

Prednáška 07:
VYŽAROVANIE ELM VLNENIA Z
RÔZNYCH ZDROJOV

doc. Ing. Ľuboš Ovseník, PhD.
(lubos.ovsenik@tuke.sk, tel. 421 55 602 4336)

[http://kemt-old.fei.tuke.sk/predmety/EVaA/_materialy/
Prednasky/Pr07/Pr07.pdf](http://kemt-old.fei.tuke.sk/predmety/EVaA/_materialy/Prednasky/Pr07/Pr07.pdf)

<http://los.fei.tuke.sk/>

Obsah prednášky

- Elektromagnetické pole všeobecných zdrojov
- Elektromagnetické pole elementárnych zdrojov
 - Elementárny elektrický dipól
 - Elementárny magnetický dipól
 - Elementárna apertúra
 - Elementárna štrbina
- Elektromagnetické pole sústavy zdrojov
- Vzťah medzi vysielačou a prijímacou anténou
- Vlnová a geometrická optika

Elektromagnetické pole všeobecných zdrojov

- **Základnou úlohou**, ktorú je potrebné riešiť pre popísanie vlastnosti antén, je tzv. **vonkajšia úloha elektrodynamiky** (výpočet elektromagnetického poľa vo voľnom priestore vytvoreného ľubovoľnými zdrojmi (voľnými nábojmi a prúdmi), rozloženými v ohraničenom objeme V)
- Riešenie tejto úlohy vedie na **nehomogénne vlnové rovnice**

pre vektory \vec{E} a \vec{H}

- Vzhľadom na komplikovaný tvar pravých strán (zdrojových funkcií) týchto rovníc sa ukázalo ako **výhodné použiť**

pomocné funkcie – skalárny ψ a vektorový \vec{A} potenciál

- **Vlnové rovnice** majú potom tvar (\vec{j} - hustota vodového prúdu, ρ - hustota voľného náboja)

$$\Delta \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu \vec{J}$$

$$\Delta \psi + k^2 \psi = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

- Pre harmonicky premenné pole možno **skalárny potenciál** vyjadriť Lorentzovou kalibračnou podmienkou

$$\psi = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \operatorname{div} \vec{A}$$

- Pre **fázory intenzity** elektrického a magnetického poľa platí

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} - \frac{j}{\omega\epsilon\mu} \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{A}$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A}$$

- **Riešenie vlnovej rovnice vektorového potenciálu**, ktorá je nehomogénnou parciálnou diferenciálnou rovnicou, sa skladá z riešenia **homogénnej rovnice** a **partikulárneho integrálu** nehomogénnej rovnice

$$\Delta \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu \vec{J}$$

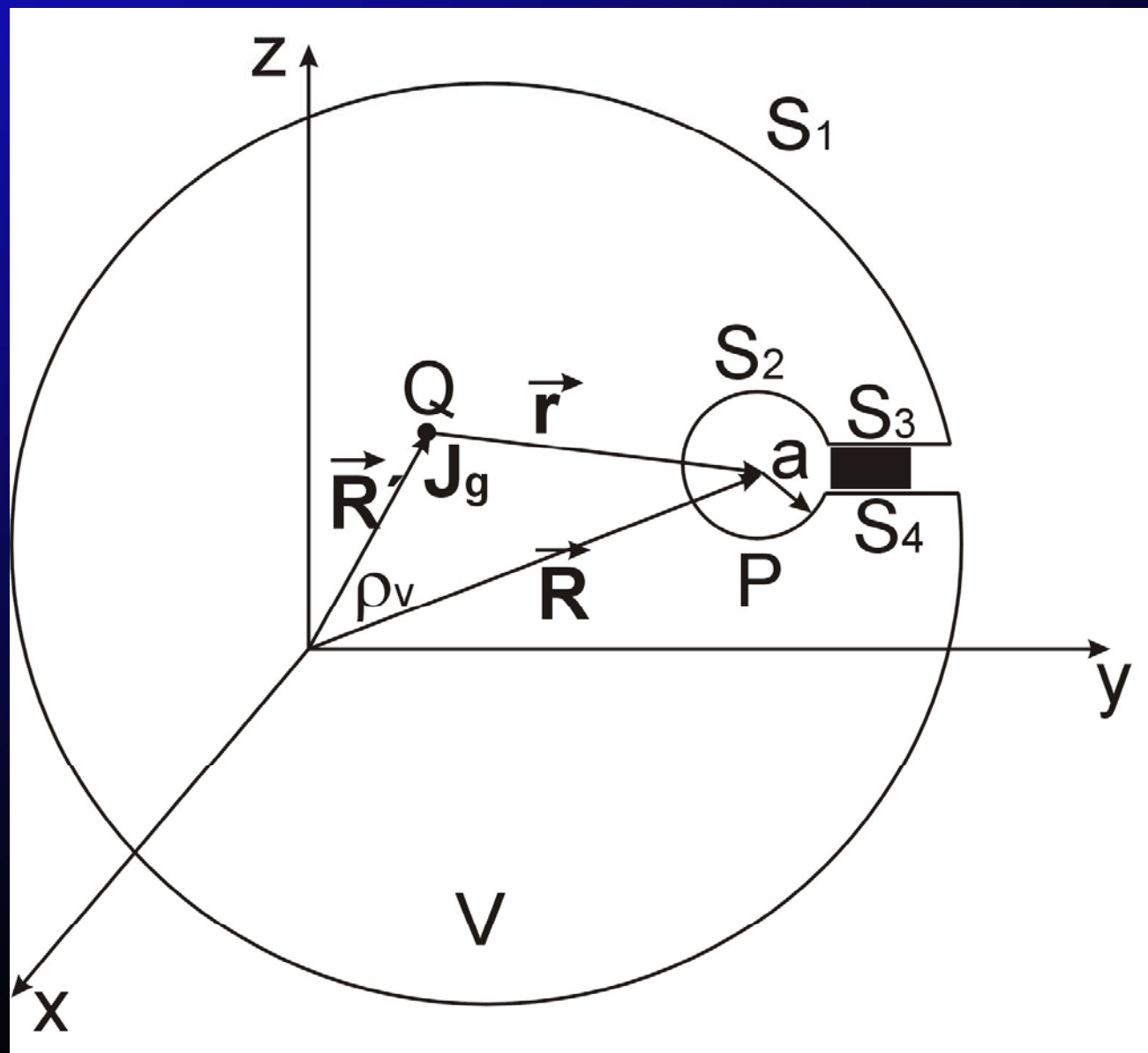
■ Určenie partikulárneho integrálu (obr.7.1):

- nech **zdroje elektromagnetického poľa** ρ , \mathbf{J} sú sústredné v okolí začiatku súradnicovej sústavy
- **všeobecný bod zdrojovej oblasti** označíme \mathbf{Q} a jeho vektor

polohy \vec{R}'

- bod, v ktorom hľadáme hodnotu vektorového potenciálu \mathbf{A} , označíme \mathbf{P} (**bod pozorovania**) a jeho polohový vektor \vec{R}

Obr.7.1 Geometria odvodenia partikulárneho integrálu vlnovej rovnice



- Partikulárny integrál rovnice je

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \vec{J} \frac{e^{-jkr}}{r} dV$$

- **vektorový potenciál** v bode P je teda daný superpozíciou

príspevkov od elementárnych zdrojov $\vec{J} dV$ v jednotlivých bodoch „ Q “

- **elementárna vlna** (zodpovedajúca určitému príspevku) sa šíri ako uniformná guľová vlna zo zdrojového bodu „ Q “ do miesta pozorovania „ P “

- **veľkosť tohto príspevku** závisí od veľkosti zdrojovej funkcie \vec{J} v bode „ Q “ a od vzdialenosti r medzi bodmi „ Q “ a „ P “

- **sčítanie príspevkov** je nutné robiť v časovej aj priestorovej

oblasti, pretože vektorová funkcia \vec{J} môže mať vo všeobecnosti v každom zdrojovom bode iný smer

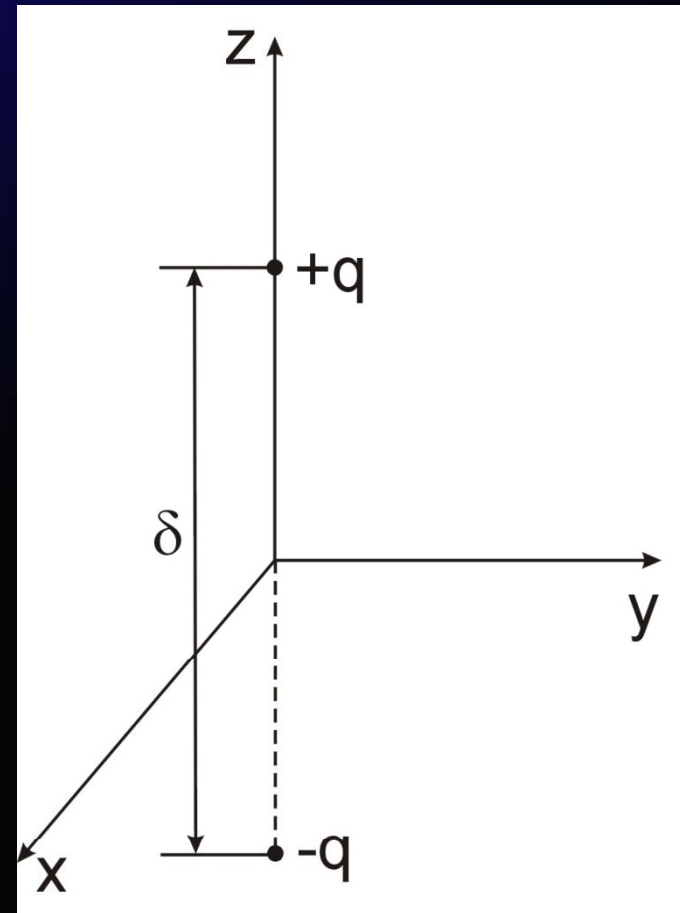
Elektromagnetické pole elementárnych zdrojov

- Pri analýze zdrojov elm poľa všeobecných zdrojov je výhodné poznať elm pole niektorých jednoduchých (**elementárnych**) zdrojov
- Tieto **elementárne zdroje** v praxi nemusia byť (a ani nie sú) realizovateľné,
 - ale **umožňujú analyzovať** elm pole zložitejších (reálnych) antén
 - a **slúžia ako názorný model** pri kvalitatívnej analýze vyžarovaných elm vln
- Zložky elm poľa **vieme vypočítať**, ak poznáme rozloženie amplitúdy a fázy prúdu v priestore
- **Elementárne zdroje** elm vln **sú žiariče**, v ktorých rozloženie nábojov, prúdov alebo tangenciálnych zložiek elm poľa je **konštantné**: to znamená, že **amplitúdy** a **fázy** uvedených veličín sú v **každom bode elementárneho žiariča rovnaké**

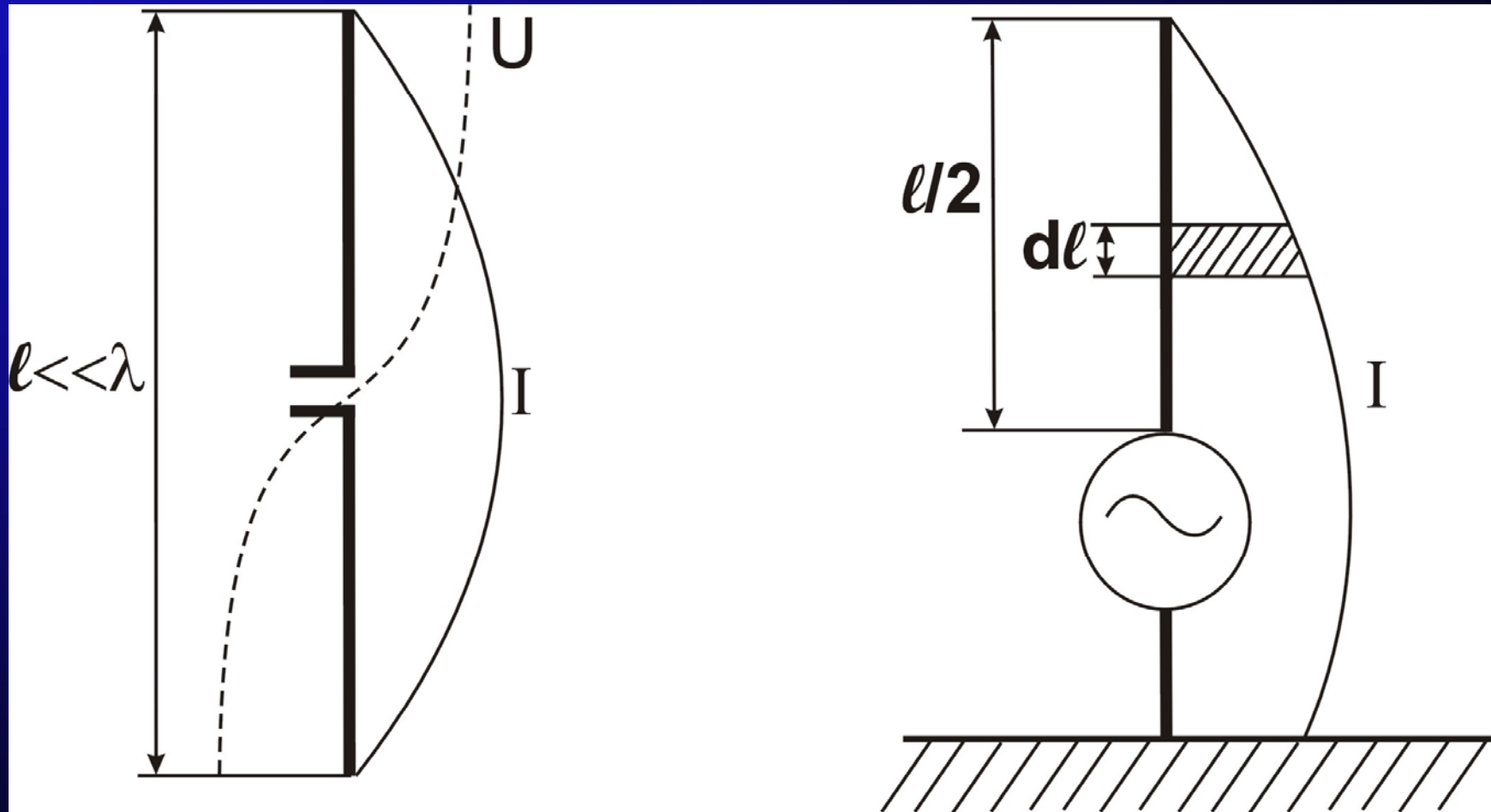
- Ľubovoľnú skutočnú anténu možno považovať za súbor elementárnych zdrojov
- Aby sa vytvorilo v priestore elm pole, ktoré by sa ním aj šírilo, musí existovať také zariadenie, v ktorom sa mení elektrický prúd v závislosti od času
- Takéto zariadenie nazývame žiaričom elm energie alebo anténou
- Najjednoduchšou anténou z hľadiska procesu premeny elektrickej energie na elm pole je elementárny žiarič
- Takýmto je vodič
 - ktorého rozmery v porovnaní s vlnovou dĺžkou sú malé
 - pri ktorom je rozloženie prúdu pozdĺž vodiča v každom okamihu rovnaké
- Za elementárne žiariče považujeme
 - elementárny elektrický dipól
 - elementárny magnetický dipól
 - elementárnu apertúru
 - elementárnu štrbinu

ELEMENTÁRNY ELEKTRICKÝ DIPÓL

- **Elementárny elektrický dipól** je vytvorený dvoma bodovými nábojmi „+q“ a „-q“, umiestnenými vo veľmi malej vzájomnej vzdialenosti „ δ “, ktoré sa menia v čase harmonicky
- Tento dipól je ekvivalentný elementu el. prúdu $I = j\omega q$
- **Fyzikálny model elementárneho elektrického dipólu** (obr.7.2):
 - si možno predstaviť ako lineárnu vodičovú anténu napájanú v strede
 - ktorej dĺžka je omnoho menšia ako vlnová dĺžka
 - pričom konce antény majú veľmi veľkú kapacitu (Hertzov dipól)
 - prúd tečúci v takej anténe má vo všetkých jej bodoch rovnakú veľkosť



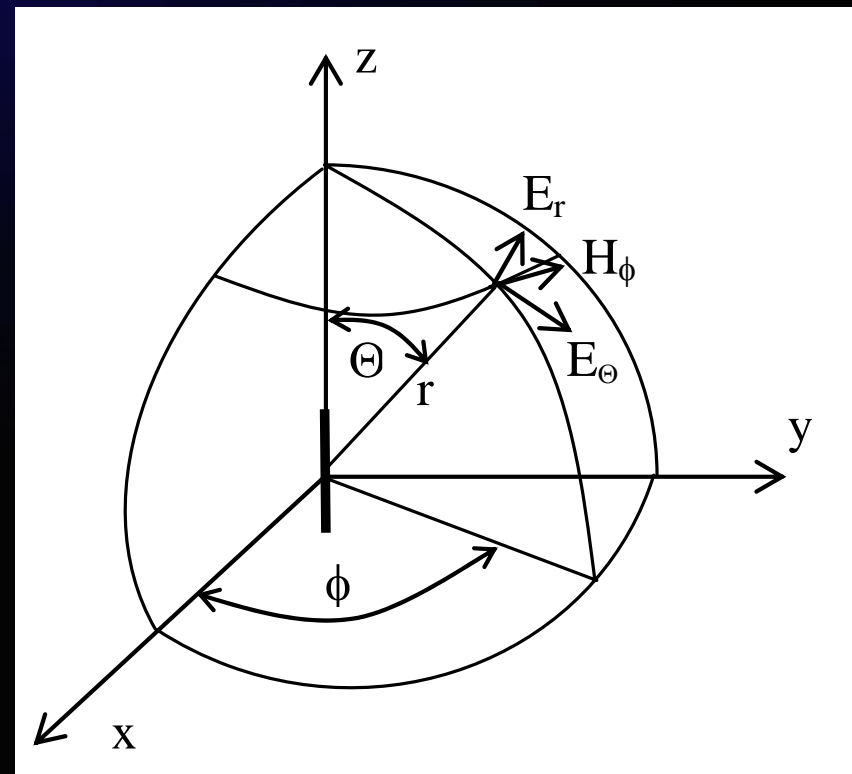
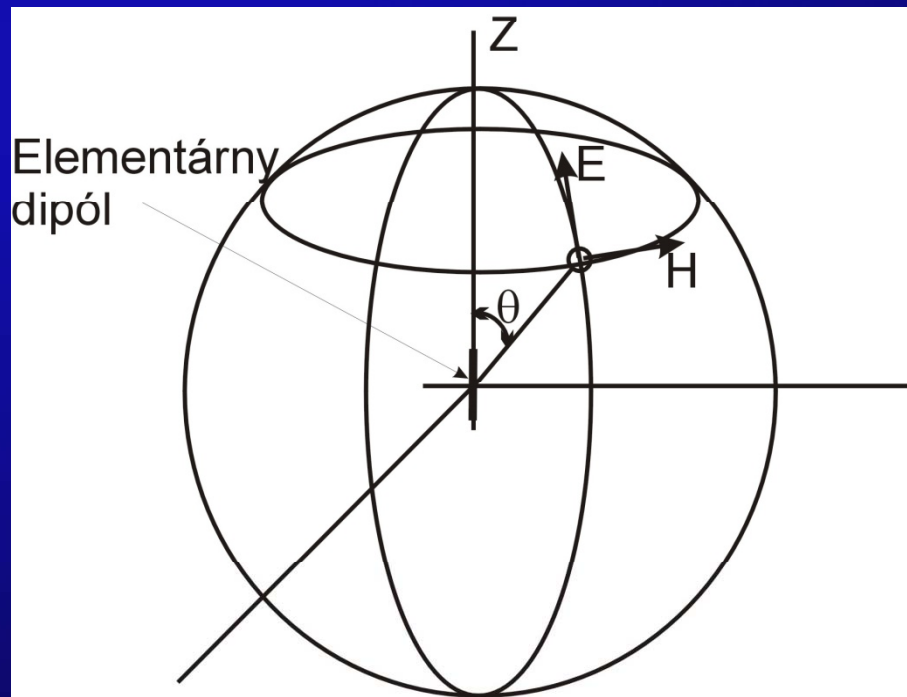
Obr.7.2 Elementární elektrický dipól (Hertzov dipól; $l \ll \lambda$)



- Teda **najjednoduchší žiarič** vznikne roztvorením vedenia naprázdno s dĺžkou $\lambda/4$
 - **na takomto vedení**, pri napájaní s časovo premenlivým signálom, **vzniká stojaté vlnenie** - má na konci **prúdový uzol**
 - vedenie sa správa ako **sériový rezonančný obvod**, ktorého energia mag. a ele. poľa je rozložená pozdĺž vodiča
 - **úbytok energie** v takomto žiariči je spôsobený v podstate vyžarovaním energie do priestoru; (obr.7.2)
 - pri takejto anténe budeme uvažovať o takom elementárnom úseku, pozdĺž ktorého je rozloženie prúdu prakticky **rovnaké v každom okamihu**
 - tento úsek vzhľadom na rovnomerné rozloženie prúdu bude vyžarovať rovnomerne a môžeme ho považovať za **samostatný elementárny žiarič**

- Keď si predstavíme elementárny žiarič umiestený v strede guľového povrchu ako zdroj elm poľa (obr.7.3):
 - rovina v ktorej ležia vektory intenzity el. a mag. poľa je kolmá na smer šírenia elm poľa od žiariča, ktorý berieme do úvahy
 - elm pole v dostatočnej vzdialenosti od žiariča môžeme považovať za rovinné
 - vektory intenzity elektrického a magnetického poľa sú navzájom kolmé a zároveň sú kolmé na smer šírenia sa vlny
- Môžeme rozlíšiť 3 zóny (oblasti):
 - blízka zóna (statická) - $2\pi r \ll \lambda$
 - stredná zóna - $2\pi r$ je porovnateľne s λ
 - vzdialená zóna - $2\pi r \gg \lambda$
- Pole má veľmi jednoduchú štruktúru a nezávisí od parametra Φ

Obr.7.3 Štruktúra elm poľa elementárneho elektrického dipólu



- **Smerovosť** elementárneho elektrického dipólu

$$D = \frac{2}{3} = 1,76 \text{ dB}$$

- **Celkový vyžiarený výkon** cez guľový povrch

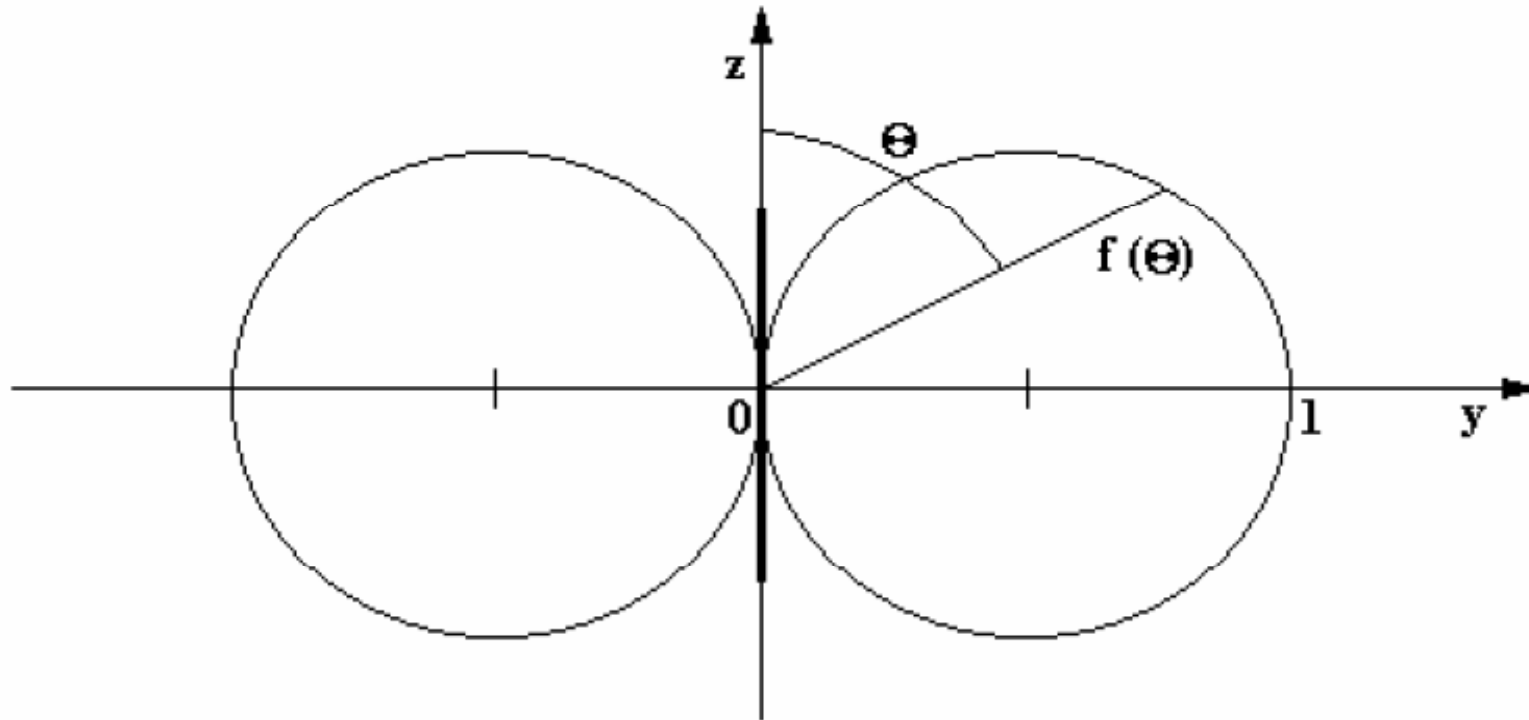
$$P = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 I_{ef}^2 = R_z I_{ef}^2$$

- **Vyžarovací odpor** antény

$$R_z = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2$$

- Vyžarovací odpor je **ekvivalentný odpor**, ktorého **veľkosť závisí** hlavne od pomeru l/λ
- **Účinnosť vyžarovania** ovplyvňuje veľkosť vyžarovacieho odporu
- **Hodnota vyžarovacieho odporu** býva však **veľmi malá**
 - anténa vyžarujúca na DV pri $\lambda=10\,000 \text{ m}$ má $R_z = 6 \cdot 10^{-3} \Omega$

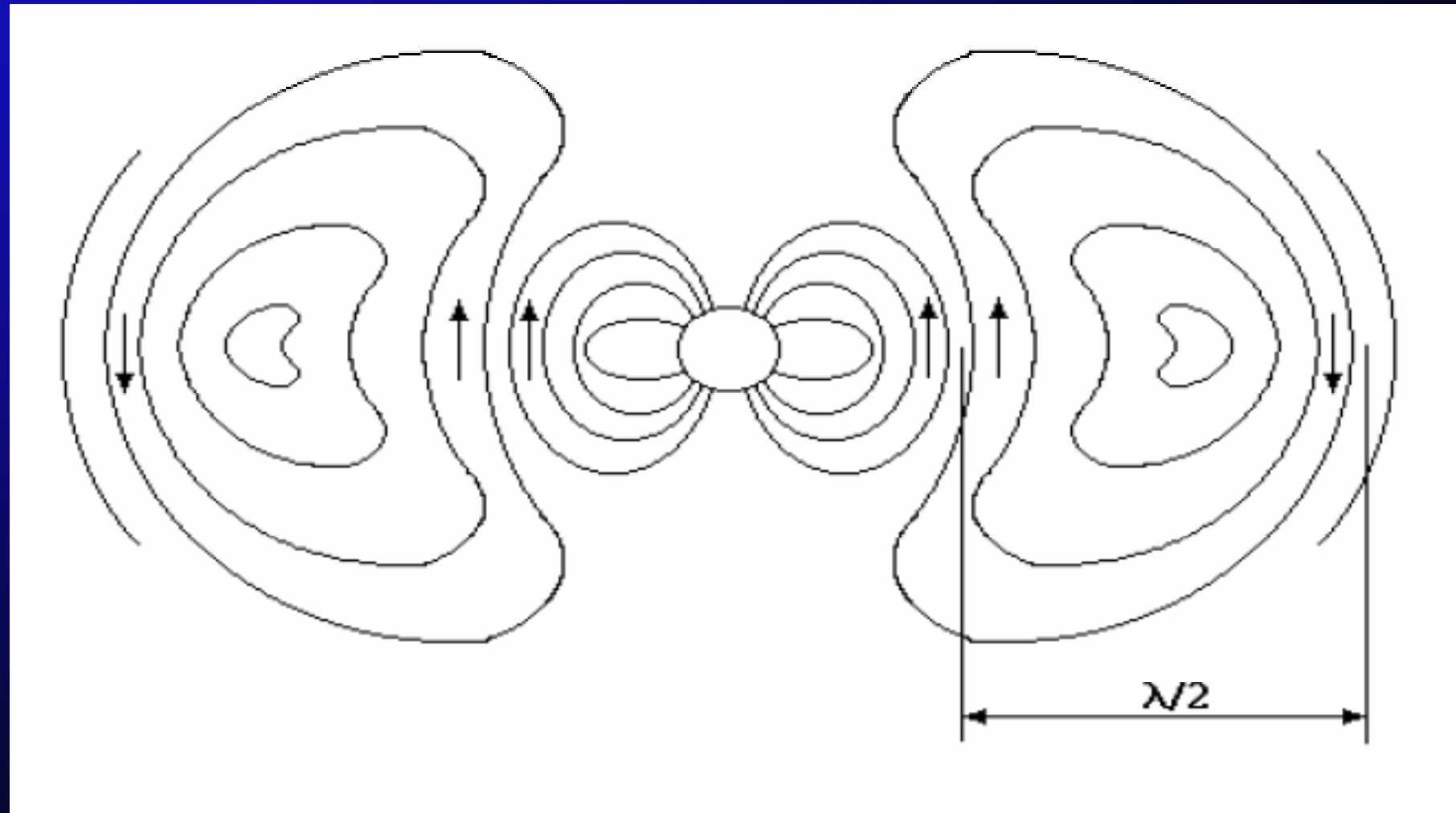
Obr.7.4 Rez smerovou charakteristikou elementárneho elektrického dipólu v rovine \vec{E}



- Smerová charakteristika elementárneho elektrického dipólu

$$F(\Theta, \Phi) = \sin \Theta$$

Obr.7.5 Elektrické siločiar v okolí elementárneho elektrického dipólu



ELEMENTÁRNY MAGNETICKÝ DIPÓL

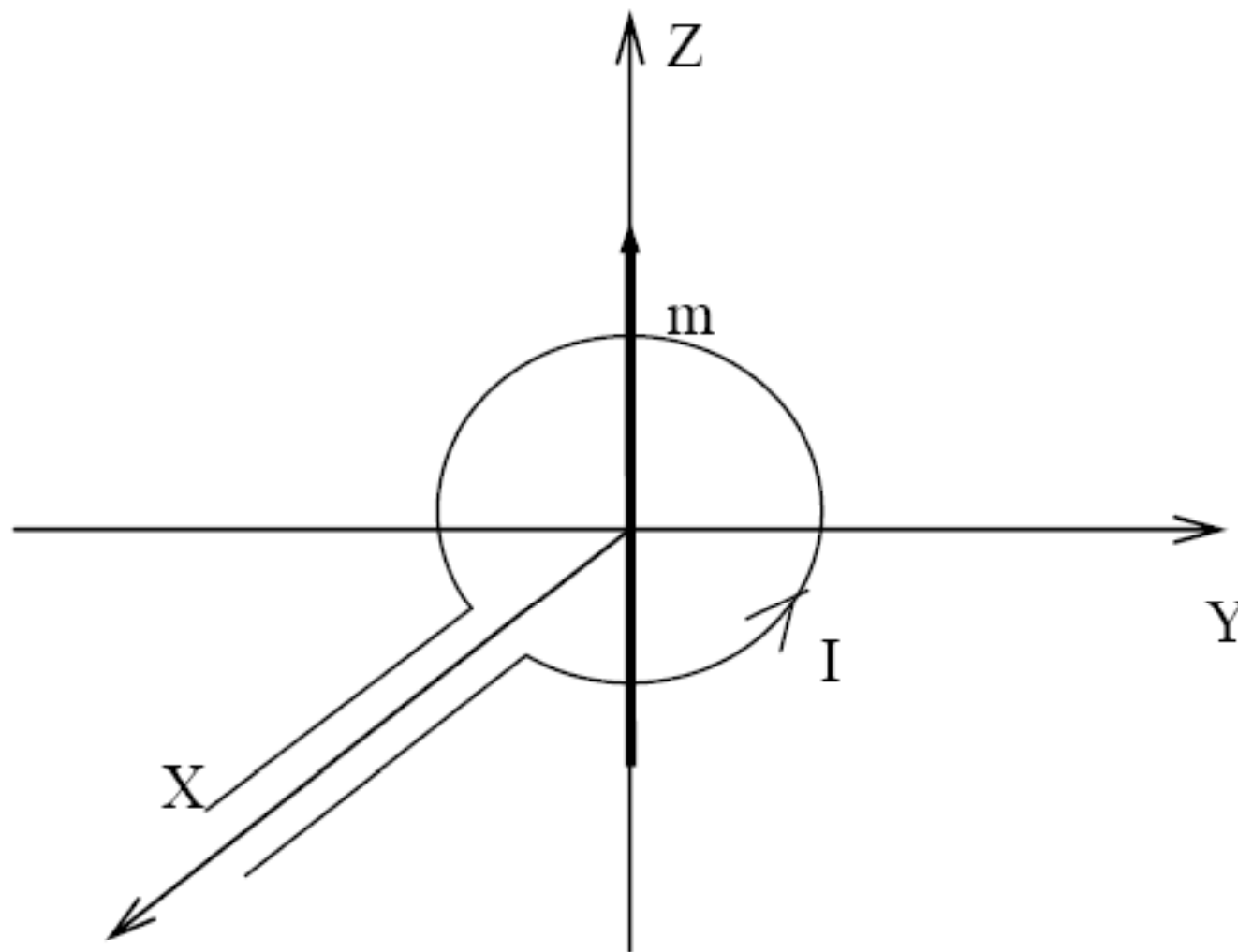
- Za elementárny magnetický dipól možno považovať element magnetického prúdu – je ekvivalentný elementu mag. prúdu

q_m – magnetický náboj

$$I_m = -j\omega q_m$$

- Fyzikálne možno realizovať elementárny magnetický dipól v tvare slučky s prúdom, ktorej rozmery sú malé v porovnaní s vlnovou dĺžkou „ λ “ - ($l \ll \lambda$) (obr.7.6)
 - teda žiarič vznikne vedením zapojeným nakrátko s dĺžkou $\lambda/4$
- Pole elementárneho magnetického dipólu je duálne k poľu elementárneho elektrického dipólu
 - smerová charakteristika oboch dipólov je rovnaká
 - rovnaká je teda aj ich smerovosť
 - a podobne ako v prípade elektrického elementárneho dipólu, pole magnetického dipólu nezávisí od súradnice Φ

Obr.7.6 Elementárna prúdová slučka



ELEMENTÁRNA APERTÚRA

- Elementárnou apertúrou (elementom vlnoplochy, Huygensovým elementom) budeme nazývať elementárnu vlnoplochu „ dS “ postupujúcej elm vlny, ktorej rozmery sú **omnoho menšie** ako vlnová dĺžka „ λ “ tejto vlny
- Element vlnoplochy možno považovať (obr.7.7)
 - za rovinný
 - a v jeho vnútri sú **dotyčnicové zložky vektorov intenzít**

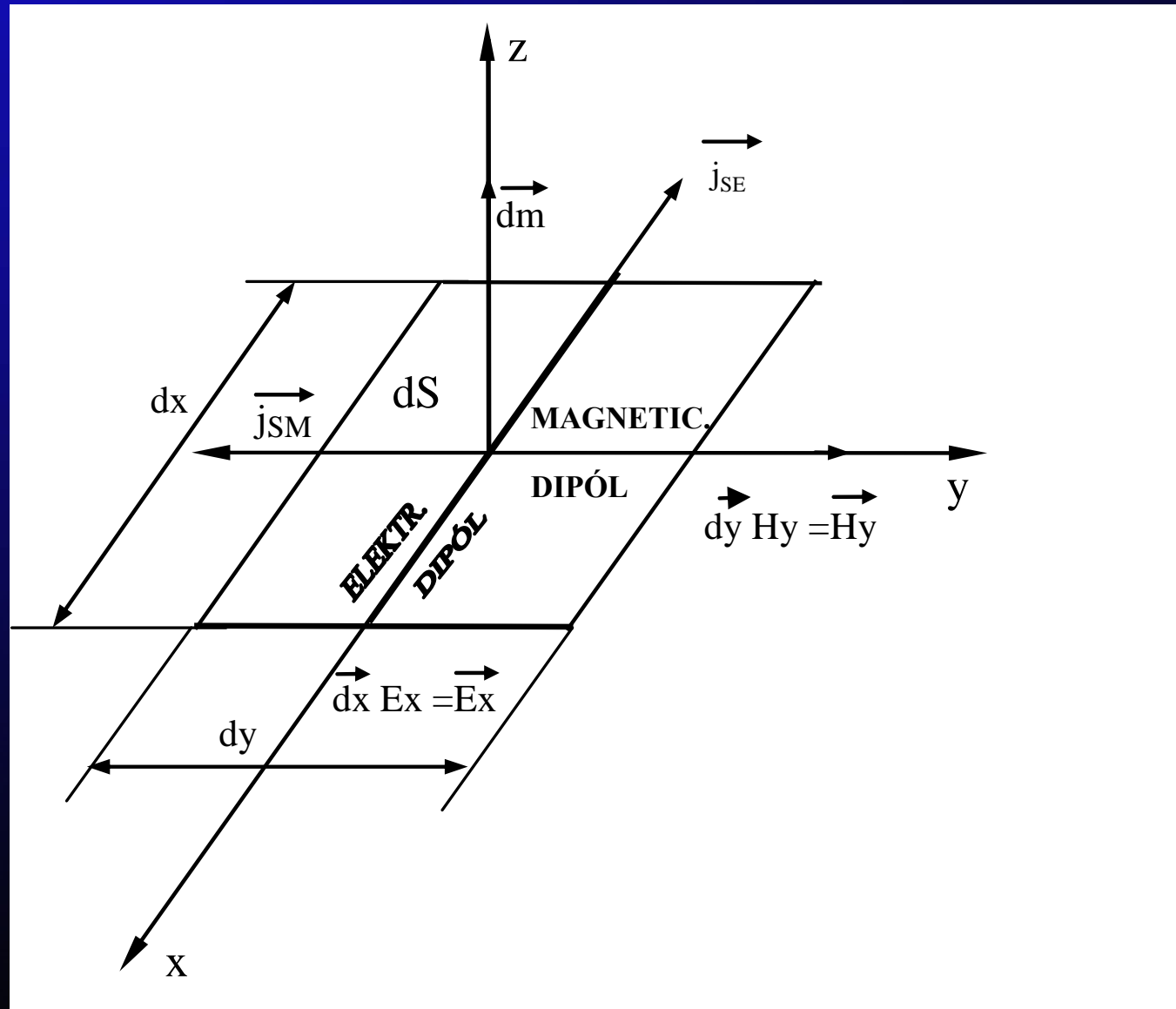
elektrického a magnetického poľa \vec{E}_t a \vec{H}_t **konštantné**

- Podľa **teorémy ekvivalentnosti**, ktorej dôsledkom je **Huygensov princíp**, možno dotyčnicové zložky intenzít elektrického a

magnetického poľa \vec{E}_t a \vec{H}_t nahradiť ekvivalentnými hustotami

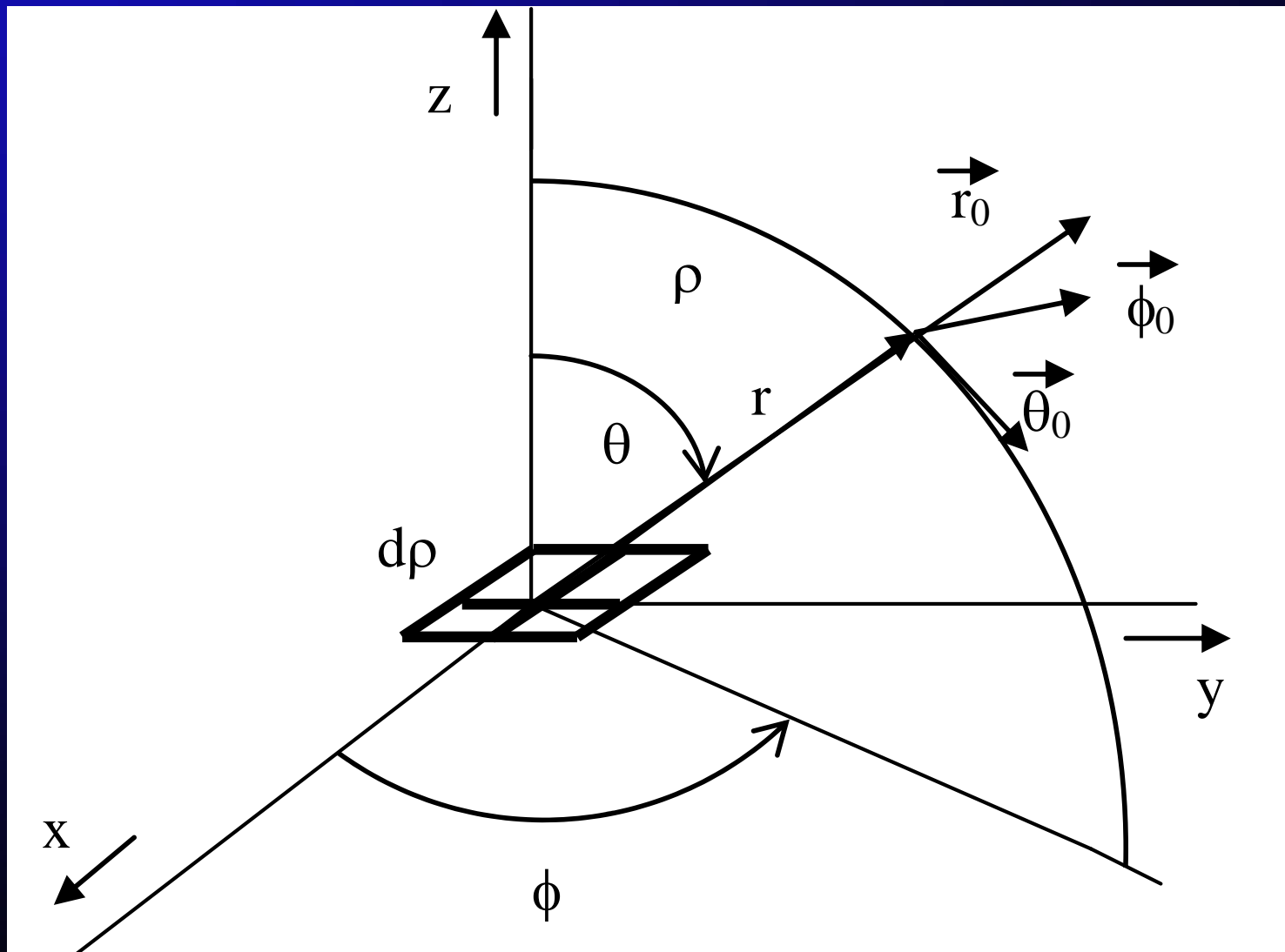
povrchových prúdov \vec{j}_{SE} a \vec{j}_{SM}

Obr.7.7 Zložky elektromagnetického poľa a ekvivalentné povrchové prúdy v elementárnej apertúre



- **Vypočítame elektrické pole** elementárnej apertúry **vo vzdialenej zóne**
 - **zavedieme** guľovú súradnicovú sústavu (obr.7.8)
 - môžeme elm pole vytvorené ekvivalentným elektrickým dipólom vypočítať ako **superpozíciu** polí od dvoch el. dipólov
 - z ktorých jeden leží v poludníkovej rovine ρ prechádzajúcej bodom **pozorovania** $\mathbf{P}(r, \Theta, \Phi)$
 - druhý je na túto rovinu kolmý

Obr.7.8 Zavedenie guľovej súradnicovej sústavy pre elementárnu apertúru



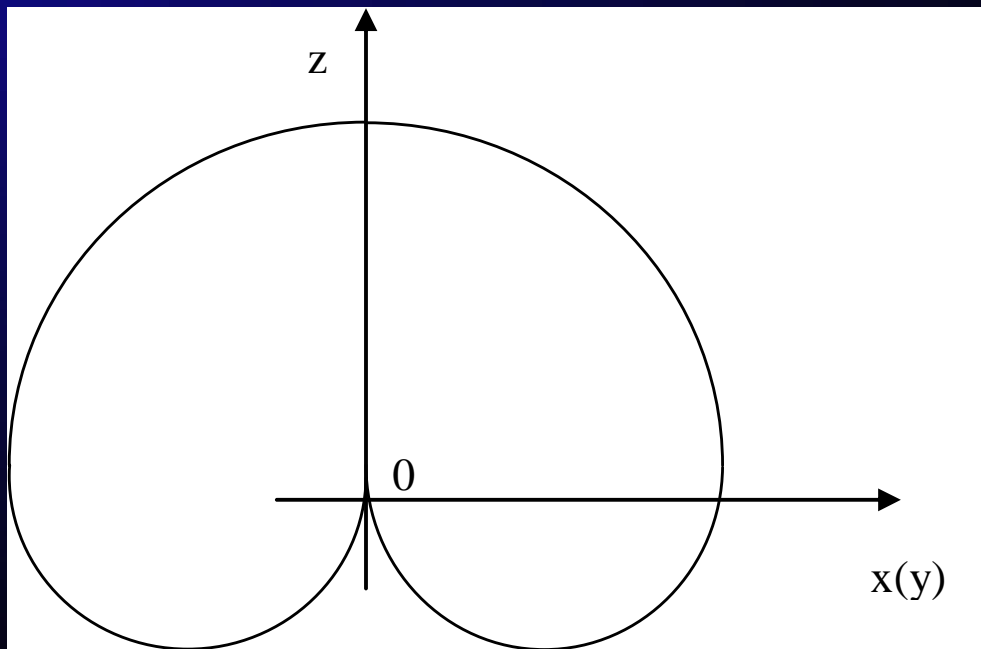
- Pre veľkosť **intenzity výsledného elektrického poľa** v bode **P** potom platí

$$E(t) = \sqrt{E_{\Theta}^2 + E_{\Phi}^2}$$

- **Smerová charakteristika** elementárnej apertúry nezávisí od uhla Φ

$$F(\Theta, \Phi) = 1 + \cos \Theta$$

- predstavuje analytické vyjadrenie **kardioidy** v rovine $\Phi = \text{konšt.}$



- smerovú charakteristiku v priestore získame **rotáciou kardioidy okolo osi z**

Rez smerovou charakteristikou elementárnej apertúry

- Medzi vektormi \vec{E} a \vec{H} platí

$$\vec{H} = \frac{1}{Z_0} \left[\vec{r}_0 \times \vec{E} \right]$$

Z_0 - charakteristická impedancia prostredia

- **Sumár:**

- elm pole **elementárnej apertúry** má vo vzdialenej zóne **podobný charakter** ako elm pole **elementárnych dipólov**
- toto pole je **superpozíciou** sekundárnych postupujúcich guľových vln, šíriacich sa do **polpriestoru $z > 0$** od

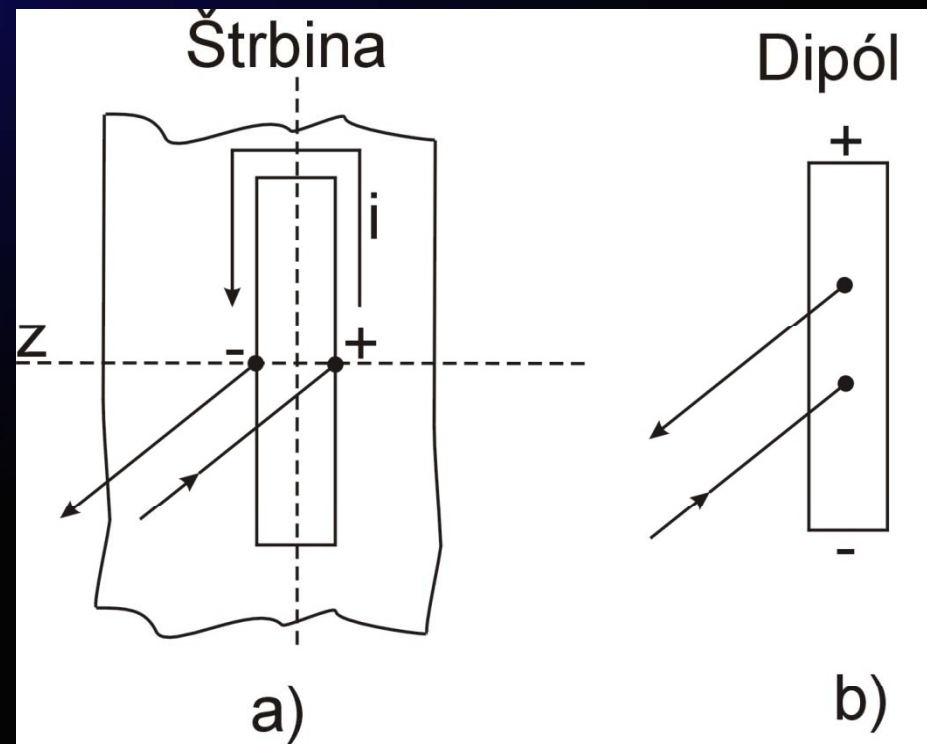
elementárnej apertúry v smere **vektorov** \vec{r}_0 **rýchlosťou**

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

pričom jeho **amplitúda klesá** ako funkcia **$1/r$**

ELEMENTÁRNA ŠTRBINA

- Vytvoríme ju tak (**štrbinovú anténu**), že vo vodivej platni vyrežeme **štrbinu** s dĺžkou $\lambda/2$
- **Žiaričom** môže byť
 - vytvorená **štrbina** (a)
 - ale aj vyrezaný **pás vodivého materiálu** (b)
- **Rozdiel** medzi nimi je
 - len v **polarite rozloženia** prúdu a napätia
 - **spôsobe napájania** takto vzniknutých žiaričov



- Keď zdroj energie je pripojený do stredu štrbiny
 - prúdy tečú po jej okraji
 - najväčšia prúdová hustota je okolo štrbiny
 - magnetické pole pôsobí kolmo ku smeru toku prúdov
 - rozloženie elektrického poľa v rovine x, y zodpovedá rozloženiu elektrického poľa dipólu

- Porovnaním elektrického dipólu so štrbinou zistíme, že
 - štrbina je komplementárna (doplňujúca) anténa k dipólu
 - čo znamená, že má obrátenú polarizáciu pri rovnakom diagrame žiarenia
 - keď štrbinová anténa bude postavená vertikálne k danej rovine, jej vyžarovanie k danej rovine bude polarizované horizontálne

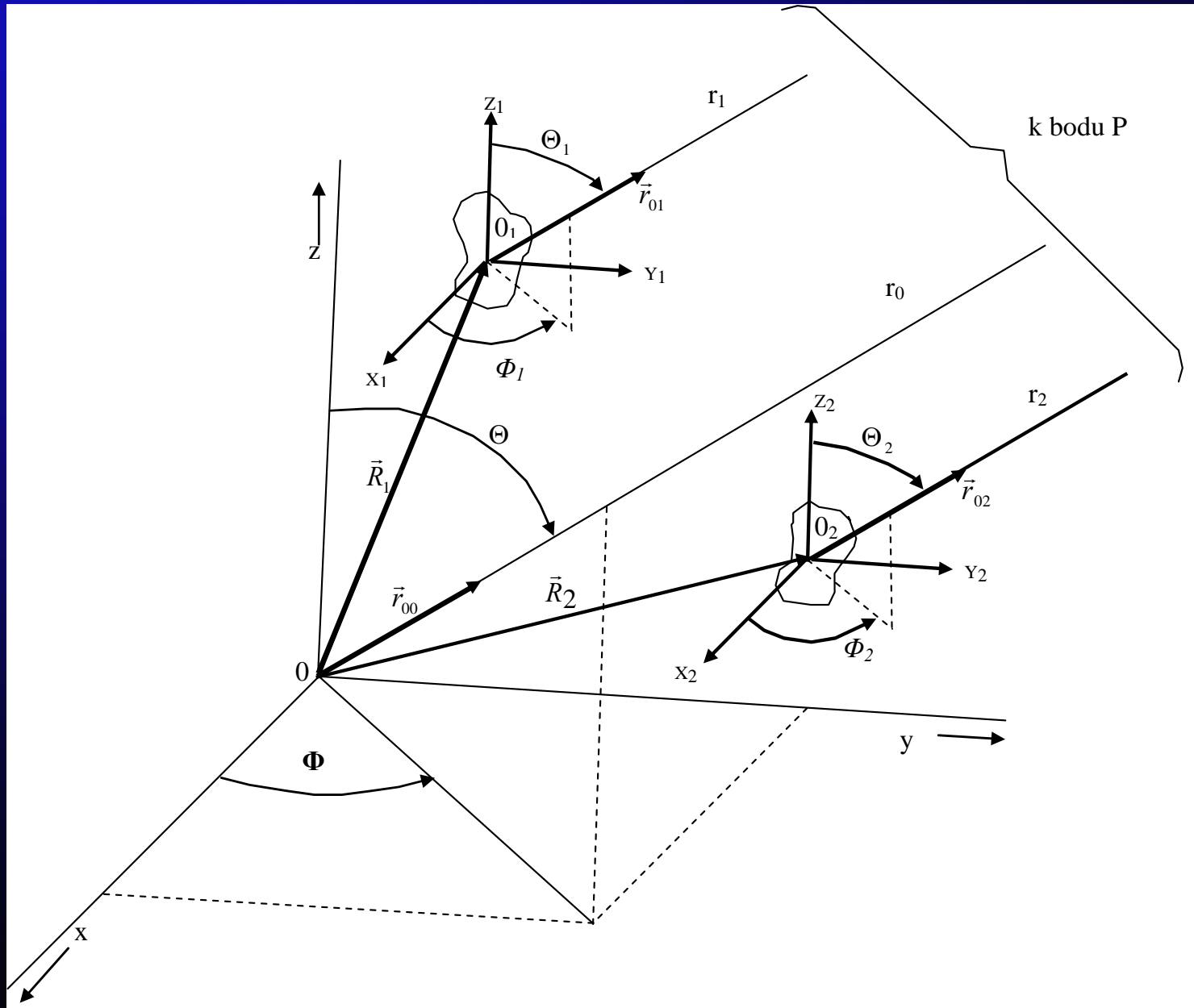
- Vyžarovací odpor je daný rovnicou

$$R_z = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2$$

Elektromagnetické pole sústavy zdrojov

- Elm **pole elementárnych zdrojov** vo vzdialenej (žiarivej) zóne
 - možno vo všeobecnosti popísať **vzťahmi pre priečne zložky** intenzity elektrického poľa E_{Θ} a E_{Φ}
 - pričom **zložky intenzity mag. poľa** sú nimi jednoznačne určené
- V prípade určenia **elm poľa sústavy zdrojov**
 - pričom **elm pole jednotlivých zdrojov sústavy** (napr. jednoduchých antén) už **poznáme**
 - **využívame princíp superpozície** a hľadáme výsledné elm pole ako súčet polí jednotlivých zdrojov sústavy
- **Nech je daná** sústava vytvorená z **N zdrojov** (Obr. 7.9)
 - **začiatok súradnicovej sústavy** zvolíme v blízkosti týchto zdrojov
 - **každému zdroju** (označenému indexom i) **priradíme vlastnú súradnicovú sústavu** so začiatkom $\mathbf{0}_i$, ktorý leží v jeho okolí
 - všetky **polohové vektory** \vec{r}_i bodu P považujeme za rovnobežné

Obr.7.9 Sústava zdrojov



■ **Výsledné elm pole** sa získa

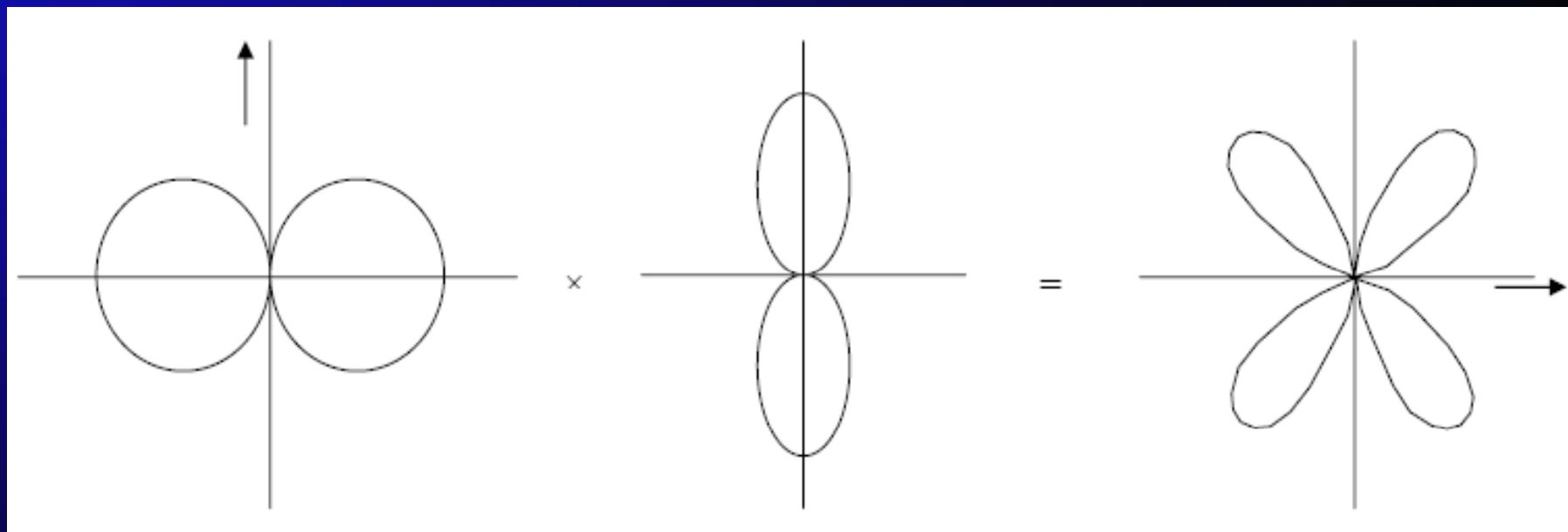
- ako **súčet polí**, pochádzajúcich **od všetkých elementárnych zdrojov**
- pričom musíme **uvažovať rôzne fázy týchto polí**, vyplývajúce z rozdielov vzdialenosti jednotlivých zdrojov od bodu **P** (bod pozorovania)
- a jednotlivé polohové vektory \vec{r}_i **považujeme za rovnobežné**

$$E_{\Theta} = \sum_{i=1}^N E_{\Theta i}$$

$$E_{\Phi} = \sum_{i=1}^N E_{\Phi i}$$

- Pri **výpočtoch smerových charakteristík anténových sústav**, vytvorených z rovnakých a rovnako orientovaných žiaričov sa využíva **pravidlo násobenia charakteristík**; (obr.7.10)

Obr.7.10 Vytvorenie smerovej charakteristiky dvojice žiaričov s využitím pravidla násobenia charakteristík



Vzťah medzi vysielacou a prijímacou anténou

- Sa vyjadruje **teorémou vzájomnosti** (Rayleigha-Helmholtza)
 - uvažujeme **bodové žiariče**, ktoré majú napájané svorky
 - ak **prúd I** , tečúci svorkami antény 1 (I_1), vytvorí na svorkách antény 2 **napätie U** (U_2) (Obr. 7.11)
 - potom ten istý **prúd I** , tečúci svorkami antény 2 (I_2), vytvorí na svorkách antény 1 rovnaké **napätie U** (U_1) (Obr. 7.12)

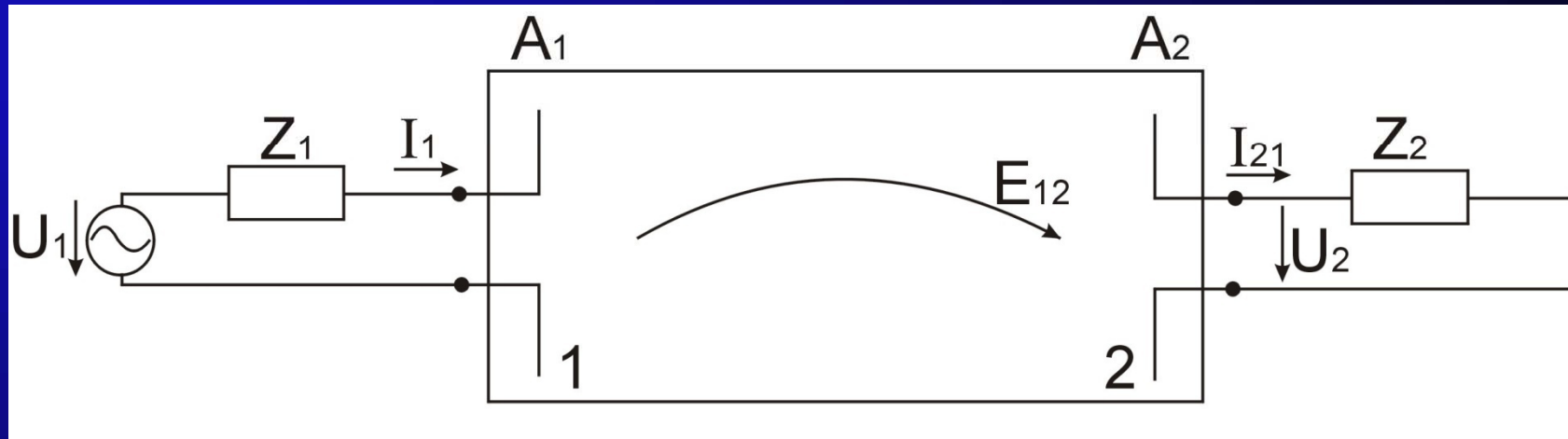
$$U_2 I_1 = U_1 I_2$$

$$I_1 = I_2 = I$$

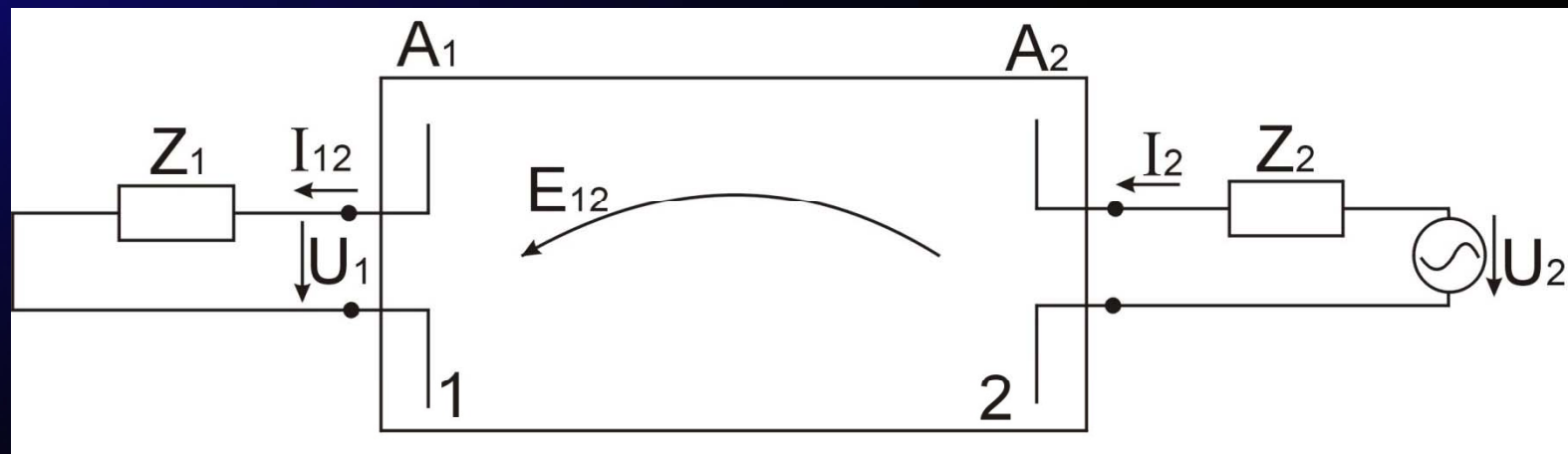
$$U_1 = U_2 = U$$

- teoréma vzájomnosti **platí bez ohľadu na vzdialenosť medzi anténami**, t.j. aj v blízkej zóne
- významným prínosom teóremy vzájomnosti je **možnosť merania parametrov vysielacích antén pri ich použití ako antény prijímacie**

Obr.7.11 Prenos z miesta antény 1 do miesta antény 2



Obr.7.12 Prenos z miesta antény 2 do miesta antény 1



- Pôsobením generátora s elektromotorickým napätím U_1 prechádza obvodom antény 1 prúd I_1

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1 + Z_{VST1}}$$

Z_{VST1} - vstupná impedancia antény 1

- Intenzita elektrického poľa vytvoreného týmto prúdom v mieste antény 2 je

$$E_{21} = B_1 I_1 f_1(\Theta, \Phi)$$

B_1 - konštanta úmernosti
 $f_1(\Theta, \Phi)$ - smerová charakteristika
vysielačnej antény 1

- Pre napätia potom platí

$$U_1 = \frac{E_{21}(Z_1 + Z_{VST1})}{B_1 f_1(\Theta, \Phi)}$$

$$U_2 = \frac{E_{12}(Z_2 + Z_{VST2})}{B_2 f_2(\Theta, \Phi)}$$

■ Ak využijeme teorému vzájomnosti

$$U_2 I_1 = U_1 I_2$$

dostaneme po úprave

$$\frac{I_{12}(Z_1 + Z_{VST1})}{E_{12} B_1 f_1(\Theta, \Phi)} = \frac{I_{21}(Z_2 + Z_{VST2})}{E_{21} B_2 f_2(\Theta, \Phi)} = \frac{I(Z + Z_{VST})}{EBf(\Theta, \Phi)} = \textit{konšt.}$$

I - prúd v prijímacej anténe

Z_{VST} - vstupná impedancia antény použitej ako vysielačia anténa

Z - vnútorná impedancia generátora

E - intenzita elektrického poľa dopadajúcej vlny

B – konštanta úmernosti

$f_1(\Theta, \Phi)$ - smerová vysielačia charakteristika

Vlnová a geometrická optika

- Chceme určiť **elm pole v ľubovoľnom bode P**
 - Presné riešenie je riešenie **vlnových rovníc** s využitím Huygensovho-Fresnelovho princípu
 - podľa ktorého **každý bod vlnoplochy možno považovať za sekundárny zdroj elementárnej guľovej vlny**
 - z tohto princípu vyplýva , že **neexistuje bezprostredná súvislosť medzi elm poľom v bode P a poľom v jemu zodpovedajúcom bode vlnoplochy**
 - **elm pole v bode P je superpozíciou všetkých elementárnych vln z celej plochy S !!!**

■ Približné riešenie získame metódami **geometrickej (lúčovej) optiky**

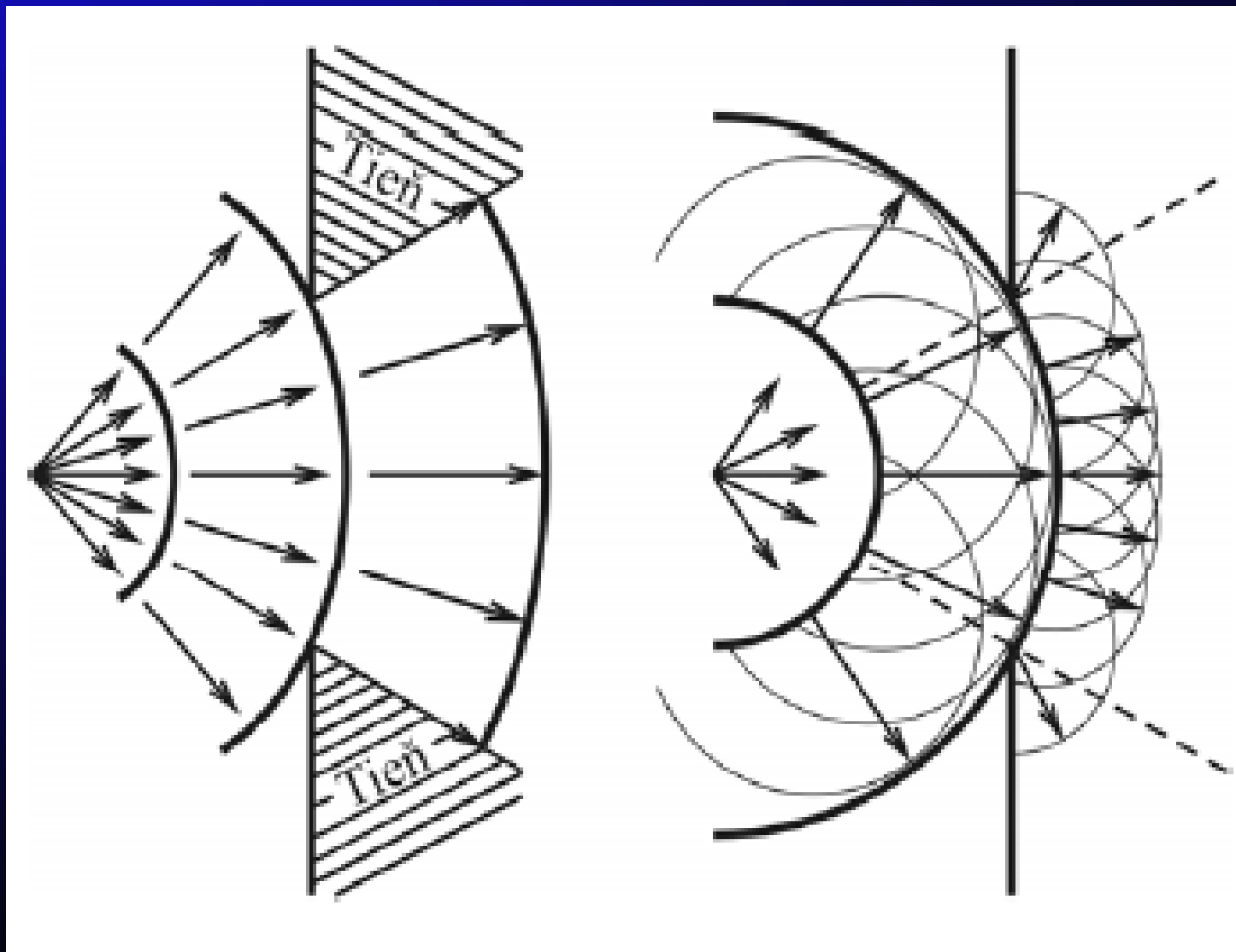
- pole sa šíri pozdĺž trajektórií (lúčov), pričom pole na danej trajektórii **nezávisí** od polí na susedných trajektóriách !!!
- **vektory intenzity el. a mag. poľa** sú navzájom kolmé a tiež sú kolmé na smer šírenia a sú navzájom **zviazané vzťahom**

$$\vec{E}_0 = Z_0 \vec{H}_0$$

Z_0 - charakteristická impedancia prostredia

- vlnové elm pole v limitnom prípade $\lambda \rightarrow 0$ teda prechádza na pole, ktoré **spĺňa podmienky geometrickej optiky**
- v týchto podmienkach každý element vlnoplochy sa **chová ako element čela rovinnej elm vlny**
- ak frekvencia zmien elm poľa je konečná, ale dostatočne veľká, vzťahy geometrickej optiky **budú splnené** pre všetky body priestoru **až na body**, v ktorých dochádza ku skokovej zmene amplitúd intenzít – napr. **na hranici tzv. geometrického tieňa**
- v týchto oblastiach sa elm pole s konečnou frekvenciou bude veľmi líšiť od poľa spĺňajúceho podmienky geometrickej optiky a na analýzu týchto javov je **nutné použiť vlnovú optiku**

Obr.7.13 Prechod elm vlny otvorom v tienidle podľa
geometrickej optiky a podľa vlnovej optiky



■ Pre kvantitatívny popis vlastností elm poľa v priblížení geometrickej optiky uvažujme dve vlnoplochy A_1 a A_2 a zväzok lúčov

■ Pravidlo šírenia amplitúdy intenzity el. poľa pozdĺž lúča

$$E_0(s) = E_0(0) \sqrt{\frac{R_1 R_2}{(R_1 + s)(R_2 + s)}}$$

$E_0(0)$ - amplitúda intenzity el. poľa na ploche A_1

$E_0(s)$ - amplitúda intenzity el. poľa na ploche A_2

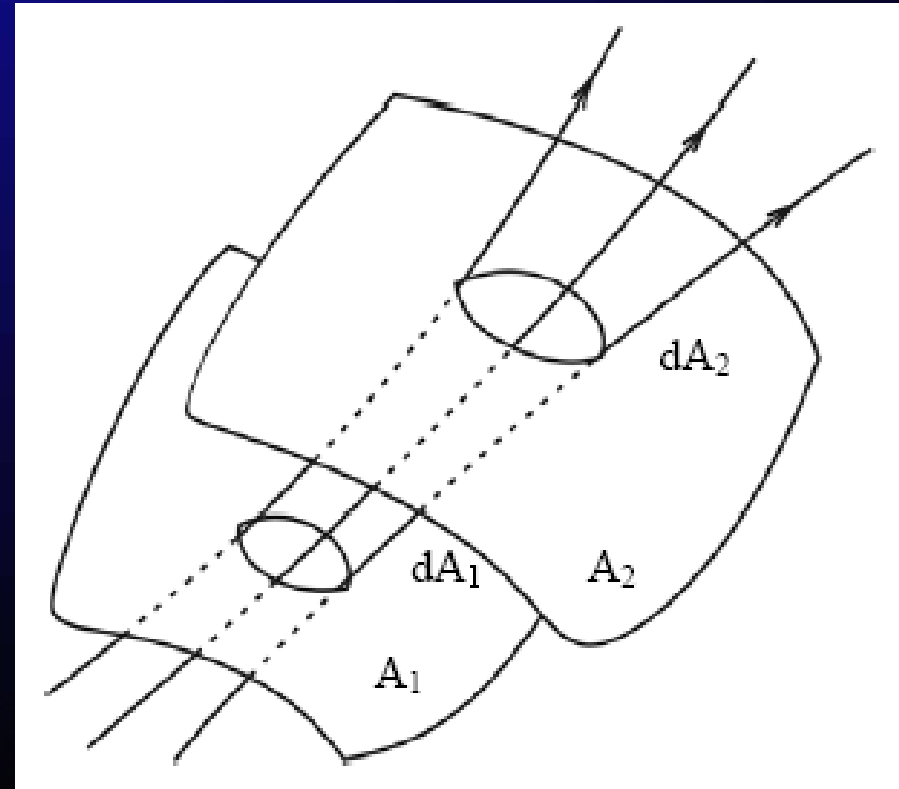
R_1, R_2 - hlavné polomery krivosti vlnoplochy A_1

$(R_1 + s), (R_2 + s)$ - hlavné polomery krivosti vlnoplochy A_2

s - vzdialenosť vlnoplôch A_1 a A_2

$n = n_1 = n_2$ - index lomu vlnoplôch A_1 a A_2

lúče majú tvar priamok - prostredie je homogénne



$$n = \sqrt{\varepsilon / \varepsilon_0}$$

- Charakteristická vlastnosť **guľovej vlny** ($s \rightarrow \infty$)
 - amplitúda intenzity elektrického poľa **klesá nepriamo úmerne so vzdialenosťou**

$$E_0(s) \approx E_0(0) \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{s}$$

- Charakteristická vlastnosť **valcovej vlny** ($s \rightarrow \infty$)
 - ak je plocha A_1 povrch valca, potom jeden z hlavných polomerov krivosti (napr. R_2) je nekonečne veľký
 - amplitúda intenzity elektrického poľa **klesá ako funkcia $s^{-1/2}$**

$$E_0(s) \approx E_0 \frac{\sqrt{R_1}}{\sqrt{s}}$$

- Charakteristická vlastnosť **rovinnej vlny** ($R_1 = R_2 = \infty$)
 - plocha A_1 je rovinná
 - amplitúda intenzity el. poľa sa nemení so vzdialenosťou

$$E_0(s) \approx E_0(0)$$

Témy na zapamätanie

- Elektromagnetické pole všeobecných zdrojov
- Elektromagnetické pole elementárnych zdrojov
 - Elementárny elektrický dipól
 - Elementárny magnetický dipól
 - Elementárna apertúra
 - Elementárna štrbina
- Elektromagnetické pole sústavy zdrojov
- Vzťah medzi vysielacou a prijímacou anténou
- Vlnová a geometrická optika

Kontrolné otázky

- Aká je to „vonkajšia úloha elektrodynamiky“?
- Aké máme elementárne zdroje (žiarice) elm vlnenia?
- Definícia elementárneho zdroja elm vln.
- Čo možno považovať za elementárny elektrický dipól?
- Ako môžeme fyzikálne realizovať elementárny elektrický dipól (aj obr.)?
- Ako prakticky vznikne najjednoduchší elementárny elektrický dipól a aké má vlastnosti?
- Aká je smerovosť elementárneho elektrického dipólu?
- Aká veľká býva hodnota vyžarovacieho odporu elementárneho elektrického dipólu (napr. ak $\lambda=10000\text{m}$)?
- Akú smerovú charakteristiku má elementárny elektrický dipól?
- Čo možno považovať za elementárny magnetický dipól?
- Ako môžeme fyzikálne realizovať elementárny magnetický dipól (aj obr.)?

- Aké je pole elementárneho magnetického dipólu k poľu elementárneho elektrického dipólu?
- Aká je smerovosť elementárneho magnetického dipólu?
- Akú smerovú charakteristiku má elementárny magnetický dipól?
- Čo možno považovať za elementárnu apertúru?
- Ako môžeme fyzikálne realizovať elementárnu apertúru (aj obr.)?
- Akú smerovú charakteristiku má elementárna apertúra?
- Ako môžeme fyzikálne realizovať elementárnu štrbinu (aj obr.)?
- Čo zistíme porovnaním elementárneho elektrického dipólu a elementárnej štrbiny?
- Akú smerovú charakteristiku má elementárna štrbina v porovnaní so smerovou charakteristikou elementárneho elektrického dipólu?
- Aké pravidlo sa využíva pri výpočtoch smerových charakteristík anténových sústav, vytvorených z rovnakých a rovnako orientovaných žiaričov (aj obr.)?
- Aké pravidlo (teoréma) sa využíva pri zisťovaní vzťahu medzi vysielačou a prijímacou anténou?

- Na aké vzdialenosti medzi anténami platí teoréma vzájomnosti?
- Čo je významným prínosom teorémy vzájomnosti?
- Aké riešenie získame pri určení elm poľa v ľubovoľnom bode pomocou metódy vlnových rovníc?
- Aké riešenie získame pri určení elm poľa v ľubovoľnom bode pomocou metódy geometrickej (lúčovej) optiky?

Zoznam použitých skratiek a symbolov

■ Skratky:

- ELM, elm- elektromagnetický

■ Značky:

- D- smerovosť
- E- intenzita elektrického poľa
- H- intenzita magnetického poľa
- l- dĺžka anténového vodiča
- λ - vlnová dĺžka
- q_m - magnetický náboj
- r- polomer vodiča
- R_z - vyžarovací odpor antény
- Z_0 - charakteristická impedancia prostredia

Ďakujem za pozornosť