таласа (структура начињених од проводника и диелектрика)

Слободни таласи

- **Сферни таласи** су таласи који се у простору радијално шире у свим правцима, на пример, из предајне антене
- **Равни униформни таласи** су најједноставнији тип слободних таласа
- Велики број практичних таласа се може у делу области **еквивалентирати** униформним равним таласима (који су идеализација и не постоје у природи)



Униформни равни таласи у савршеном диелектрику

Претпоставке

- Линеарна хомогена средина (ϵ , μ)
- Нема губитака
- Декартов координатни систем
- Поље зависи само од једне координате z
- Нема временски променљивих наелектрисања и струја
- Нема временски ни просторно константне компоненте

План рада

- Поставићемо Максвелове једначине према усвојеним претпоставкама
- Уклонићемо све променљиве осим **E** и **H**
- Решаваћемо Максвелове једначине у диференцијалном облику
- Тражићемо најпростије решење, поље са најмање компоненти и са најпростијим изразима за компоненте

Потпуни систем Максвел. једн.

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\text{div } \mathbf{E} = 0$$

$$\text{div } \mathbf{H} = 0$$

Диференцирањем по времену и
комбиновањем са првом једначином

$$\text{rot rot } \mathbf{E} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\text{rot rot } \mathbf{E} = \text{grad div } \mathbf{E} - \Delta \mathbf{E} = -\Delta \mathbf{E}$$

**Таласна једначина
за електрично поље**

$$\Delta \mathbf{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

Сређивање таласне једначине

Поље зависи само од z

Потпуни систем једначина за \mathbf{E}

$$\Delta \mathbf{E} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$$



$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0$$



$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$



$$\frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

Поље је променљиво у правцу z -осе



$$E_z = 0$$

Тражимо најпростије решење



$$E_y = 0$$

Скаларна таласна једначина

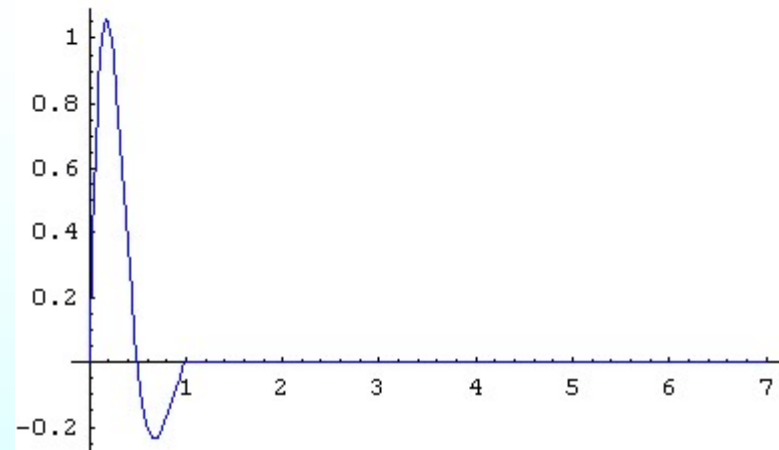
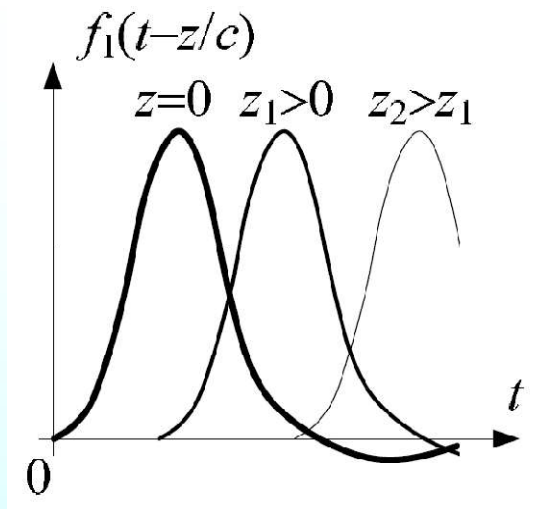
$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = 0$$

$$E_x(z, t) = f_1(t - z/c) + f_2(t + z/c)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$$

Функције f_1 и f_2 су произвољне функције једне променљиве

Талас у смеру z -осе



Први сабирак општег решења скаларне таласне једначине представља електрично поље таласа који се простире брзином c у смеру z -осе

Магнетско поље

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

Магнетско поље има само **y**-компоненту

$$E_x(z, t) = f_1(t - z/c) + f_2(t + z/c)$$

$$E_y = 0$$

$$E_z = 0$$

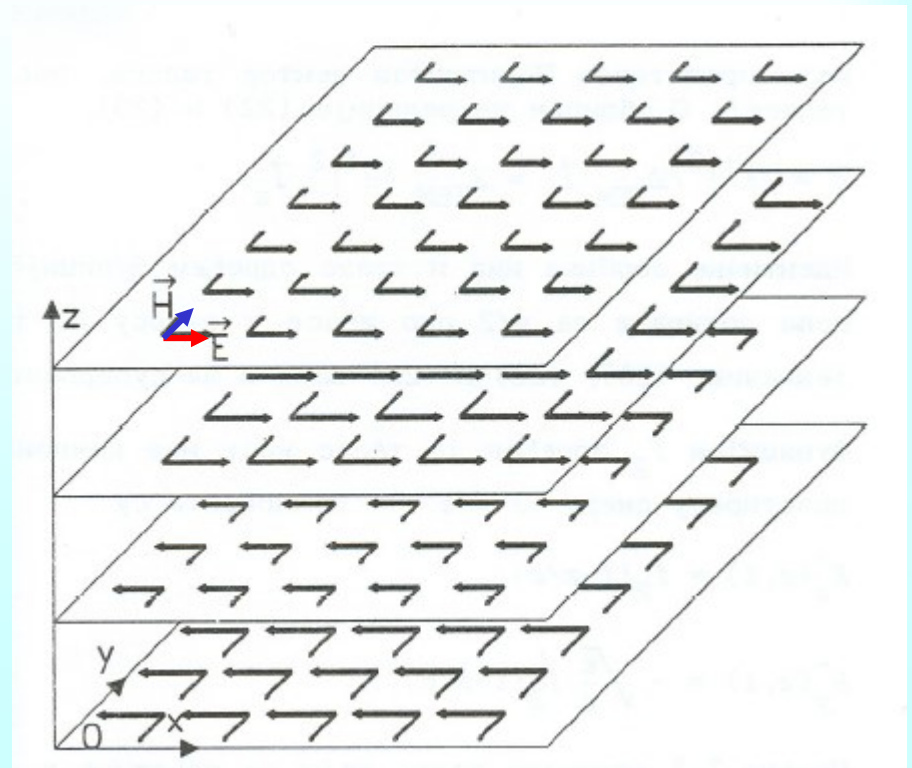
$$H_y(z, t) = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} f_1(t - z/c) - \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} f_2(t + z/c)$$

Прогресиван талас

$$E_x^+(z, t) = f_1(t - z/c)$$

$$H_y^+(z, t) = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} f_1(t - z/c)$$

Најједноставније решење је талас који се простира брзином c у смеру z -осе. Такав талас је **прогресиван талас**



Таласни фронт и еквифазне површи

- **Таласни фронт** је геометријско место тачака (г.м.т.) $z=ct$ које представља границу до које је талас стигао у тренутку t
- **Еквифазна површ** је г.м.т. које се налазе у истој фази осциловања
- Талас је раван (равански) ако су еквифазне површи и таласни фронт равни
- Таласни фронт и еквифазне површи равног таласа су **нормалне** на правац простирања

Униформан талас

- Свака равна нормална на правац простирања таласа назива се **трансверзална** (попречна) **равна** таласа
- Талас је **униформан** ако су електрично и магнетско поље **хомогени** у трансверзалним равнима
- У анализи смо **претпоставили** да се талас простира дуж осе **z**

Врсте таласа

- Према односу електричног и магнетског поља са једне стране, и правца простирања са друге стране, таласи се могу сврстати у **четири типа**:
- **ТЕМ**: поље лежи у трансверзалној равни
- **ТЕ**: електрично поље нема z -компоненту
- **ТМ**: магнетско поље нема z -компоненту
- **Хибридни**: оба поља имају z -компоненту

Таласна импеданса

$$|\mathbf{E}^+|/|\mathbf{H}^+| = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = Z_{\text{TEM}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \approx 376,73 \Omega \approx 120\pi \Omega$$

$$\mathbf{E}^+ = -Z_{\text{TEM}} \mathbf{i}_z \times \mathbf{H}^+$$

$$\mathbf{H}^+ = \frac{1}{Z_{\text{TEM}}} \mathbf{i}_z \times \mathbf{E}^+$$

$$\mathcal{P} = |\mathbf{E}^+|^2 \mathbf{i}_z / Z_{\text{TEM}} = Z_{\text{TEM}} |\mathbf{H}^+|^2 \mathbf{i}_z$$

Талас у смеру $-z$ -осе

$$E_x^-(z, t) = f_2(t+z/c)$$

$$H_y^-(z, t) = -\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} f_2(t+z/c)$$

$$|\vec{E}^-|/|\vec{H}^-| = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = Z_{\text{TEM}}$$

$$\vec{E}^- = Z_{\text{TEM}} \vec{i}_z \times \vec{H}^-$$

$$\vec{H}^- = -\frac{1}{Z_{\text{TEM}}} \vec{i}_z \times \vec{E}^-$$

Простопериодичан талас

$$E_x(z, t) = E_{x1} \sqrt{2} \cos(\omega(t - z/c) + \theta_1) + E_{x2} \sqrt{2} \cos(\omega(t + z/c) + \theta_2)$$

$$H_y(z, t) = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{x1} \sqrt{2} \cos(\omega(t - z/c) + \theta_1) - \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{x2} \sqrt{2} \cos(\omega(t + z/c) + \theta_2)$$

$$E_x(z, t) = E_{x1} \sqrt{2} \cos(\omega t - \beta z + \theta_1) + E_{x2} \sqrt{2} \cos(\omega t + \beta z + \theta_2)$$

$$H_y(z, t) = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{x1} \sqrt{2} \cos(\omega t - \beta z + \theta_1) - \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{x2} \sqrt{2} \cos(\omega t + \beta z + \theta_2)$$

Фазни коефицијент

$$\beta = \frac{\omega}{c} = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$$

Стојећи талас

- Суперпозицијом два прогресивна таласа истих учестаности, амплитуда и поларизација, који се простиру истим правцем, а у супротним смеровима настаје **стојећи талас**
- Везе компоненти електричног и магнетског поља код стојећег таласа нису једноставне као код прогресивног

Представљање TEM таласа

$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i}_x$$

$$\mathbf{H} = H_y \mathbf{i}_y$$

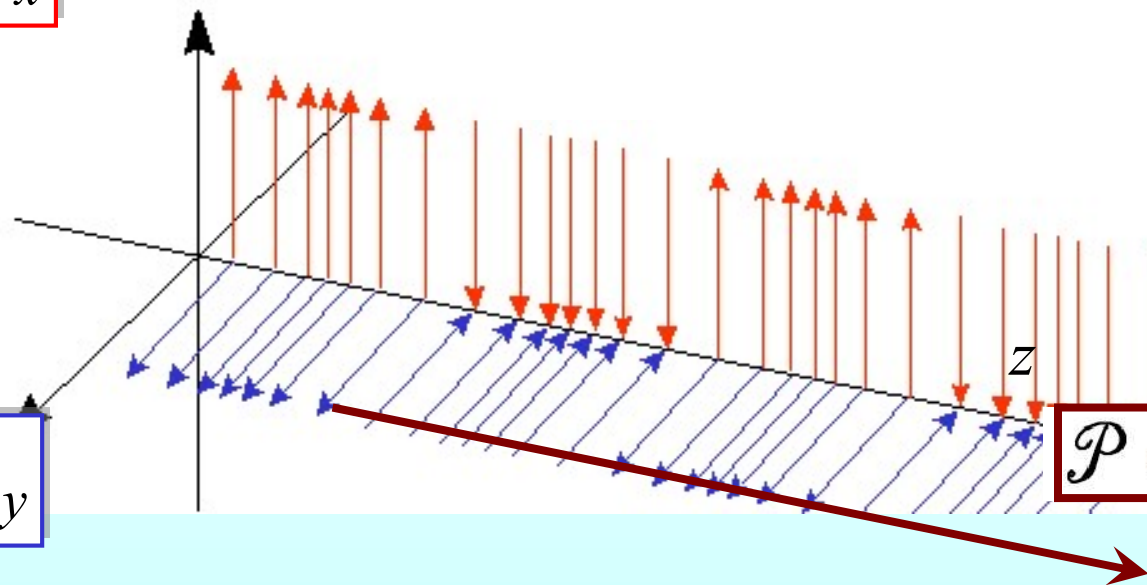
$$\mathcal{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

x

y

z

Правац и смер простирања таласа



Периодичност таласа

- Поље таласа је периодично у времену (по претпоставци)

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

- Поље таласа је периодично и у простору

- Просторни период таласа се назива **таласна дужина**

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

- Периодичност у простору постоји и за прогресиван и за стојећи талас

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Комплексни представници поља

$$\underline{E}_{x1} = E_{x1} e^{j\theta_1}, \quad \underline{E}_{x2} = E_{x2} e^{j\theta_2}$$

$$\underline{E}_x(z) = \underline{E}_{x1} e^{-j\beta z} + \underline{E}_{x2} e^{+j\beta z}$$

$$\underline{H}_y(z) = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \underline{E}_{x1} e^{-j\beta z} - \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \underline{E}_{x2} e^{+j\beta z}$$

Алтернативно извођење КОМПЛЕКСНИХ ПРЕДСТАВНИКА ПОЉА

$$\text{rot } \underline{\mathbf{E}} = -j\omega\mu \underline{\mathbf{H}}$$

$$\text{rot } \underline{\mathbf{H}} = j\omega\varepsilon \underline{\mathbf{E}}$$

$$\text{div } \underline{\mathbf{E}} = 0$$

$$\text{div } \underline{\mathbf{H}} = 0$$



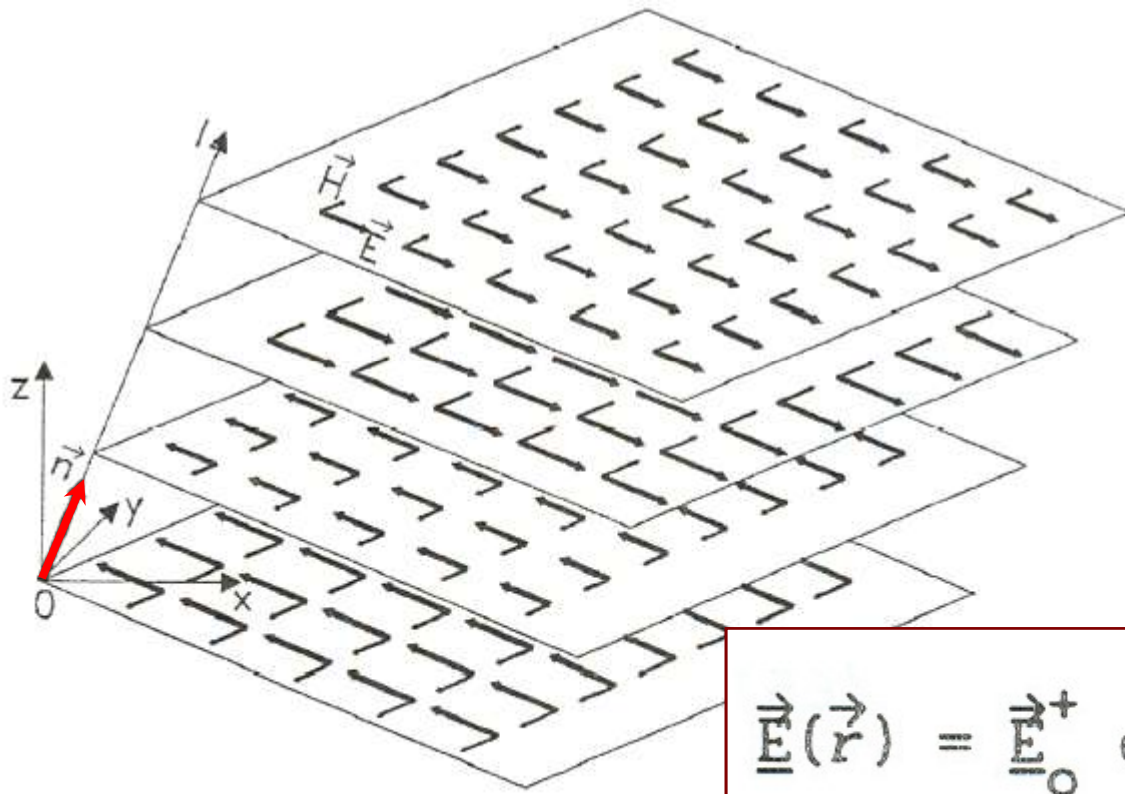
$$\Delta \underline{\mathbf{E}} + \omega^2 \varepsilon \mu \underline{\mathbf{E}} = 0$$



$$\frac{d^2 \underline{\mathbf{E}}}{dz^2} + \omega^2 \varepsilon \mu \underline{\mathbf{E}} = 0$$

$$\frac{d^2 \underline{E}_x}{dz^2} + \omega^2 \varepsilon \mu \underline{E}_x = 0$$

Опште једначине простирања



Талас се простира у правцу који је задат ортом \mathbf{n} , а једначине важе за произвољну тачку у простору одређену вектором положаја \mathbf{r}

$$\underline{\underline{\mathbf{E}}}(\vec{\mathbf{r}}) = \underline{\underline{\mathbf{E}}}_0^+ e^{-j\beta\vec{\mathbf{r}} \cdot \vec{\mathbf{n}}} + \underline{\underline{\mathbf{E}}}_0^- e^{+j\beta\vec{\mathbf{r}} \cdot \vec{\mathbf{n}}}$$

$$\underline{\underline{\mathbf{H}}}(\vec{\mathbf{r}}) = \frac{1}{Z_{\text{TEM}}} \vec{\mathbf{n}} \times \underline{\underline{\mathbf{E}}}_0^+ e^{-j\beta\vec{\mathbf{r}} \cdot \vec{\mathbf{n}}} - \frac{1}{Z_{\text{TEM}}} \vec{\mathbf{n}} \times \underline{\underline{\mathbf{E}}}_0^- e^{+j\beta\vec{\mathbf{r}} \cdot \vec{\mathbf{n}}}$$

Таласи у средини са губицима

$$\text{rot } \underline{\underline{H}} = \sigma \underline{\underline{E}} + j\omega \epsilon \underline{\underline{E}} = (\sigma + j\omega \epsilon) \underline{\underline{E}} = j\omega \epsilon_{-e} \underline{\underline{E}}$$

Уместо обичне пермитивности у једначине таласа се ставља еквивалентна пермитивност

$$\epsilon_{-e} = \epsilon + \sigma / (j\omega)$$

$$\epsilon_{-e} = \epsilon' - j\epsilon''$$

Еквивалентна пермитивност

$$\omega \sqrt{\epsilon \mu}$$



$$\omega \sqrt{\epsilon_{-e} \mu}$$

Сматрамо да је средина линеарна хомогена, преуређујемо другу Максвелову једначину, и уводимо еквивалентну комплексну пермитивност

Коефицијент простирања

$$\underline{\gamma} = \sqrt{-\omega^2 \underline{\epsilon}_e \underline{\mu}} = \alpha + j\beta$$

Коефицијент слабљења

Фазни
коефицијент

$$\underline{\underline{E}}(\vec{r}) = \underline{\underline{E}}_0 e^{-\underline{\gamma} \vec{r} \cdot \vec{n}}$$

Једначине прогресивног таласа

$$\underline{\underline{H}}(\vec{r}) = \frac{1}{\underline{Z}_{\text{TEM}}} \vec{n} \times \underline{\underline{E}}_0 e^{-\underline{\gamma} \vec{r} \cdot \vec{n}}$$

Таласна импеданса

$$\underline{Z}_{\text{TEM}} = \sqrt{\frac{\underline{\mu}}{\underline{\epsilon}_e}}$$

Реални диелектрик

$$\underline{\gamma} = \sqrt{-\omega^2 \epsilon (1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon}) \mu} \approx j\omega \sqrt{\epsilon \mu} (1 - \frac{1}{2} j \frac{\sigma}{\omega \epsilon})$$
$$= \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} + j\omega \sqrt{\epsilon \mu}$$

за добар
диелектрик

$$\sigma \ll \omega \epsilon$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'}$$

Тангенс угла губитака

$$\epsilon' = \epsilon_r \epsilon_0$$

$$\alpha = \frac{\beta}{2} \operatorname{tg} \delta$$

Добар проводник

$$\underline{\gamma} = \sqrt{j\omega \frac{2\sigma}{\omega} \mu} = \sqrt{j} \sqrt{\omega\mu\sigma} = \frac{\sqrt{2}}{2} (1+j) \sqrt{\omega\mu\sigma}$$

$$\sigma \gg \omega\epsilon$$

$$\epsilon = \epsilon_0$$

$$\epsilon_e \approx -j\sigma/\omega$$

$$\alpha = \beta = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\omega\mu\sigma} = \sqrt{\pi\mu f\sigma}$$

$$\underline{Z}_{\text{TEM}} = \sqrt{\frac{\mu}{-j \frac{\sigma}{\omega}}} = \sqrt{j\omega\mu/\sigma} = (1+j) \sqrt{\pi\mu f/\sigma}$$

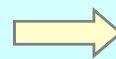
Дубина продирања

Дубина продирања је дужина на којој ефективна вредност поља таласа опадне $e=2.718282$ пута

$$\underline{\underline{E}}(\vec{r}) = \underline{\underline{E}}_0 e^{-\underline{\underline{\gamma}}\vec{r}\cdot\vec{n}} \quad e^{-\underline{\underline{\gamma}}\vec{r}\cdot\vec{n}} = e^{-\alpha\vec{r}\cdot\vec{n}} e^{-j\beta\vec{r}\cdot\vec{n}}$$

$$\left| e^{-\underline{\underline{\gamma}}\vec{r}\cdot\vec{n}} \right| = e^{-1} \quad \longrightarrow \quad e^{-\alpha\vec{r}\cdot\vec{n}} = e^{-1} \quad \longrightarrow \quad \delta_p = \frac{1}{\alpha}$$

$$\sigma_{\text{Cu}} = 56 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$$



$$\delta_{p,\text{Cu}}(50 \text{ Hz}) = 9,5 \text{ mm}$$

$$\delta_{p,\text{Cu}}(1 \text{ MHz}) = 67 \mu\text{m}$$

Одбијање и преламање
униформних равних таласа

Нормална инциденција униформних равних таласа

Инцидентан талас

- Простопериодичан униформ. раван талас
- Талас наилази из савршеног диелектрика **нормално** на савршено проводну раван
- Поље таласа је линијски поларизовано
- Талас је означен као **инцидентни талас**
- Поинтингов вектор таласа је у правцу простирања и поклапа се са **z** -осом

Рефлектован талас

- У савршеном проводнику не може постојати поље
- На површи равни се индукују струје и наелектрисања која поништавају поље инцидентног таласа у проводнику
- Јавља се униформан раван талас, означен као **рефлектован талас**, који се простире у супротном смеру од инцидентног таласа

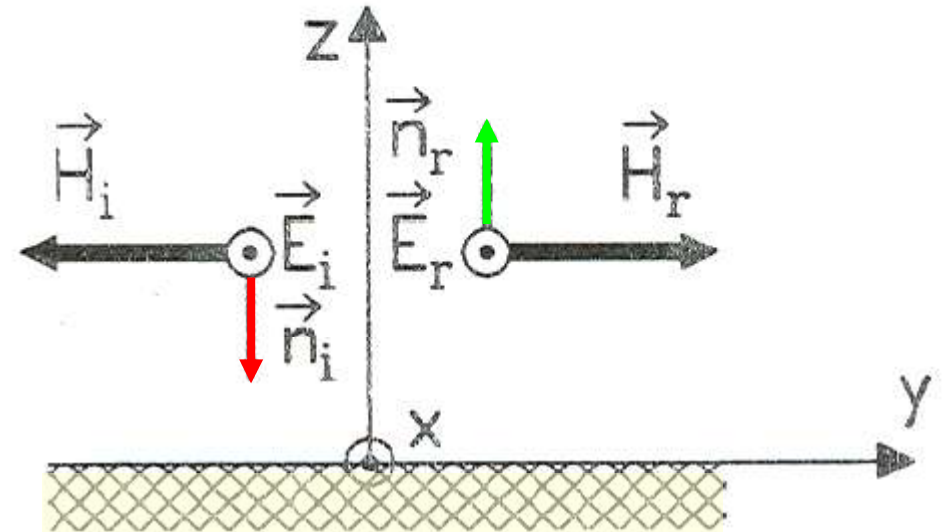
Нормална инциденција

$$\underline{E}_{xi} = \underline{E}_{i0} e^{j\beta z}$$

$$\underline{H}_{yi} = -\frac{\underline{E}_{i0}}{Z_{\text{TEM}}} e^{j\beta z}$$

$$\underline{E}_{xr} = \underline{E}_{r0} e^{-j\beta z}$$

$$\underline{H}_{yr} = \frac{\underline{E}_{r0}}{Z_{\text{TEM}}} e^{-j\beta z}$$



$z=0$

$$\underline{E}_x = \underline{E}_{xi} + \underline{E}_{xr}$$

$$\underline{E}_x(z=0) = 0$$

Поље нормалне инциденције

$$\underline{E}_x(z=0) = 0 \quad \longrightarrow \quad \underline{E}_{i0} + \underline{E}_{r0} = 0$$

$$\underline{E}_x = \underline{E}_{i0} e^{j\beta z} - \underline{E}_{i0} e^{-j\beta z} = 2j \underline{E}_{i0} \sin \beta z$$

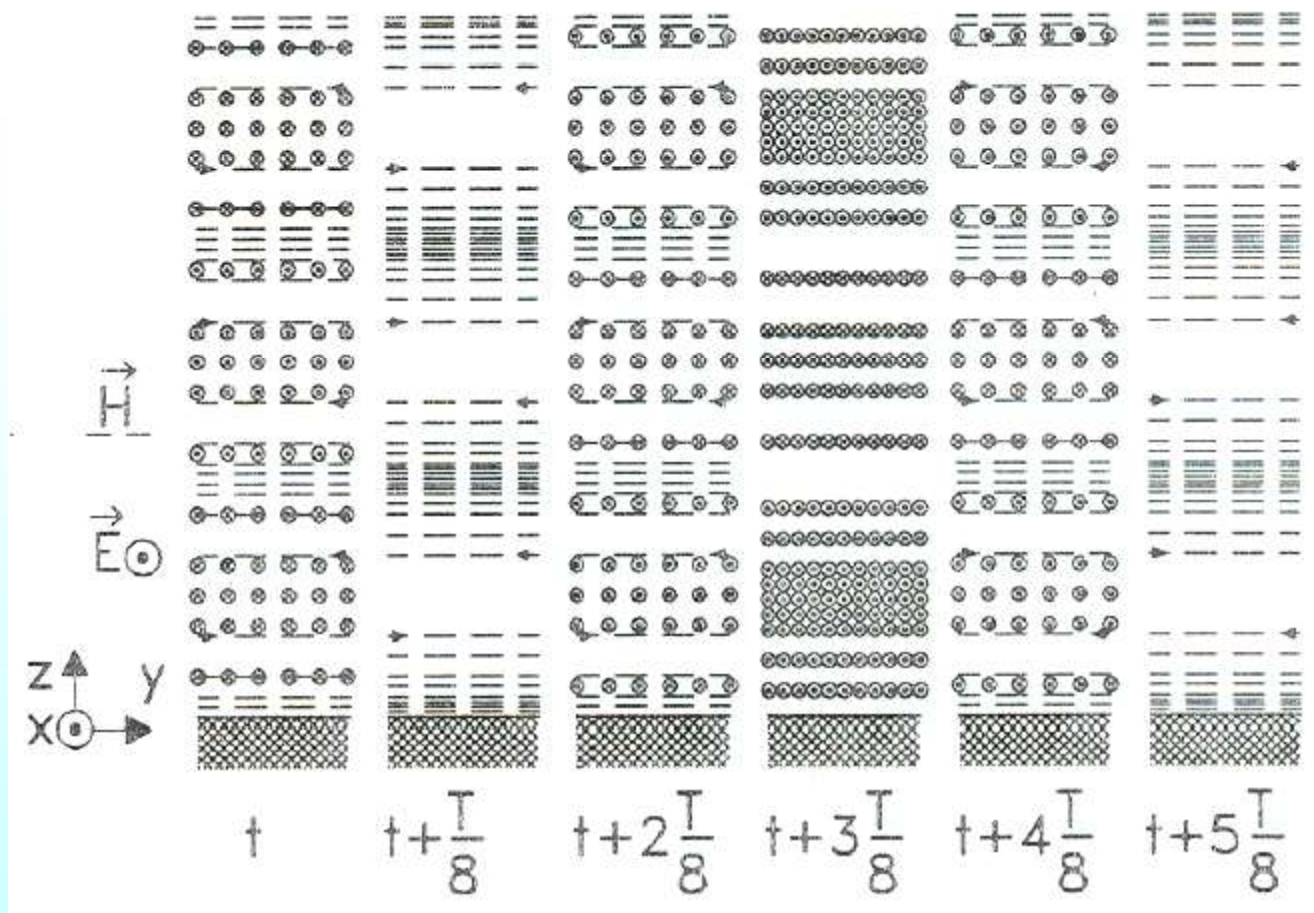
$$\underline{H}_y = \underline{H}_{yi} + \underline{H}_{yr} = -\frac{\underline{E}_{i0}}{Z_{\text{TEM}}} e^{j\beta z} - \frac{\underline{E}_{i0}}{Z_{\text{TEM}}} e^{-j\beta z}$$

$$= -\frac{2\underline{E}_{i0}}{Z_{\text{TEM}}} \cos \beta z$$

Електрично поље је једнако нули на висинама које су целобројни умножак половине таласне дужине

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}$$

Структура поља норм. инцид.



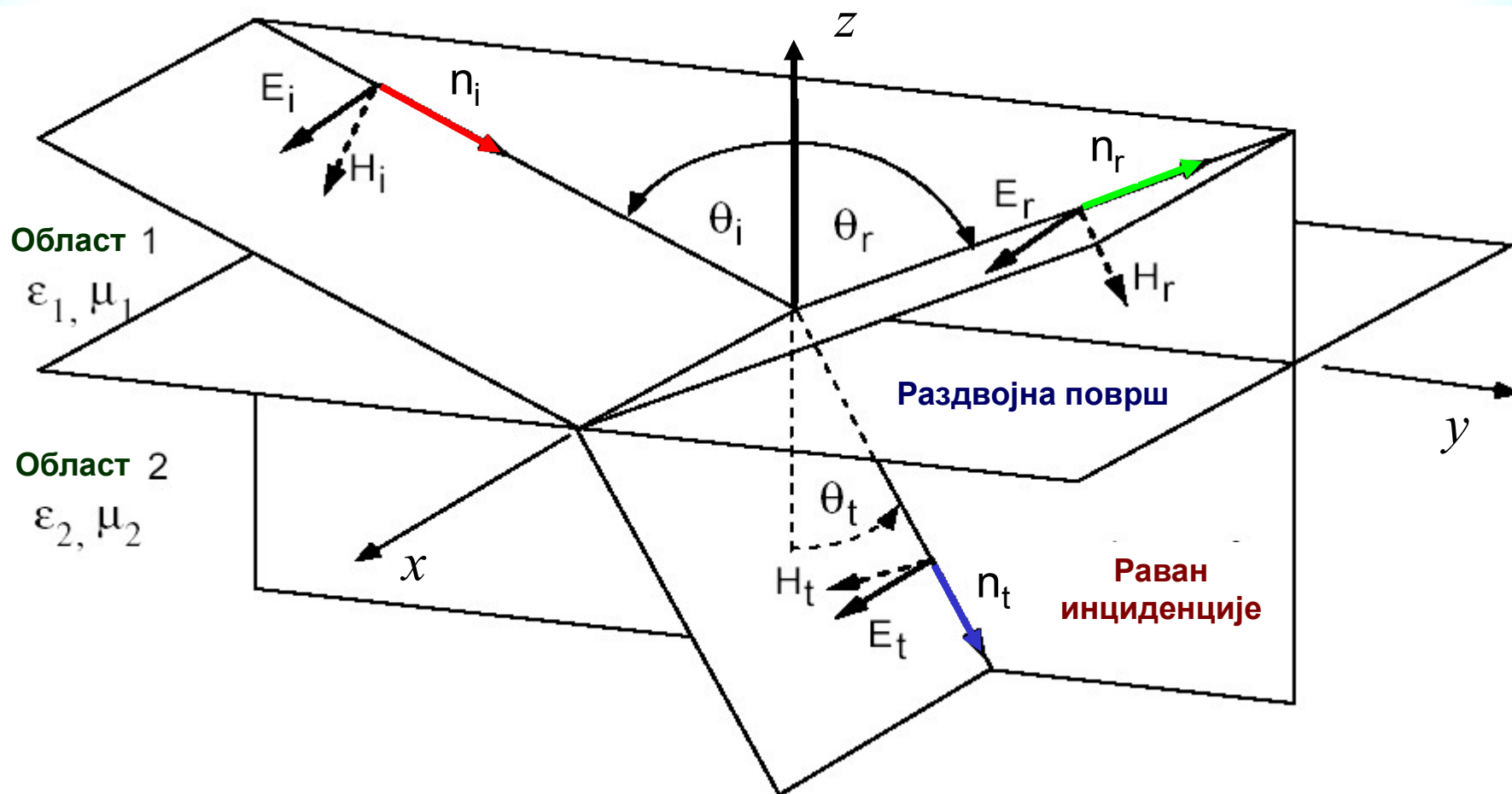
Структура резултантног поља нормалне инциденције изнад проводне равни

Фабри-Пероов резонатор

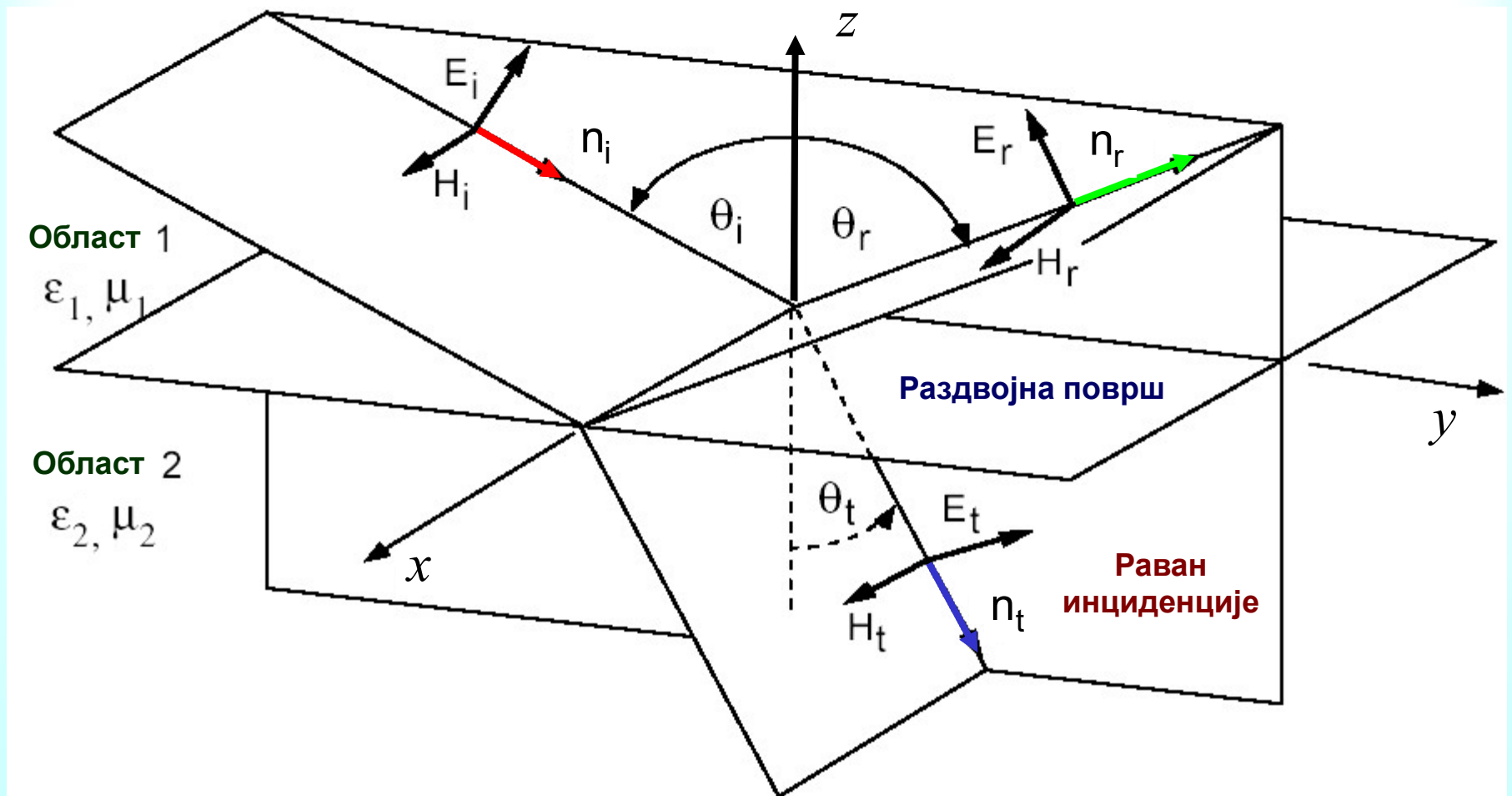
- На било којој висини на којој је електрично поље једнако нули може се поставити проводна фолија
- Поље се може укинути изнад фолије а да између фолије и проводне равни остане стојећи талас
- Такав систем је **Фабри-Пероов резонатор**

Коса инциденција униформних равних таласа

Нормална поларизација



Паралелна поларизација

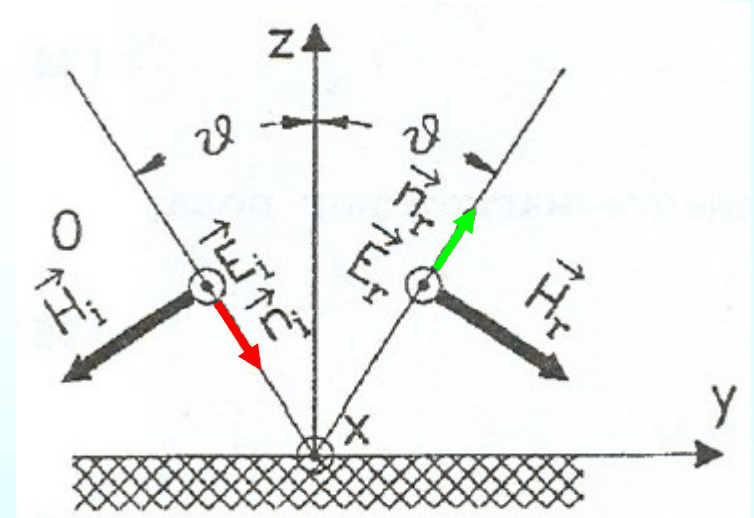


Нормална поларизација

Коса инциденција униформног
равног таласа на савршено
проводну раван

Електрично поле и нормале

$$\underline{E}_{xi} = \underline{E}_{io} e^{-j\beta \vec{r} \cdot \vec{n}_i}$$
$$\underline{E}_{xr} = \underline{E}_{ro} e^{-j\beta \vec{r} \cdot \vec{n}_r}$$



$$\vec{n}_i = \vec{i}_y \sin \theta - \vec{i}_z \cos \theta$$

$$\vec{n}_r = \vec{i}_y \sin \theta + \vec{i}_z \cos \theta$$

$$\vec{r} = x\vec{i}_x + y\vec{i}_y + z\vec{i}_z$$

Гранични услов

$$\underline{E}_{xi} = \underline{E}_{io} e^{-j\beta(y \sin \theta - z \cos \theta)}$$

$$\underline{E}_{x\Gamma} = \underline{E}_{ro} e^{-j\beta(y \sin \theta + z \cos \theta)}$$

$$z=0$$

$$\underline{E}_{io} + \underline{E}_{ro} = 0$$

$$\underline{E}_x = 2j\underline{E}_{io} \sin(\beta z \cos \theta) e^{-j\beta y \sin \theta}$$

Магнетско поље

$$\underline{H}_{yi} = - \frac{\underline{E}_{i0}}{Z_{\text{TEM}}} e^{-j\beta(y \sin \theta - z \cos \theta)} \cos \theta$$

$$\underline{H}_{zi} = - \frac{\underline{E}_{i0}}{Z_{\text{TEM}}} e^{-j\beta(y \sin \theta - z \cos \theta)} \sin \theta$$

$$\underline{H}_{yr} = \frac{\underline{E}_{r0}}{Z_{\text{TEM}}} e^{-j\beta(y \sin \theta + z \cos \theta)} \cos \theta$$

$$\underline{H}_{zr} = - \frac{\underline{E}_{r0}}{Z_{\text{TEM}}} e^{-j\beta(y \sin \theta + z \cos \theta)} \sin \theta$$

Резултантно (укупно) поле

$$\underline{E}_x = 2jE_{i0} \sin(\beta z \cos \theta) e^{-j\beta y \sin \theta}$$

$$\underline{H}_y = -2 \frac{E_{i0}}{Z_{\text{TEM}}} \cos(\beta z \cos \theta) e^{-j\beta y \sin \theta} \cos \theta$$

$$\underline{H}_z = -2j \frac{E_{i0}}{Z_{\text{TEM}}} \sin(\beta z \cos \theta) e^{-j\beta y \sin \theta} \sin \theta$$

Периодичност поља

- Резултантно поље је периодично по координати y са периодом $\lambda/\sin(\theta)$
- Резултантно поље је периодично по координати z са периодом $\lambda/\cos(\theta)$
- Поље се креће у смеру y -осе и еквивалентни фазни коефицијент је $\beta \sin(\theta)$
- Поље има особине стојећег таласа у правцу z -осе

Вођење са две равни

- Изнад проводне равни, на висинама на којима је електрично поље једнако нули може се поставити савршено **проводна** фолија која са проводном равни заграђује део простора
- Систем фолија-раван чине једноставан систем за вођење таласа и поље изнад фолије се може **укинути**

Вођење са 4 равни – таласовод

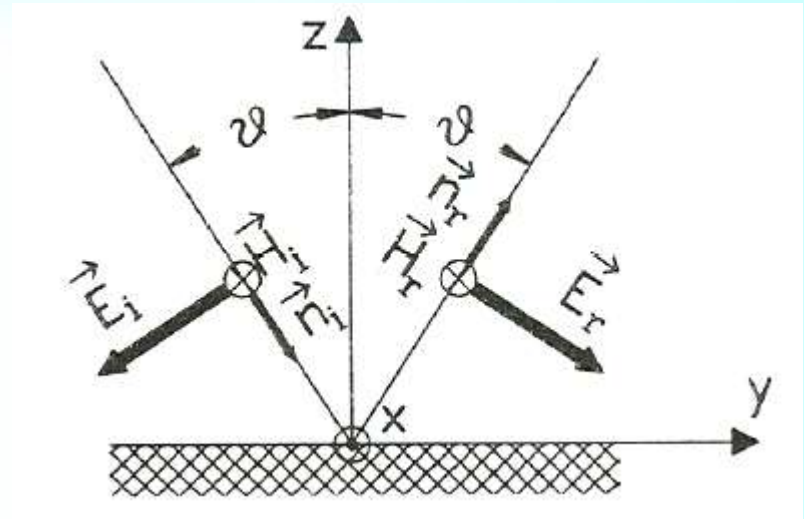
- Нормално на x -осу могу да се поставе још две савршено проводне фолије зато што је електрично поље нормално на њих па су гранични услови задовољени
- Три фолије и раван чине цеваст систем за вођење таласа, правоугаоног попречног пресека, који се назива **таласовод**

Паралелна поларизација

Коса инциденција униформног
равног таласа на савршено
проводну раван

Урадити за вежбу

Поље паралелне поларизације



$$\underline{E}_y = -2j\underline{E}_{i0} \sin(\beta z \cos \theta) e^{-j\beta y \sin \theta} \cos \theta$$

$$\underline{E}_z = -2\underline{E}_{i0} \cos(\beta z \cos \theta) e^{-j\beta y \sin \theta} \sin \theta$$

$$\underline{H}_x = -2 \frac{\underline{E}_{i0}}{Z_{\text{TEM}}} \cos(\beta z \cos \theta) e^{-j\beta y \sin \theta}$$

Губици

Средња снага Цулових губитака
реалне проводне равни

Џулови губици проводне равни

- У идеализованој анализи сматрамо да је проводна раван **савршена** и одређујемо електрично и магнетско поље таласа
- Из тангенцијалне компоненте магнетског поља на површи **реалног** проводника може се одредити површинска густина средње снаге Џулових губитака проводника дате коначне проводности

Густина Дулових губитака

Површинска густина
средње снаге губитака

$$\frac{dP_J}{dS} = R_s |\underline{H}_{tg}|^2$$

Површинска отпорност

$$R_s = \sqrt{\pi \mu_2 f / \sigma_2}$$

Ефективна вредност
тангенцијалне
компоненте магнетског
поља на површи
реалног проводника

Укупна снага Дулових губитака

$$P_J = \int_S R_s |\underline{H}_{tg}|^2 dS$$

Површ реалног проводника

Практичне појединости

Опсези учестаности и ознаке,
вертикална и хоризонтална
поларизација таласа

Опсези учестаности ЕМ таласа

Типични опсези

АМ радиодифузија *	526,5 – 1606,5 kHz
краткоталасни опсег*	3 – 30 MHz
FM радиодифузија	87,5 – 108 MHz
VHF I (TV канали 2 – 4, Европа)	47 – 68 MHz
VHF III (TV 5 – 12, Европа)	174 – 230 MHz
UHF IV, V (TV 21 – 69, Европа)	470 – 862 MHz
мобилна мрежа (САД)	824 – 849 MHz
	869 – 894 MHz
GSM мобилна мрежа (Европа)	880 – 915 MHz
	925 – 960 MHz
GPS	1575,42 MHz
	1227,60 MHz
Микроталасне рерне	2,45 GHz
DBS (САД)	11,7 – 12,5 GHz
ISM (САД)	902 – 928 GHz
	2,400 – 2,484 GHz
	5,725 – 5,850 GHz
UWB радио (САД)	3,1 – 10,6 GHz

Називи и ознаке

Средњи таласи	0,3 – 3 MHz
Кратки таласи (HF)	3 – 30 MHz
VHF таласи	30 – 300 MHz
Ултратратки таласи	0,3 – 3 GHz
L опсег	1 – 2 GHz
S опсег	2 – 4 GHz
C опсег	4 – 8 GHz
X опсег	8 – 12 GHz
Ku опсег	12 – 18 GHz
K опсег	18 – 26 GHz
Ka опсег	26 – 40 GHz
U опсег	40 – 60 GHz
V опсег	50 – 75 GHz
E опсег	60 – 90 GHz
W опсег	75 – 110 GHz
F опсег	90 – 140 GHz

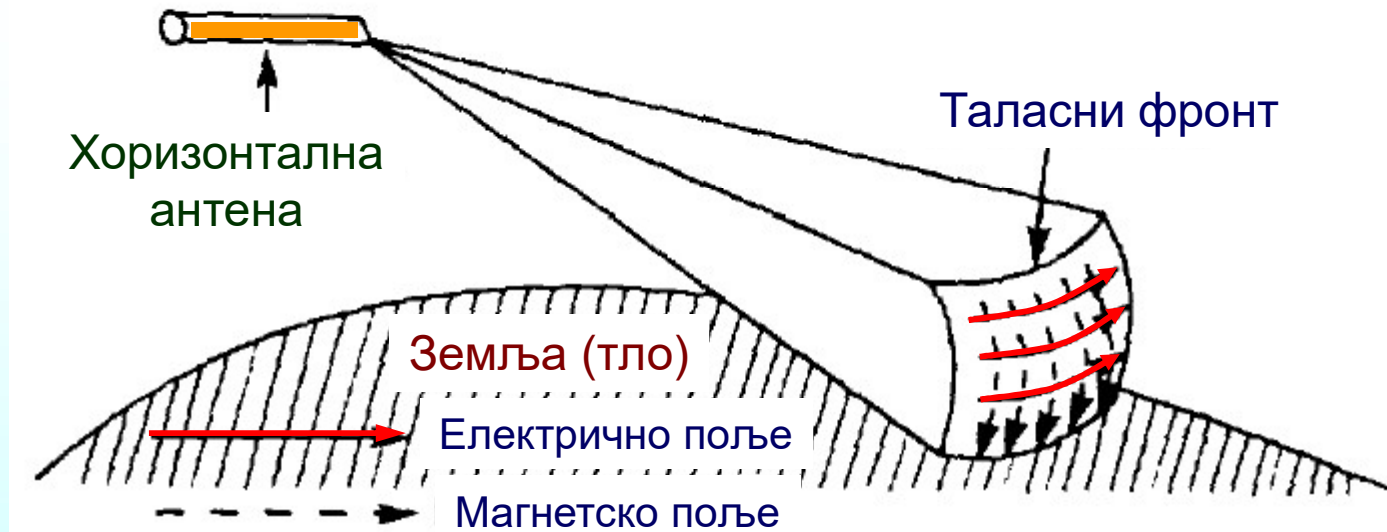
*предстоји увођење дигиталних система

WiFi, WLAN, Bluetooth

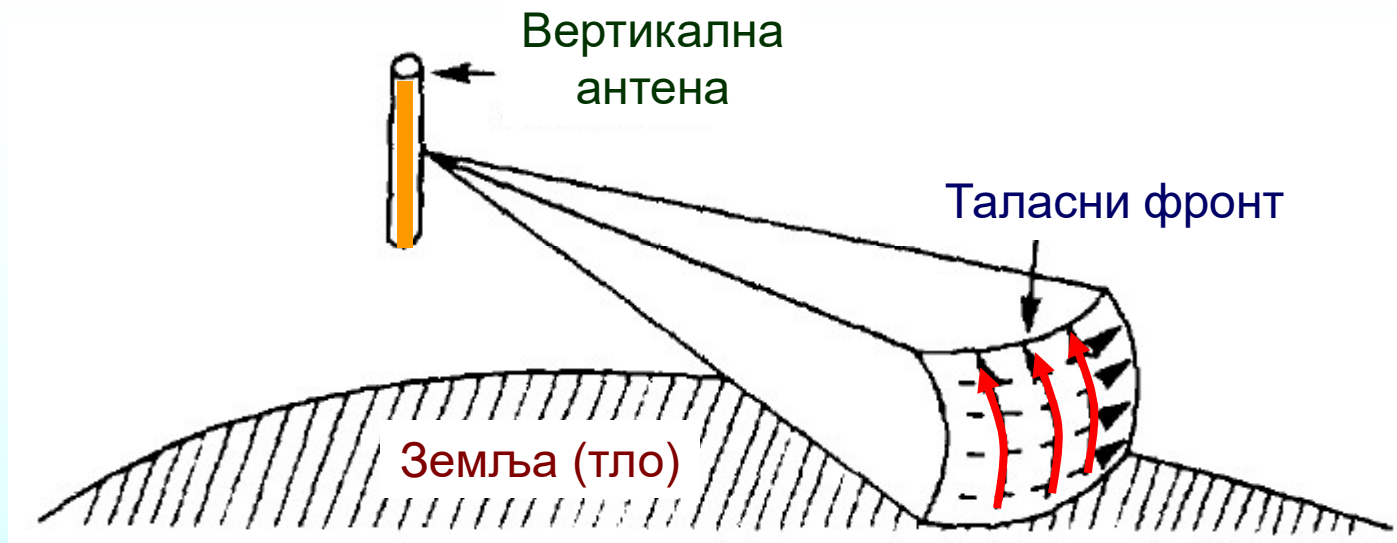
Вертикална и хоризонтална поларизација таласа

- Електромагнетски талас је **вертикално** поларизован ако је вектор електричног поља таласа нормалан на земљу
- Електромагнетски талас је **хоризонтално** поларизован ако је вектор електричног поља таласа паралелан земљи

Хоризонтална поларизација



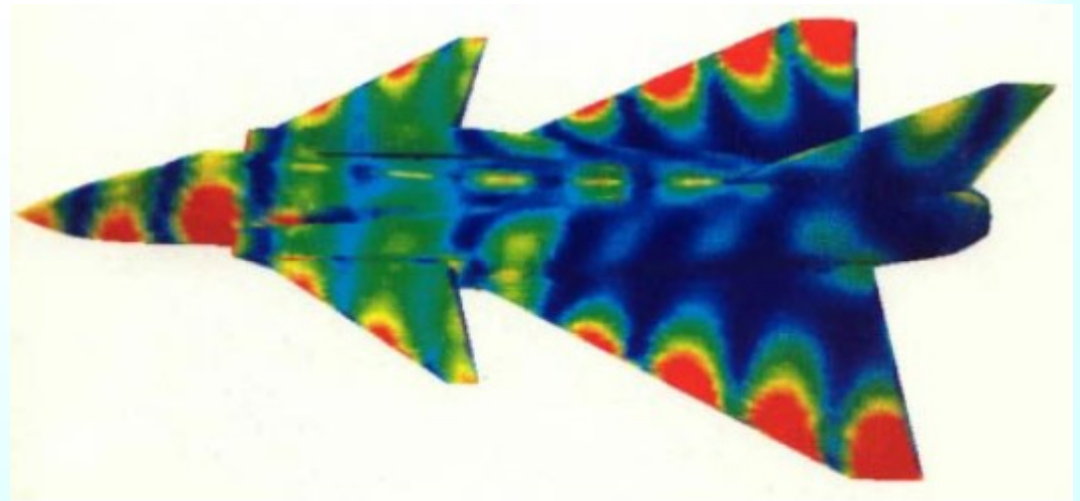
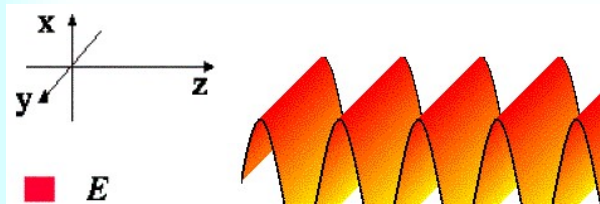
Вертикална поларизација



Значај теорије таласа

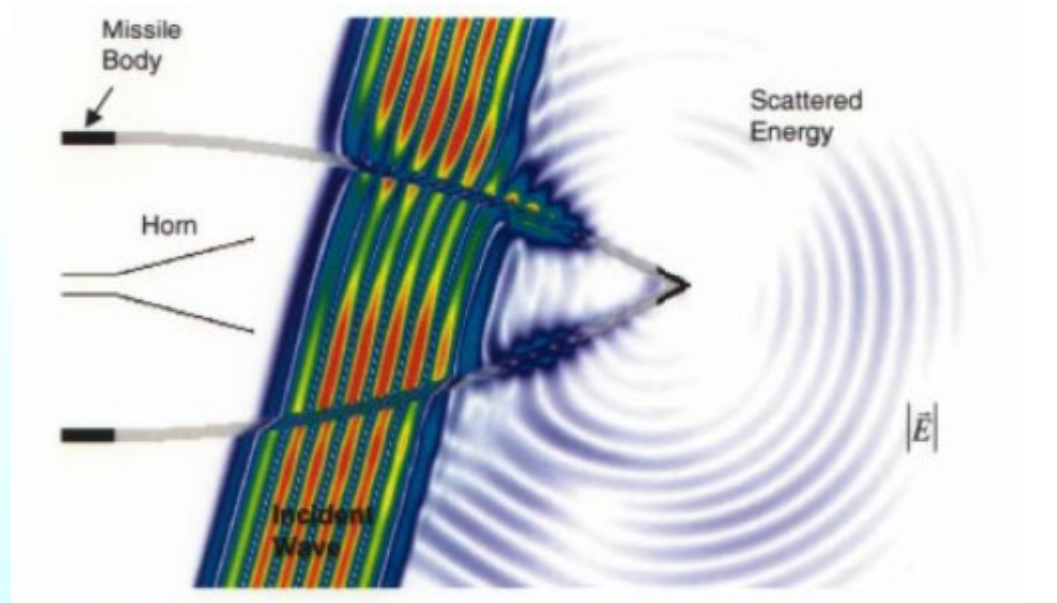
Изабрани примери

Рефлектовани талас летилице



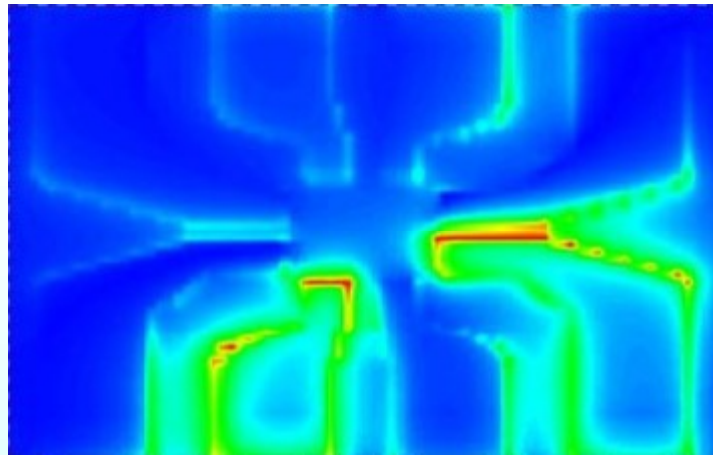
Униформан раван талас се простире дуж осе летелице с лева на десно и узрокује рефлектован талас. Црвено су делови летелице који највише одбијају талас. Симулација одговара учестаности од 100 MHz.

Продирање таласа у летелицу



Униформан раван талас се простире с десна на лево под углом од 15 степени у односу на осу летелице. Црвено је област унутар летелице где је поље јаче. Талас је симулиран као електромагнетски импулс нуклеарне експлозије (EMP).

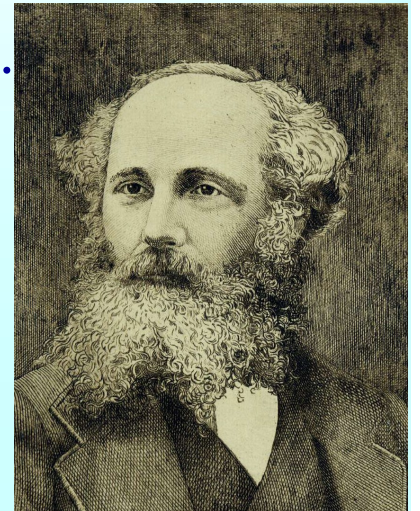
Преслушавање код микрочипа



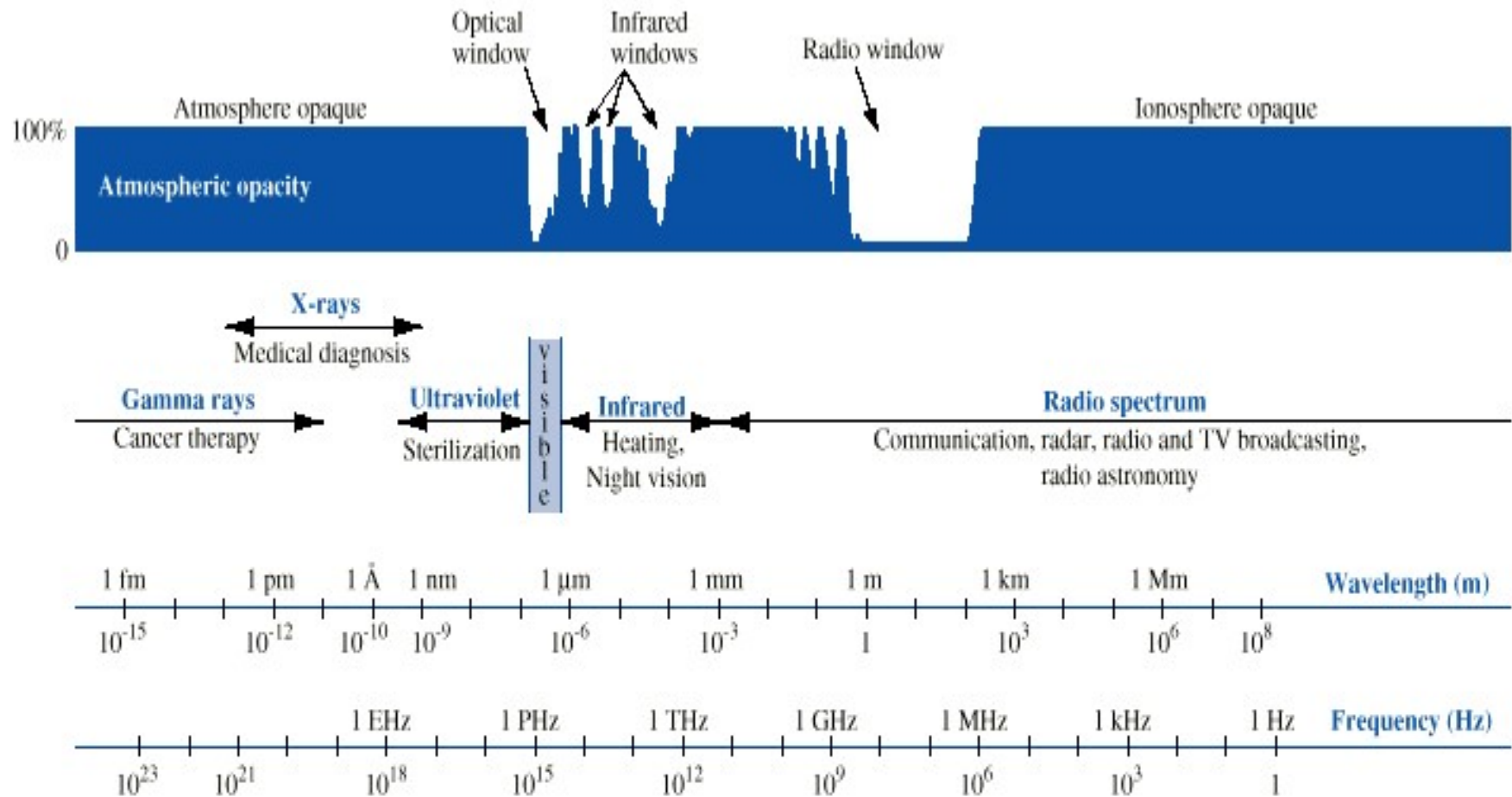
Међусобна спрега (нежељена) прикључака интегрисаног кола. На прикључак са десне стране се доводи сигнал (импулс напона). Сигнал ствара поље које се појављује у околини суседних прикључака као да је и ту доведен напон.

Maxwell the Man (1831–1879)

- Scottish Mathematician and Physicist, graduated Cambridge 1855.
- Professorship at Aberdeen in 1856.
- His best work was between the years 1864-1873, when he placed into mathematical form the speculations of *Faraday* concerning magnetic lines of force.
- Unifying theory of electricity and magnetism.
- Showed that oscillation of electric charge produces **radiation**.
- Rejected the idea that electricity consisted of particles.
- Believed that the ether existed.
- His predictions were verified by *Heinrich Hertz*.
- *Maxwell's* equations still **valid**!



Електромагнетски спектар



Задаци и питања за вежбу

Самостални рад студента

Задатак за вежбу

- Униформан раван простопериодичан ЕМ талас управно наилази на бакарну плочу.
- Како и на ком месту треба поставити малу контуру да би се у њој индуковала емс највеће амплитуде? Одредити ту емс.
- Колика је површинска густина средње снаге Дулових губитака плоче?

Претпоставке за задатак

- Талас наилази из ваздуха
- Учестаност таласа је $2,4 \text{ GHz}$ или 5 GHz
- Сматрати да је плоча савршено проводна раван при одређивању поља
- Поларизација је линијска или кружна
- Специфична проводност бакра је 56 MS/m
- Ефективна вредност електричног поља инцидентног таласа је 1 V/m

Претпоставке за контуру

- Контура је равна кружног, квадратног, или правоугаоног облика
- Обим контуре је много мањи од таласне дужине таласа
- Поље је хомогено у околини контуре
- Контура је изнад плоче (не додирује је)
- Површина контуре је 10 mm^2



наставиће се...