

Prednáška 02:
ŠÍRENIE ELEKTROMAGNETICKÝCH
VÍLN

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

[http://kemt-old.fei.tuke.sk/predmety/EVaA/_materialy/
Prednasky/Pr02/Pr02.pdf](http://kemt-old.fei.tuke.sk/predmety/EVaA/_materialy/Prednasky/Pr02/Pr02.pdf)

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

Obsah prednášky

■ Základné poznatky

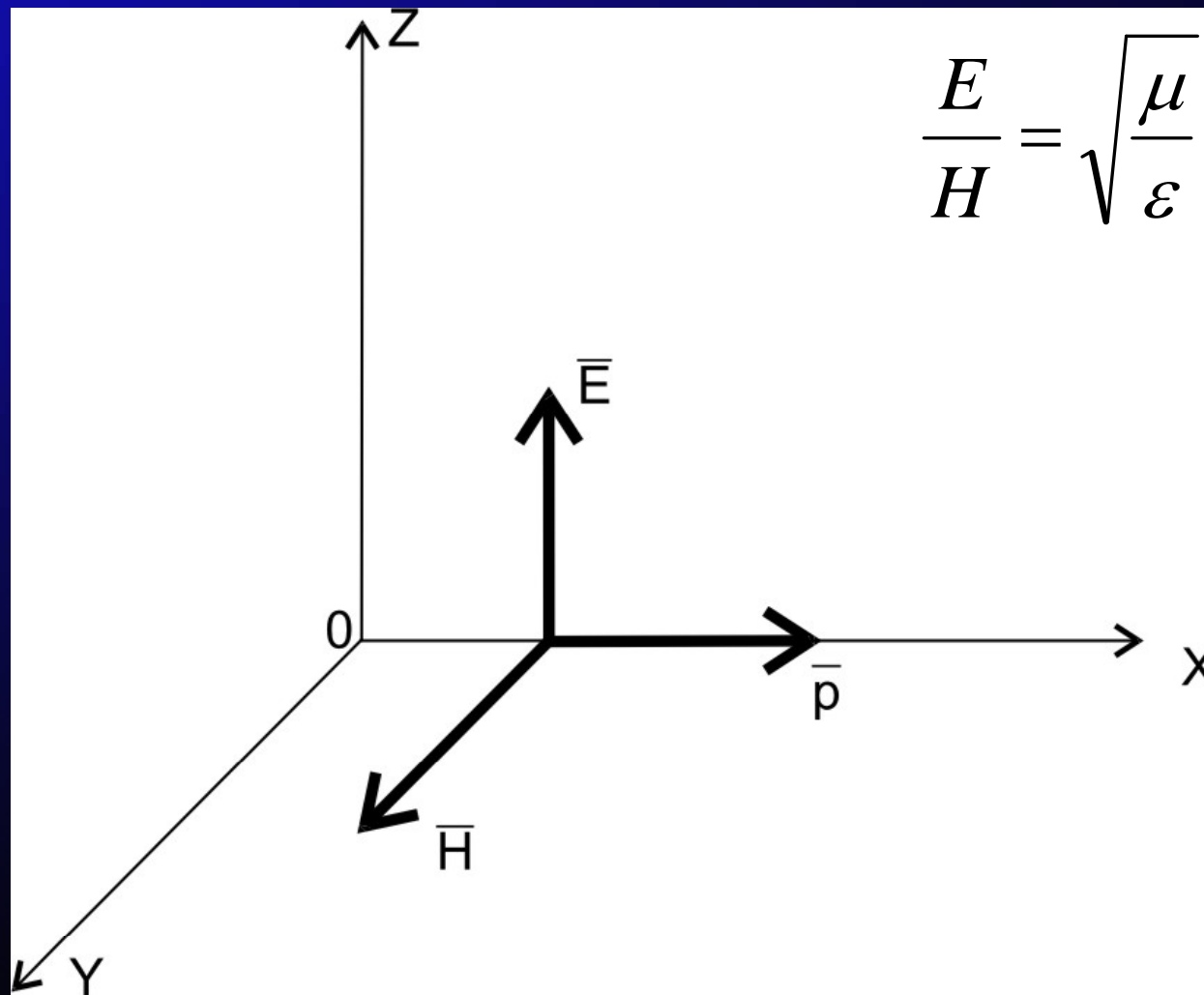
- Zložky elektromagnetického vlnenia
- Polarizácia elektromagnetického vlnenia
- Frekvenčné pásma rádiových vln
- Spôsobu šírenia elektromagnetických vln
- Šírenie elektromagnetického poľa v rôznom prostredí
- Činiteľ tlmenia
- Fresnelove zóny
- Šírenie rádiových vln

Zložky elektromagnetického vlnenia

- Elm vlnenie vo voľnom priestore (v dostatočnej vzdialenosti od zdroja) považujeme za rovinné – je **vždy kolmé** na smer šírenia
- Skladá sa z elektrickej „ E “ a magnetickej „ H “ zložky (**kolmé navzájom, rovnaká fáza** v každom bode priestoru)
- Ak zložka „ E “ leží na osi Z a „ H “ na Y potom os X je smer šírenia (obr. 2.1)
- Amplitúdy elektrickej „ E “ a magnetickej „ H “ zložky sú zviazané vzťahom

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

Obr.2.1: Zložky elektromagnetického poľa



- Rýchlosť šírenia elm vlnenie je daná vzťahom:

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

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \quad [F / m]$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [H / m]$$

- Pre vákuum (vzduch) platí:

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$$

čo je **impedancia voľného priestoru**
(približne 377Ω)

- Rýchlosť šírenia elm vlnenia vo voľnom priestore sa rovná rýchlosti šírenia svetla

vo vákuu je $3 \cdot 10^8$ m/s

v inom prostredí

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$$

$$v_1 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

- Z toho vyplýva, že prechodom elm vlny do iného prostredia sa mení jej rýchlosť a úmerne tejto (pri neznámej frekvencii) sa mení aj vlnová dĺžka

λ_0 – vo vákuu s permitivitou „ ϵ_0 “

λ_1 – v prostredí s permitivitou „ ϵ_r “

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

- Hustota toku energie prenášaná za 1s cez jednotkovú plochu kolmú na smer šírenia poľa vo vzdialenosti „ r “ od zdroja s výkonom „ P “

$$S = \frac{P}{4\pi \cdot r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

- **Vektor Poyntinga-Umova** - vektor hustoty toku elm energie a jeho veľkosť je úmerná súčinu vektora intenzity „ E “ a „ H “ poľa

- efektívne hodnoty
- je kolmý k obom vektorom
- a súhlasí so smerom šírenia vlny

$$\mathbf{p} = \mathbf{E}_{ef} \mathbf{H}_{ef} \left[\frac{W}{m^2}; \frac{V}{m}; \frac{A}{m} \right]$$

- Hustota toku energie „ p “ potom je

$$p = \frac{E_{ef}^2}{120 \cdot \pi} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

- Intenzita el. poľa (efektívna hodnota)
vo vzdialenosti „ r “ od žiariča

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30.P}}{r} \left[\frac{V}{m} \right]$$

- V praxi sa väčšinou používajú smerové vyžarovacie sústavy –
žiariče

- žiarič vyžaruje všetkými smermi rovnako
- stupeň smerovosti sa vyjadruje činiteľom smerovosti – **ziskom**
„ K “
 - činiteľ smerovosti „ K “ je bezrozmerná veličina a udáva
stupeň sústredenia vyžarovanej energie v určitom smere
- **smerová anténa** vyžarujúca výkon „ P “ vytvorí v mieste príjmu
takú istú intenzitu poľa ako **všesmerová** anténa – **izotropná**,
ktorá vyžaruje výkon „ $K.P$ “
- použitie smerovej antény zodpovedá „ K “ **násobnému**
zväčšeniu výkonu vyžarovania nesmerovej antény

- Intenzita elektrického poľa
vo vzdialenosti „ r “ od žiariča

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30.K.P}}{r} \left[\frac{V}{m} \right]$$

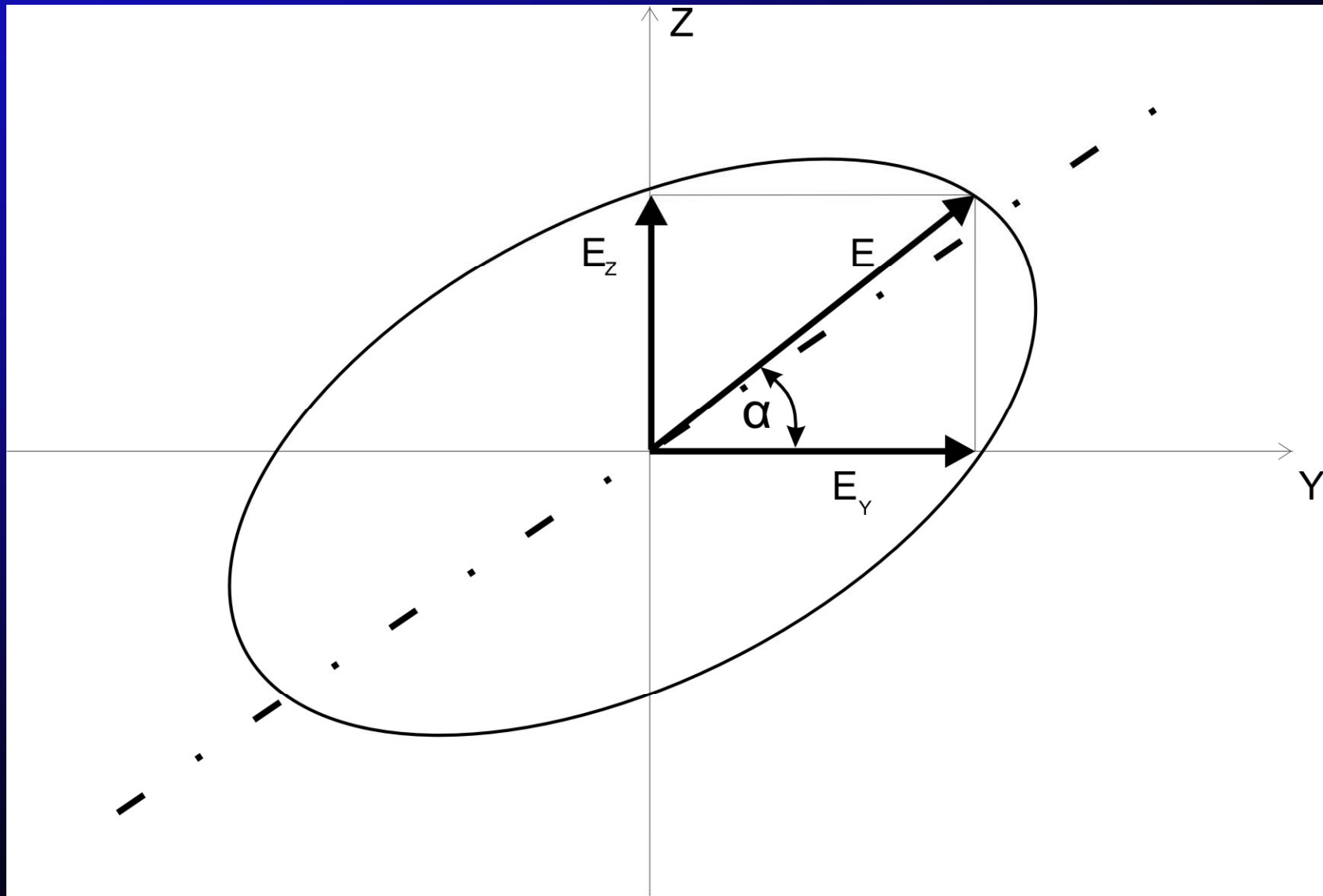
- Z uvedeného vyplýva
 - že so **zväčšovaním** vzdialenosti „ r “ medzi žiaričom a bodom príjmu **klesá** intenzita elm poľa
 - pokles je spôsobený rozptylom a útlmom rádiových vln
- Obidve zložky elm poľa majú
 - **rovnakú energiu** - stačí určiť veľkosť **jednej zložky**, aby sme dostali hodnotu druhej
 - **rovnaký účinok** na prijímaciu anténu (indukované napätie vo vodiči)
 - zmeny **mag. toku** indukujú napätie v rovine **kolmej** na vodič
 - zmeny **el. toku** v rovine **rovnobežnej** s vodičom
- Všetky tvrdenia a vzťahy platia za predpokladu
 - že zdroj elm vlnenia je umiestnený v ideálnom homogénnom prostredí (brali sme do úvahy rovinné vlnenie)
 - anténa vyžaruje guľové vlny, pri ktorých plocha rovnakých fáz je guľa a jej stred je v mieste žiariča

* Tak ako môžeme považovať malý úsek guľového povrchu zeme za rovinu, tak môžeme v dostatočnej vzdialenosti od žiariča prisúdiť guľovým vlnám charakter rovinných vln!!!

Polarizácia elektromagnetického vlnenia

- Je to zmena **smeru** a **veľkosti** intenzity elektrickej zložky elm poľa v danom bode za jednu periódu
- Typy polarizácie elm vln:
 - lineárna
 - kruhová
 - eliptická
- ELM vlnenie vyžiarené anténou, ktoré sa šíri do bodu príjmu má vzhľadom na povrch zeme **horizontálnu** a **vertikálnu** zložku elm vlnenia; (obr. 2.2)
 - tieto zložky (E_Y ; E_Z) prejdú pri šírení vlnenia rôznym prostredím
 - líšia sa v mieste príjmu **veľkosťou amplitúdy** a **fázy**

Obr.2.2: Polarizácia elektromagnetického vlnenia



LINEÁRNA POLARIZÁCIA

- Elm vlnenie je **lineárne** vtedy keď výsledný vektor „ E “ má konštantnú orientáciu (fázu), ale jeho veľkosť sa periodicky mení s uhlovou rýchlosťou „ ω “

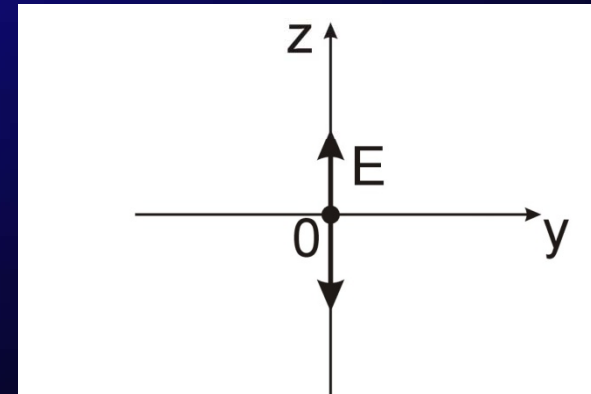
$$E = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} \cos \omega t$$

- Veľkosť uhla „ α “ ktorým je určená orientácia výsledného vektora je **konštantná**

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E_z}{E_y} = \text{konštanta}$$

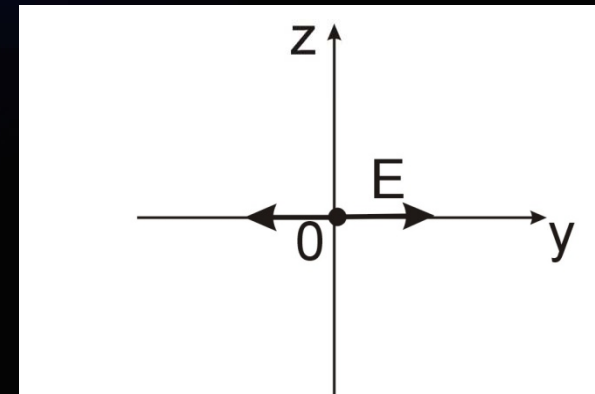
- Ak má lineárne polarizované vlnenie len vertikálnu zložku ($E_y=0$) – hovoríme, že **vlnenie je vertikálne polarizované**.

Obr.2.3: Vertikálna polarizácia



- Ak má lineárne polarizované vlnenie len horizontálnu zložku ($E_z=0$) – hovoríme, že **vlnenie je horizontálne polarizované**.

Obr.2.4: Horizontálna polarizácia



- Lineárna polarizácia sa používa, keď sa **vzájomná poloha** vysielacej a prijímacej antény **nemení!!!**

KRUHOVÁ POLARIZÁCIA:

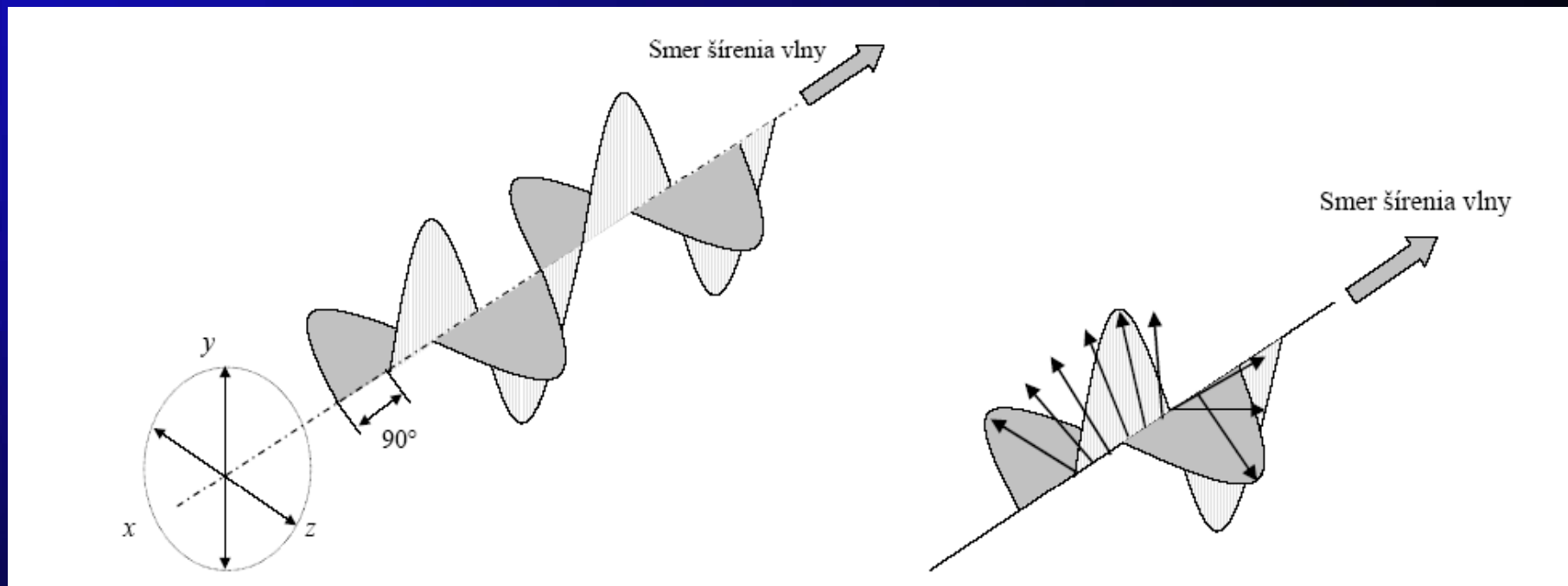
- Vzniká vtedy, ak sú amplitúdy horizontálnej a vertikálnej zložky vektora „ E “ rovnaké a mení sa len ich fáza – **veľkosť** výsledného vektora **sa nemení**; (obr.2.5)

$$E = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} = \text{konštanta}$$

- Uhol α ktorým je určená orientácia výsledného vektora sa **mení s rýchlosťou „ ω “**

$$\text{tg } \alpha = \frac{E_z}{E_y} = \text{tg } \omega t$$

Obr.2.5: Kruhová polarizácia elektromagnetického vlnenia



ELIPTICKÁ POLARIZÁCIA:

- Je vtedy, ak vektor výsledného el. poľa opisuje svojím koncom elipsu – veľkosť vektora „ E “ a jeho fáza „ α “ sa periodicky menia
- Použitie: keď sa mení vzájomná poloha vysielacej alebo prijímacej antény (pri sledovaní družíc, rádiolokácii, rádionavigácii,...)

ZHODNOTENIE POLARIZÁCIE ELM VLNENIA:

- Kruhovo polarizované elm vlnenie si zachováva polarizáciu aj pri prechode ionosférou, čím je zaručené verné sledovanie cieľov
- Pri rovnosti polos elipsy sa mení eliptická polarizácia na kruhovú a pri neobmedzenom zmenšovaní malej polosi na lineárnu polarizáciu

Frekvenčné pásma rádiových vln

- Do priestoru je možné vyžiariť elm vlny vo veľkom frekvenčnom rozsahu (rozsahu vlnových dĺžok) – tomu zodpovedá veľký počet žiaričov (antén)
- V dôsledku veľmi veľkej šírky frekvenčného pásme sú značné rozdiely vo vlastnostiach používaných elm vln
- Využitie rôznych vlnových dĺžok elm vlnenia je väčšinou viazané na vlastnosti vln z hľadiska:
 - možnosti ich generovania (vysielania)
 - vlastností ich šírenia
 - možností ich zachytenia
 - ich prípadných účinkov
- Elm vlny sú vo fyzike charakterizované dvomi vlastnosťami
 - vlnovými a kvantovými (**duálny charakter elm vlny**)
 - **vlnové** – odraz, lom, ohyb, interferencia, polarizácia
 - **kvantové** – predstava fotónu, ktorý vyvolá fotoelektrický jav

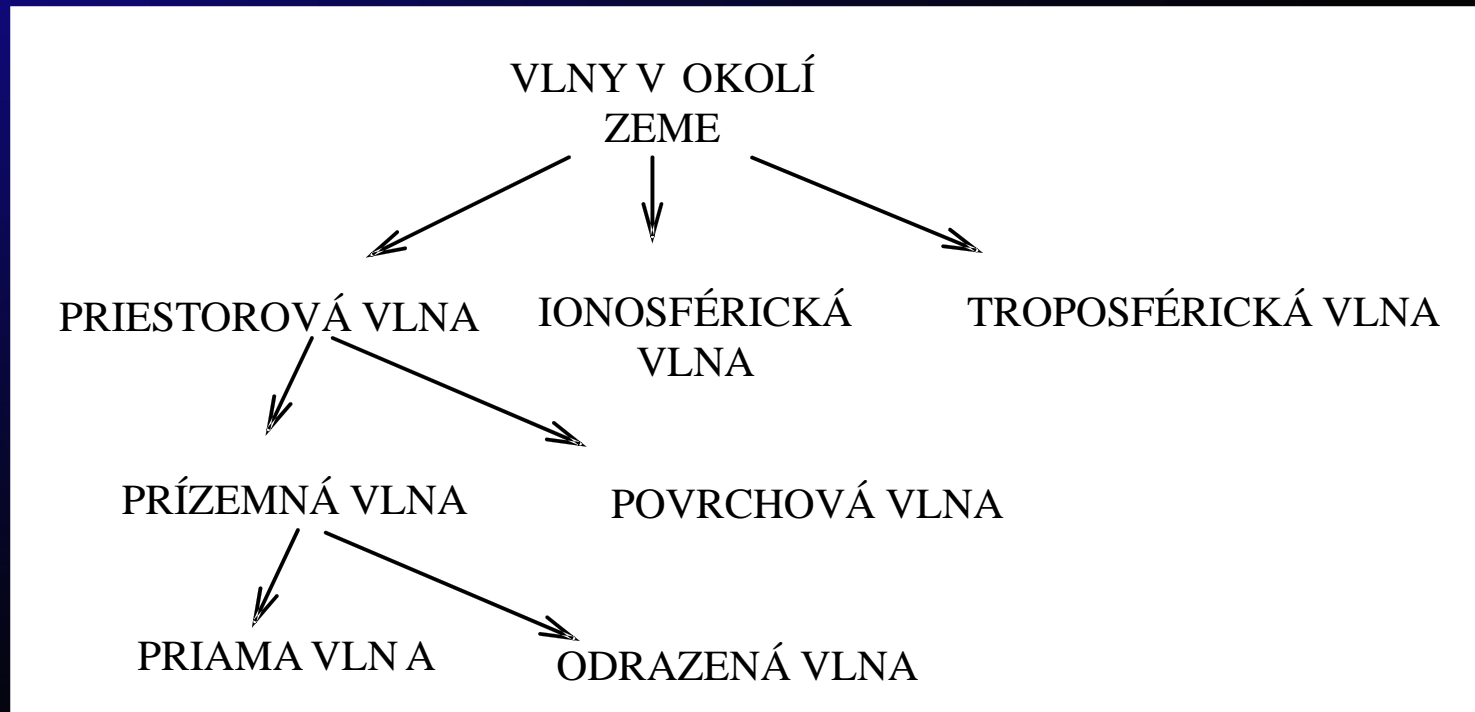
Názov	Title	Frekvencia	VI. dĺžka
Extrémne dlhé vlny	Extremely LF (ELF)	0,3-3kHz	1000-100km
Veľmi dlhé vlny	Very LF (VLF)	3-30kHz	100-10km
Dlhé vlny (DV)	Low Frequency (LF)	30-300kHz	10-1km
Stredné vlny (SV)	Medium Freq. (MF)	0,3-3MHz	1-0,1km
Krátke vlny (KV)	High Freq. (HF)	3-30MHz	100-10m
Veľmi KV (VKV)	Very HF (VHF)	30-300MHz	10-1m
Ultra krátke vlny (UKV)	Ultra HF (UHF)	0,3-3GHz	1-0,1m
Mikrovlny I.	Super HF (SHF)	3-30GHz	100-10mm
Mikrovlny II.	Extremely HF (EHF)	30-300GHz	10-1mm
Infračervené žiarenie	Infra Red (IR)	10^{10} - 10^{14} Hz	1mm-1 μ m
Viditeľné svetlo	Visible (VIS)	10^{14} Hz	400-700nm
Ultrafialové žiarenie	Ultra Violet (UV)	10^{14} - 10^{16} Hz	400-10nm
Röntgenové žiarenie	X-Rays	10^{16} - 10^{19} Hz	10-0,1nm
Gama žiarenie	Gamma Rays	10^{19} - 10^{24} Hz	10^{-10} - 10^{-14} m

■ Príklady frekvenčných pásiem, ktoré sa využívajú komerčne

- Pozemná a káblová televízia: 54 ÷ 806 MHz
- Satelitná televízia: pásmo 12 GHz
- Bluetooth: 2,4 ÷ 2,48 GHz
- WI-FI: pásma 2,4 ÷ 5 GHz
- GPS - satelitná navigácia: 1227,6 MHz
- GSM - digitálne mobilné telefóny: 900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz
- NMT - analógové mobilné telefóny: 450 MHz
- Rádiom riadené modely: pre všetky modely 40 MHz pre letecké modely 35 MHz
- Civilné pásmo: 27 MHz
- Diaľkové ovládanie: 434 MHz
- Rádioamatérske pásma: 160m - 1,5 MHz; 80 m - 3,5 MHz
40 m - 7 MHz; 20 m - 14 MHz
15 m - 21 MHz; 10 m – 28 MHz
2 m – 144 MHz; 70 cm – 433 MHz

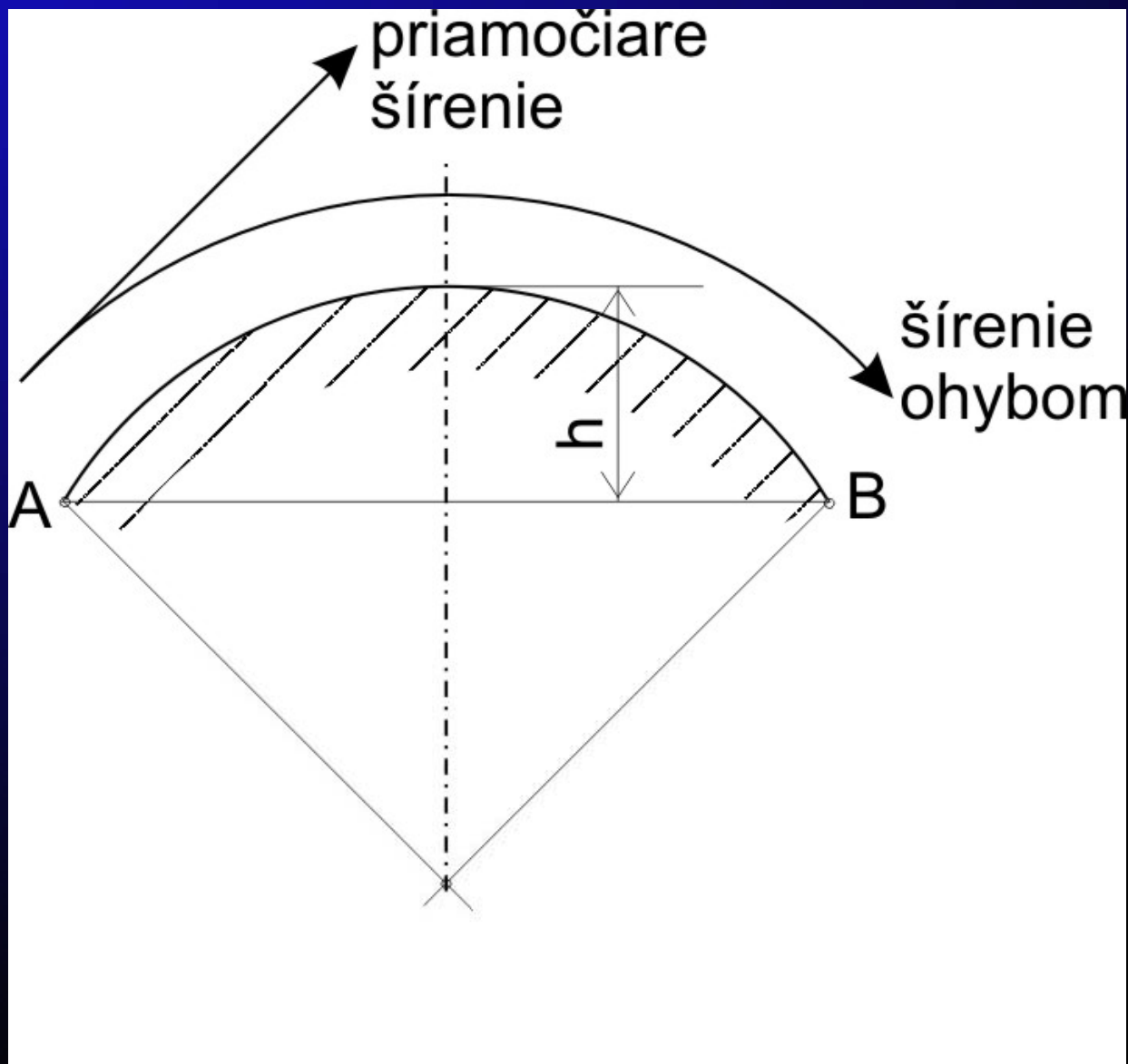
Spôsoby šírenia elektromagnetických vln

- Delenie spojenia v závislosti od polohy vysielacej (VA) a prijímacej antény (PA):
 - Zem - Zem
 - Zem – kozmický priestor
 - kozmický priestor - kozmický priestor



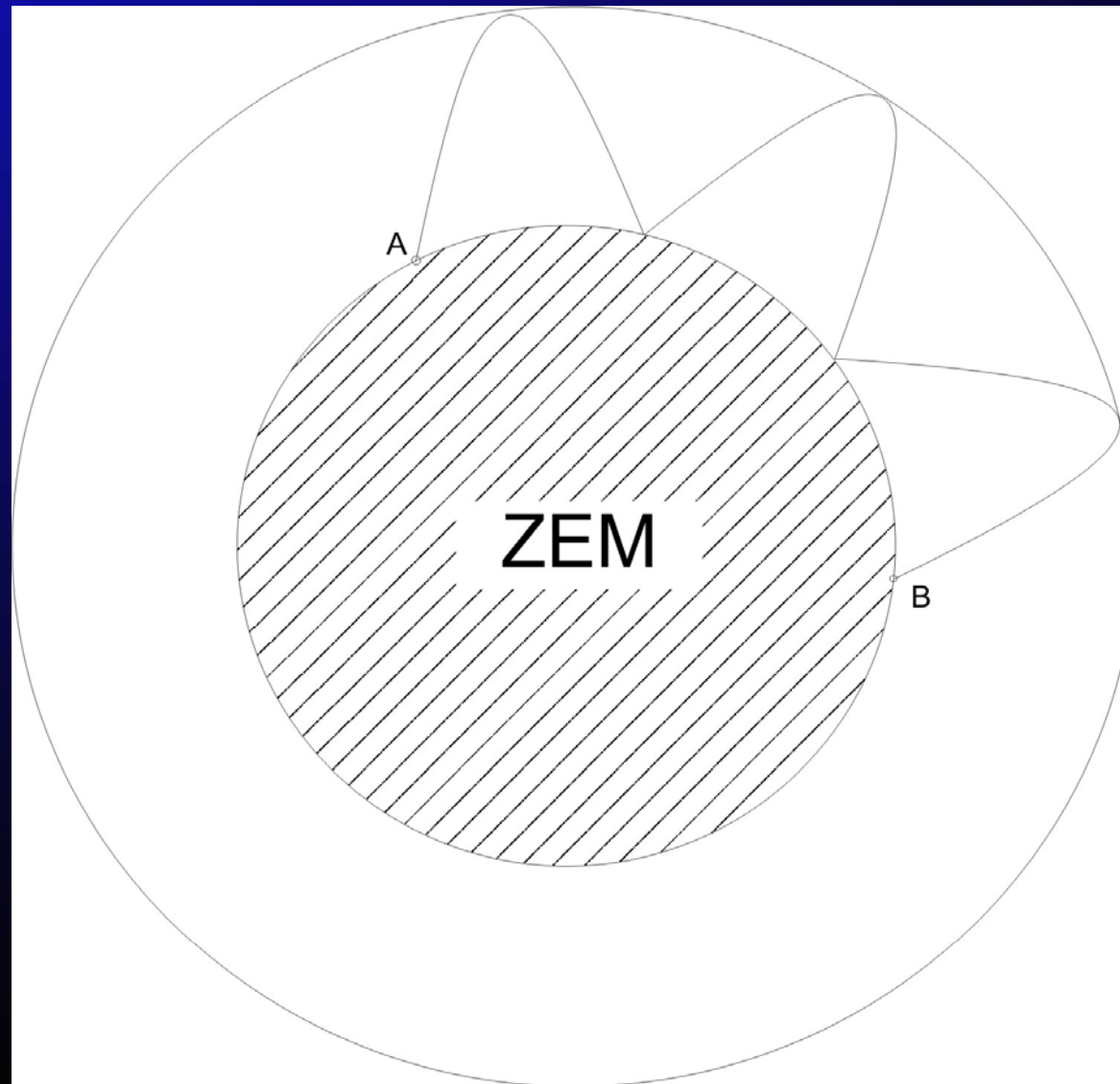
- Prítomnosť povrchu zemského a zvláštnosti zloženia atmosféry pôsobia na šírenie elm vlnenia
- Prítomnosť polovodivého povrchu zeme skresľuje štruktúru vlny a je príčinou **útlmu** elm vlnenia
- Guľový tvar povrchu zeme spôsobuje **ohyb (difrakciu)** vln, ktoré sa šíria nad zemou - difrakcia vlny nastane vtedy, keď sú rozmery prekážky rádovo rovnaké ako dĺžka vlny
- Pri šírení vlnenia nad zemou za takúto prekážku môžeme považovať výšku „**h**“ guľovej výseče obmedzenej rovinou preloženou tetivou „**AB**“
- Elm vlny, ktorých **vlnová dĺžka je menšia** ako výška „**h**“, nie sú podrobené ohybu a šíria sa **priamočiaro**
- Keď vlnová dĺžka vlnenia **je porovnateľná** s výškou „**h**“, šíria sa tak, že **sledujú povrch** zeme
- Difrakčný spôsob šírenia aj za najpriaznivejších podmienok nepresahuje vzdialenosť 3 až 4 tisíc kilometrov
- Elm vlny, ktoré sa šíria v blízkosti zemského povrchu a ktoré sa jeho vplyvom ohýbajú, sa nazývajú **povrchové**; (obr.2.6),(obr.2.8)

Obr.2.6: Šírenie elektromagnetického vlnenia ohybom

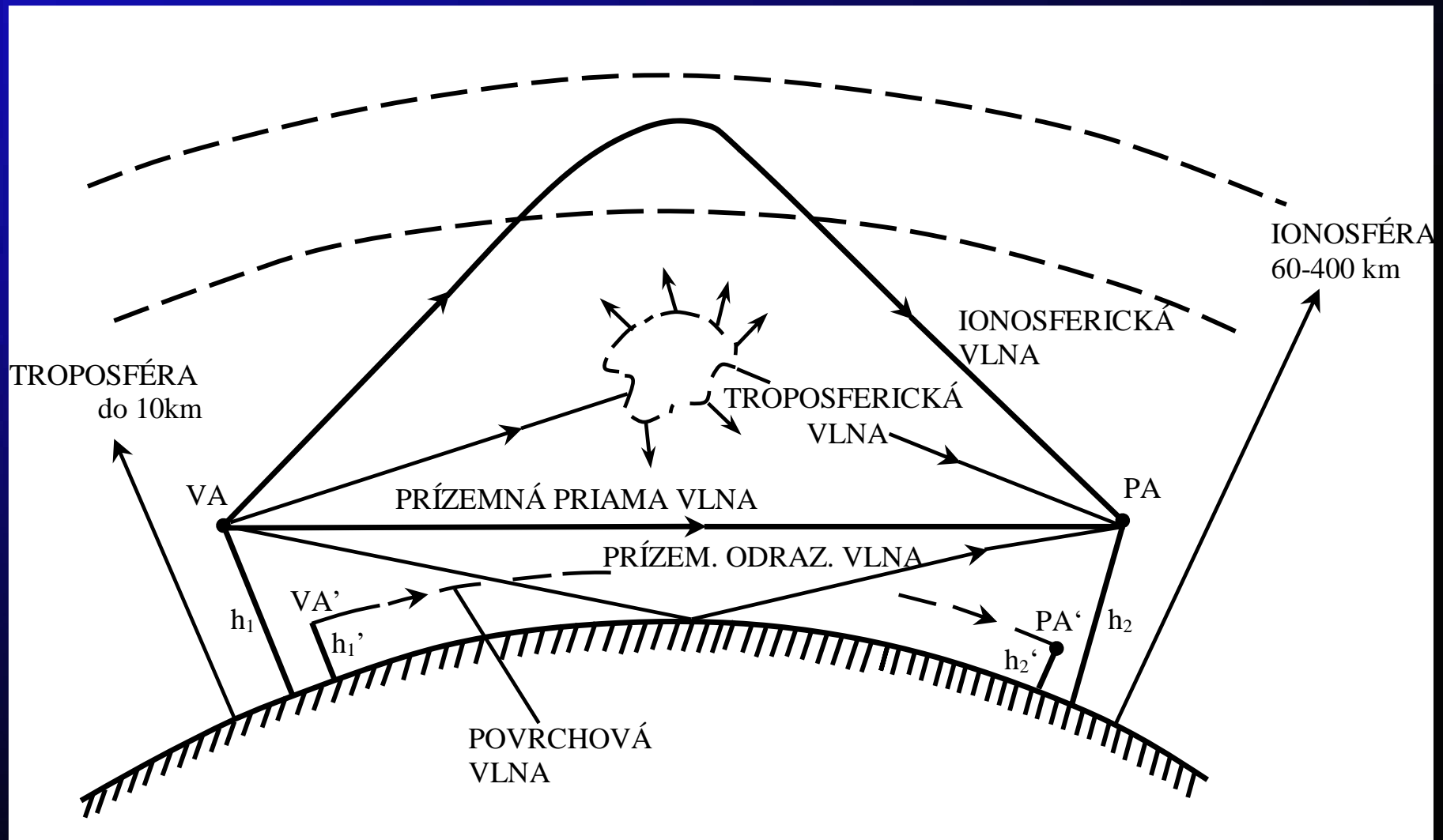


- Šírenie elm vln na väčšie vzdialenosti je ovplyvnené najmä ionizovanými vrstvami atmosféry
- Celý proces šírenia vlnenia sa odohráva podľa zákonov **odrazu a lomu** od ionizovanej oblasti (ionosféra: 60-400 km)
- Následkom mnohonásobného odrazu vln od ionosféry a od zeme, môže vlnenie dosiahnuť veľmi vzdialené body (B) na povrchu zeme, dokonca za priaznivých podmienok obehnúť niekoľkokrát okolo Zeme
- Vlny, ktoré sa šíria na veľké vzdialenosti a ohýbajú sa okolo zeme následkom jednoduchého alebo mnohonásobného odrazu od ionosféry alebo touto prenikajú, sa nazývajú **priestorové**; (obr.2.7),(obr.2.8)

Obr.2.7: Šírenie elektromagnetického vlnenia mnohonásobným odrazom od ionosféry



Obr.2.8: Schématické znázornenie spôsobov šírenia elektromagnetických vln v okolí Zeme



PRIESTOROVÁ VLNA; (obr.2.8)

- Šíri sa v blízkosti povrchu Zeme (rozhranie: polovodivý zemský povrch – vzduch)

POVRCHOVÁ VLNA

- je vyžarovaná VA umiestnenou bezprostredne nad Zemským povrchom – jej tlmenie je závislé od parametrov Zem. povrchu
- šíri sa pozdĺž tohto povrchu – sleduje zakrivenie Zeme

PRÍZEMNÁ VLNA

- je vyžarovaná VA umiestnenou relatívne vysoko (antény sú malé) nad Zemským povrchom (prípád VKV)
- Použitie pri spojení Zem - lietadlo

PRIAMA VLNA

- na Zemi sú výšky VA aj PA niekoľko násobkom vlnovej dĺžky
- je ovplyvňovaná vlastnosťami troposféry

ODRAZENÁ VLNA

- výšky VA aj PA sú niekoľko násobkom vlnovej dĺžky
- je ovplyvňovaná vlastnosťami troposféry a elektrickými parametrami Zemského povrchu v mieste odrazu

* V prípade, že VA aj PA sú umiestnená na povrchu Zeme, priame a odrazené vlny majú rovnakú amplitúdu, ale opačnú fázu, preto sa navzájom rušia. Prízemná vlna sa potom šíri len ako vlna povrchová.

TROPOSFÉRICKÁ VLNA; (obr.2.8)

- Šíri sa na veľké vzdialenosti (až 1000km) troposférickým rozptylom a troposférickým vlnovodom
- Patria sem vlny **kratšie ako 10m (VKV, UKV)**
- Šírenie je ovplyvnené vlastnosťami ionosférických vrstiev

IONOSFÉRICKÁ VLNA; (obr.2.8)

- Šíri sa na veľké vzdialenosti jedným alebo viacerými odrazmi od ionosféry (**vlny dlhšie ako 10m – DV, SV, KV**)
- Patria sem aj vlny rozptýlené nehomogenitami v ionosfére, resp. odrazené od ionizovaných stôp meteoritov (**metrové vlny - VKV**)
- Šírenie je ovplyvnené vlastnosťami ionosférických vrstiev

Šírenie elektromagnetického poľa v rôznom prostredí

ŠÍRENIE V IDEÁLNOHOMOGÉNNOHOM DIELEKTRIKU

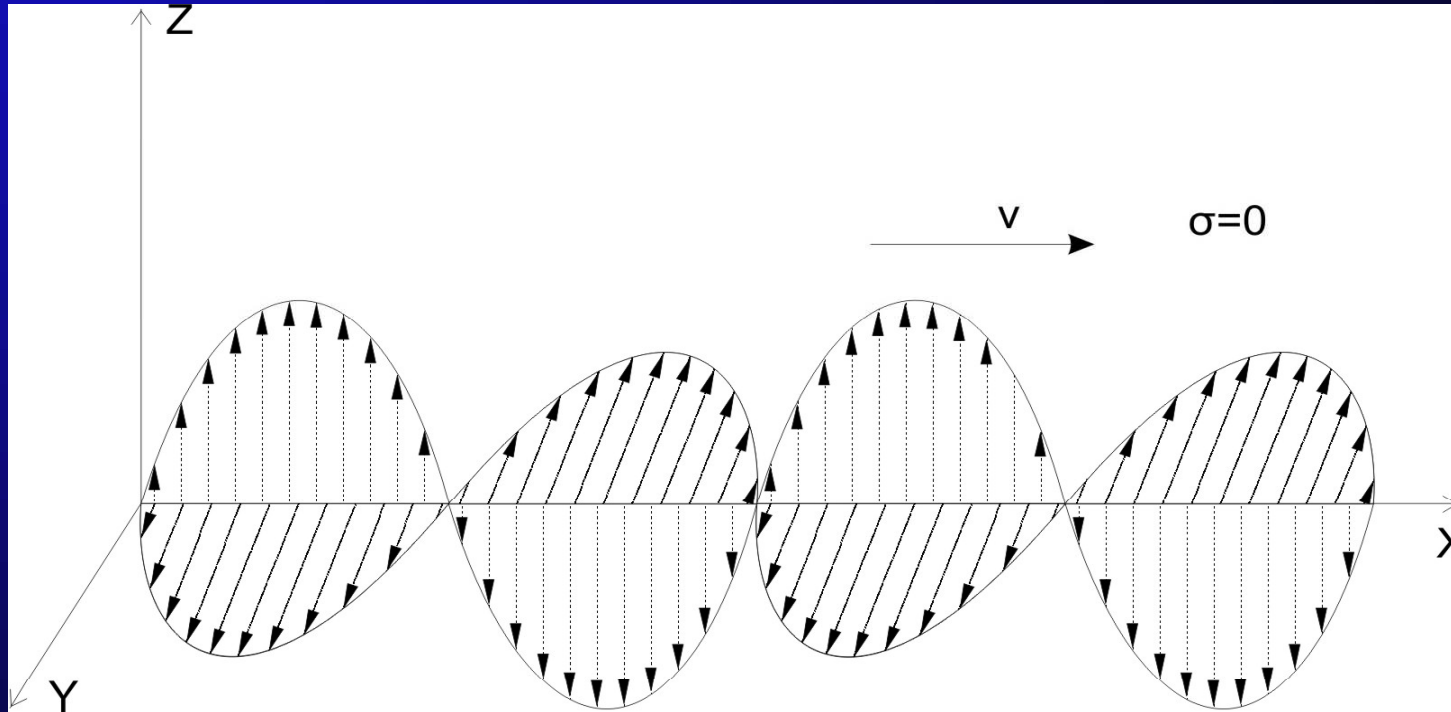
- Vlastnosti prostredia z hľadiska šírenia elm vln:
 - merná el. vodivosť $\sigma = 0$
 - dielektrická konštanta (permitivita) $\varepsilon = \text{konštanta}$
 - permeabilita $\mu = \mu_0$
- Takéto dielektrikum - spodné vrstvy atmosféry ($\varepsilon_r = 1$)
- Guľové vlnenie je nahradené rovinným – **el. a mag. pole bude mať len jednu zložku, ostatné sa rovnajú nule**

$$\mathbf{E}_z = \mathbf{E}_m \cos \omega \left(t + \frac{x}{v} \right)$$

$$\mathbf{H}_y = \frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{120\pi} \mathbf{E}_m \cos \omega \left(t + \frac{x}{v} \right)$$

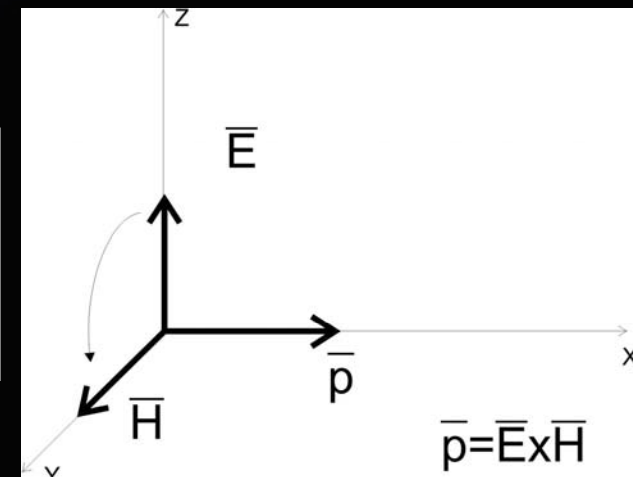
- Vektory „E“ a „H“ sú navzájom kolmé; (Obr. 2.9)
- Smer šírenia vlny je v kladnom smere osi „x“
- Fázový posun v smere osi šírenia je nulový
- Amplitúda jednotlivých zložiek je konštantná

Elektrické a magnetické pole rovinnej vlny v ideálnom dielektriku



Obr. 2.9

Argument $(t + x/v)$ v rovniciach vyjadruje periodickú zmenu rovinnej vlny



ŠÍRENIE V HOMOGÉNNOM, POLOVODIVOM PROSTREDÍ

- Šírenie vln pri preniknutí elm vlnenia do **morskej vody, zemského povrchu, vrchnej vrstvy ionosféry**
- Polovodivé prostredie - dielektrikum
 - merná el. vodivosť - $\sigma \neq 0$
 - permeabilita - μ_r
 - dielektrická konštanta (permitivita) $\epsilon = n - jp$
 - „n“ (reálna zložka) ovplyvňuje rýchlosť šírenia vlnenia
 - „jp“ (imaginárna zložka) ovplyvňuje veľkosť amplitúdy
- Zložky el. a mag. poľa rovinatej vlny sú

$$E_z = E_m e^{-\delta x} \cos \omega \left(t + \frac{x}{v} \right)$$

$$H_y = H_m e^{-\delta x} \cos \left[\omega \left(t + \frac{x}{v} \right) - \varphi \right]$$

- Konštanta útlmu

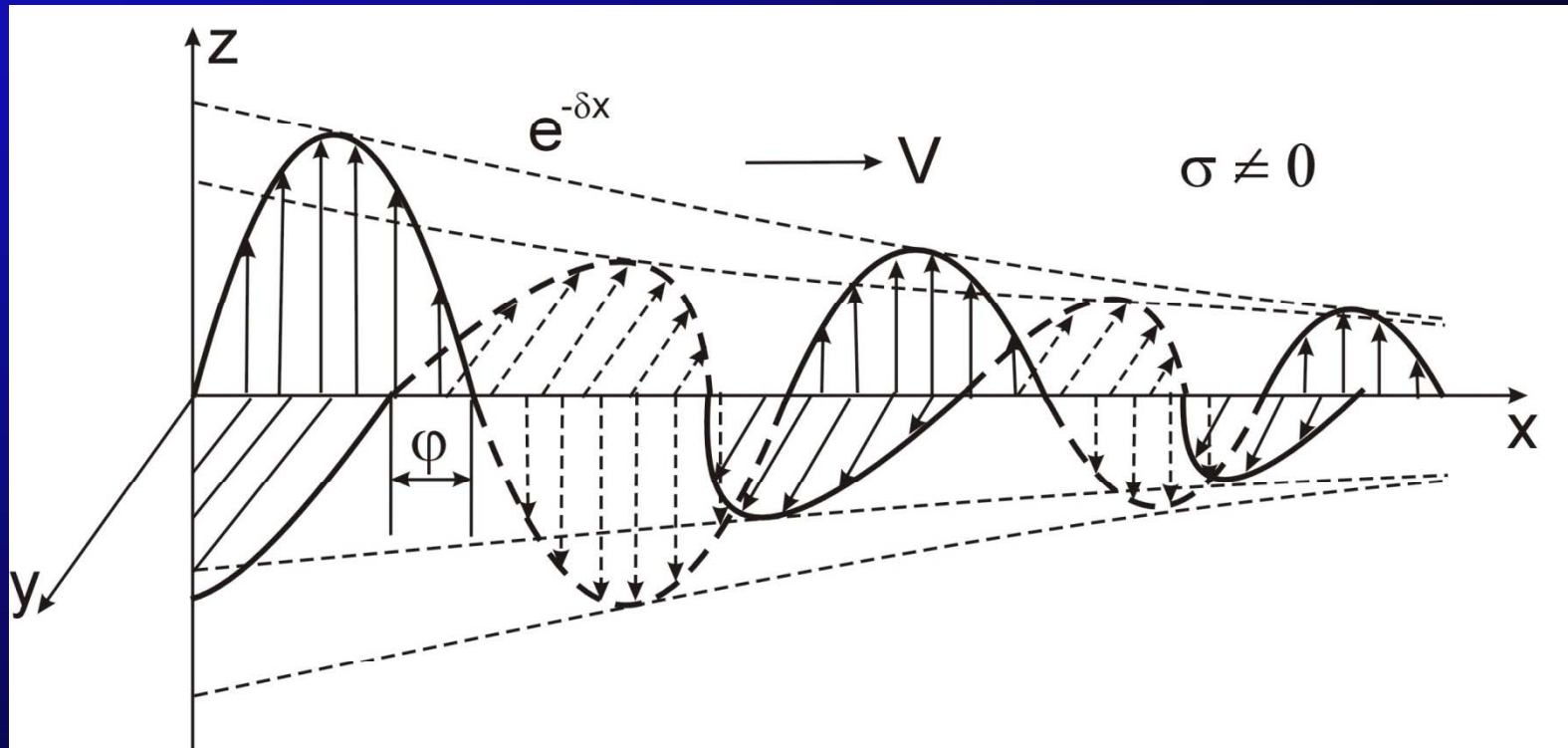
$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} p$$

- Rýchlosť šírenia (ovplyvňuje ju „n“)

$$v = \frac{c}{n}$$

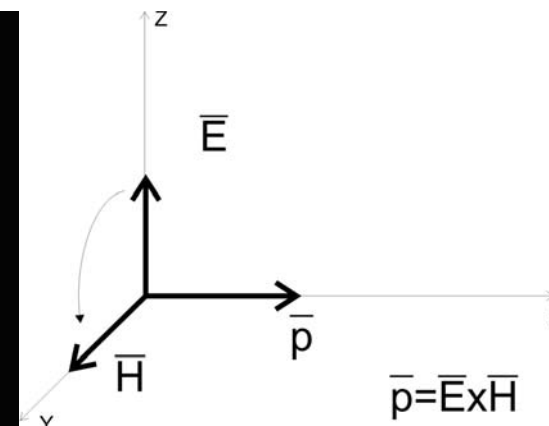
- Výraz „ $e^{-\delta x}$ “ vyjadruje, že amplitúda el. a mag. zložky poľa **exponenciálne klesá**
- Rýchlosť šírenia „ v “ sa **líši** od rýchlosti šírenia v ideálnom dielektriku
- Mag. pole je **fázovo posunuté** oproti el. poľu o uhol „ φ “
- Útlm rádiových vln v polovodivom prostredí **stúpa** s frekvenciou, preto sú najdlhšie vlny **najvýhodnejšie** pre rádiové spojenia v takomto prostredí!!!!

Elektrické a magnetické pole rovinnej vlny v polovodivom prostredí



Obr. 2.10

ϕ - fázový posun
 σ - merná elektrická vodivosť
 $e^{-\delta x}$ - vyjadruje, že amplitúda el. a mag. zložky poľa **exponenciálne klesá**



ODRAZ A LOM ELM. VLN

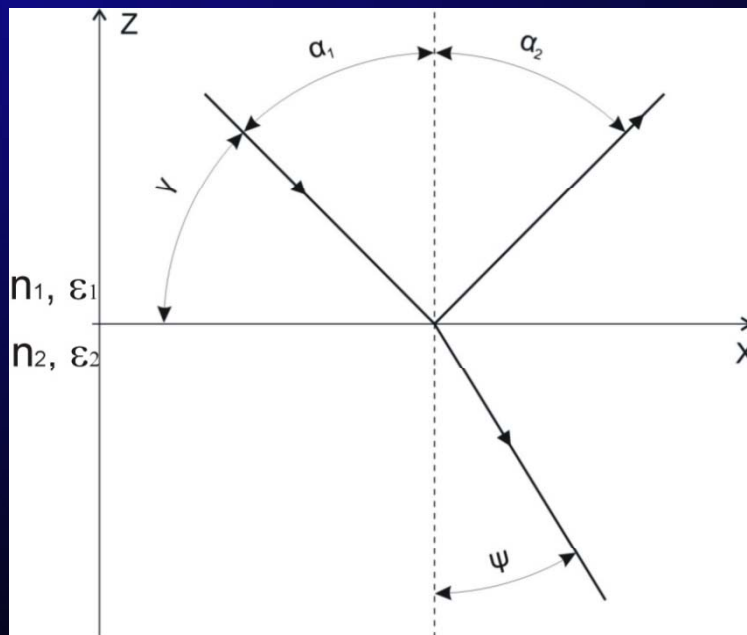
■ Odraz nastáva

- hlavne pri KV a VKV

■ Lom nastáva

- pri prechode vlnenia z prostredia s dielektrickou konštantou „ ϵ_1 “ do prostredia s „ ϵ_2 “

ODRAZ a LOM elm vlnenia na rozhraní DVOCH DIELEKTRÍK, ak $\sigma = 0$



Ak dopadne elm vlnenie na rozhranie dvoch dielektrík pod uhlom „ α_1 “ :

- časť sa **odrazí** pod uhlom „ α_2 “
- časť preniká do nového prostredia pod uhlom „ ψ “ - **láme** sa

Podľa zákona odrazu platí:

$$\sin \alpha_1 = \sin \alpha_2$$

pričom obidva uhly ležia v tej istej rovine

- Časť vlnenia prechádzajúceho do iného prostredia mení svoj smer (**lom**)
- Pre pomer uhla dopadu (α_1) a uhla lomu (ψ) platí

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \psi} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_1}}}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_2}}} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{n_2}{n_1}$$

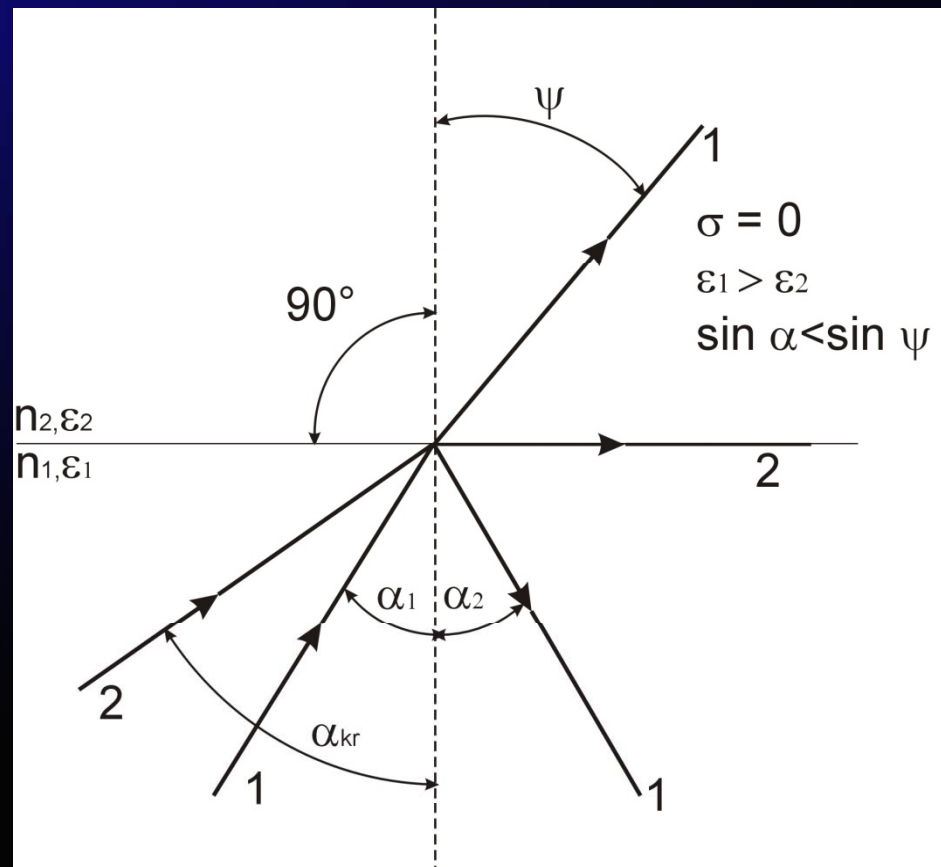
- Pomer rýchlostí vlnenia v rôznych dielektrikách alebo pomer odmocnín dielektrických konštánt je **relatívny indexu lomu**
 - ak vstupuje elm vlnenie z prostredia s menšou dielektrickou konštantou do prostredia s väčšou dielektrickou konštantou ($\epsilon_2 > \epsilon_1$); vlnenie sa láme **ku kolmici** a teda (**$\sin \alpha_1 > \sin \psi$**)
 - ak vstupuje elm vlnenie z prostredia s väčšou dielektrickou konštantou do prostredia s menšou dielektrickou konštantou ($\epsilon_2 < \epsilon_1$); vlnenie sa láme **od kolmice** a teda (**$\sin \alpha_1 < \sin \psi$**)

- „sin ψ “ môže nadobudnúť najviac hodnotu 1, keď $\psi=90^\circ$
- Tomuto uhlu lomu prislúcha v prostredí s väčšou dielektrickou konštantnou uhol „ α_{kr} “ (**kritický** – špecifický prípad, medzný uhol)
- Ak sa tento uhol **prekročí**, žiadne vlnenie neprenikne rozhraním a všetka energia sa odrazí – **totálny odraz**

$$\sin \alpha_{kr} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$$

$$n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$$

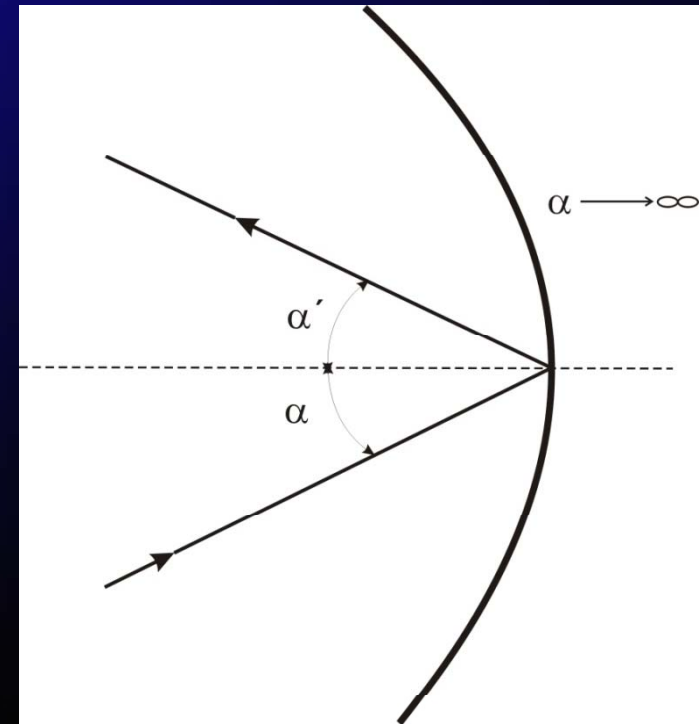
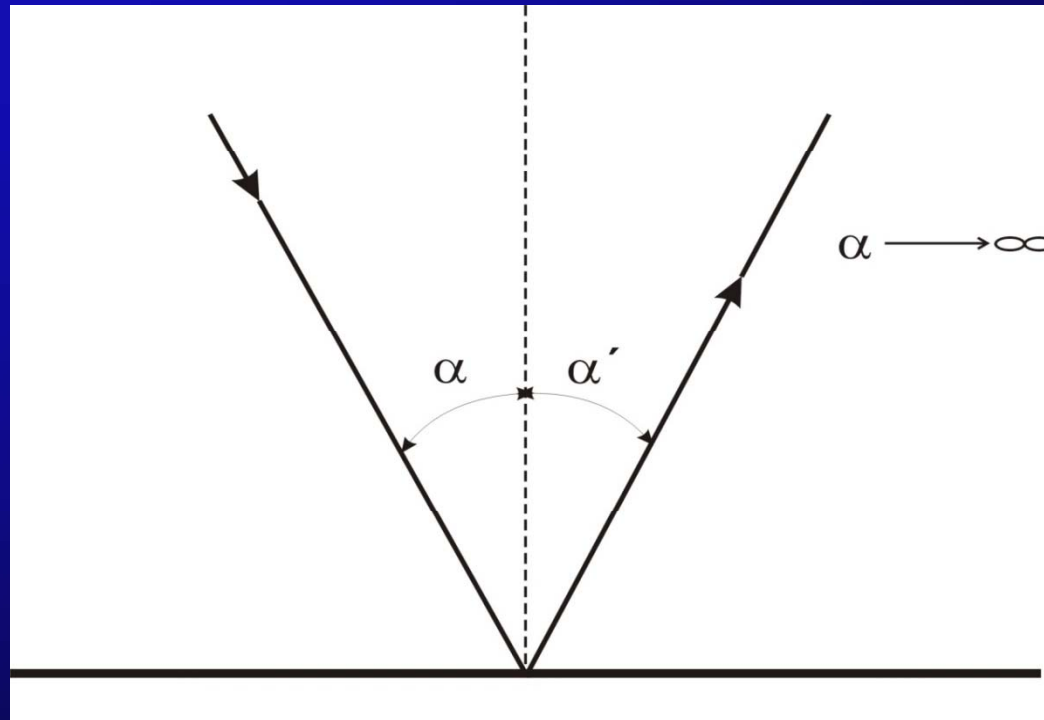


- Pri vertikálne polarizovanej vlne pri určitom uhle dopadu prechádza celá energia elm vlnenia do druhého prostredia; tento uhol nazývame polarizačný uhol alebo Brewsterov uhol
- Tento uhol, pri ktorom je elm vlnenie úplne polarizované, závisí od frekvencie a od dielektrickej konštanty
- Pri horizontálne polarizovanej vlne tento jav nemôže nastať, pri tejto vždy existuje odrazené vlnenie

ODRAZ vlnenia od DOKONALE VODIVÉHO PROSTREDIA (merná elektrická vodivosť $\sigma \rightarrow \infty$)

- Energia dopadajúcej vlny nepreniká do druhého prostredia – nastáva **totálny** odraz
- Odrazené vlny môžu byť **rovinné** alebo **sférické**
- Pri odraze **vertikálne polarizovanej vlny** sa **nemení** ani amplitúda, ani fáza
- Pri odraze **horizontálne polarizovanej vlny** sa amplitúdy zachovávajú, ale **mení** sa fáza odrazenej vlny o 180 ; (obr.2.11)

Obr.2.11. Odraz od rovinných a sférických vodivých povrchov



Podľa zákona odrazu uhol dopadajúcej vlny sa rovná uhlu odrazenej vlny!!!

ŠÍRENIE PRIAMYCH ELM. VĽN VO VOĽNOM PRIESTORE

- Jedná sa o šírenie vln vo **fiktívnom** prostredí

$$\sigma \neq 0; \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r; \mu = \mu_0 \mu_r$$

- Pre izotropne (všesmerovo) vyžarujúcu anténu platí:
 - hustota výkonu „P“ vo vzdialenosti „R“ od antény

$$S = \frac{P}{4\pi R^2}$$

- z Poyntingovho vektora

$$S = \frac{E^2}{2Z_0} = \frac{E^2}{240\pi}$$

- amplitúda intenzity elektrického poľa, ktoré vytvorí vo vzdialenosti „R“ izotropný žiarič vyžarujúci výkon „P“

$$E = \frac{\sqrt{60P}}{R}$$

■ Pre **smerové** (v praxi používané) antény ($G \neq 1$) platí:

- amplitúda intenzity elektrického poľa (ak výkon P **nahradíme ekvivalentným izotropným vyžiareným výkonom**, t. j. súčinom energetického zisku antény (vzhľadom na izotropný žiarič) a výkonu privádzaného do antény)

$$E = \frac{\sqrt{60P_1G_1}}{R}$$

- ak vyjadríme vyžiarený výkon v „kW“, vzdialenosť v „km“ a intenzitu elektrického poľa v „mV m^{-1} “, potom

$$E = \frac{245\sqrt{P_1G_1}}{R}$$

$$E = \frac{314\sqrt{P_1}}{R}$$

- ak je zdrojom **polvlnový dipól** ($G_1=1,64$)
- **skutočný výkon** „ P_2 “ v mieste príjmu, dodávaný prijímacou anténou do prijímača

$$P_2 = \frac{G_1G_2\lambda^2 P_1}{(4\pi R)^2}$$

Činiteľ tlmenia

- Elm vlny šíriace sa v reálnom prostredí sú viac alebo menej tlmené
 - pri šírení prízemnej vlny časť energie vlny preniká pod povrch Zeme a mení sa na teplo
 - časť energie sa rozptyľuje
 - iba pomerne malá časť energie dopadá na prijímaciu anténu
- **Činiteľ tlmenia (W)** - zmenšenie intenzity elektrického poľa vlny šíriacej sa v reálnom prostredí v porovnaní s intenzitou poľa, ktorá by existovala v ideálnom voľnom priestore

$$E = \frac{\sqrt{60P_1G_1}}{R} |W|$$

- Keď pre dané podmienky šírenia vieme určiť činiteľ tlmenia, potom pre **intenzitu elektrického poľa v mieste príjmu** platí

$$E = \frac{245\sqrt{P_1G_1}}{R} |W|$$

kde

$$[P] = kW, [R] = km \quad a \quad [E] = mV / m$$

- Činiteľ tlmenia je funkciou
 - vzdialenosti „R“
 - v mnohých prípadoch sa tlmenie trasy mení s časom, preto činiteľ tlmenia je tiež funkciou času
- Výkon „P₂“ dodávaný prijímacou anténou do prijímača pri šírení elektromagnetických vln v reálnom prostredí

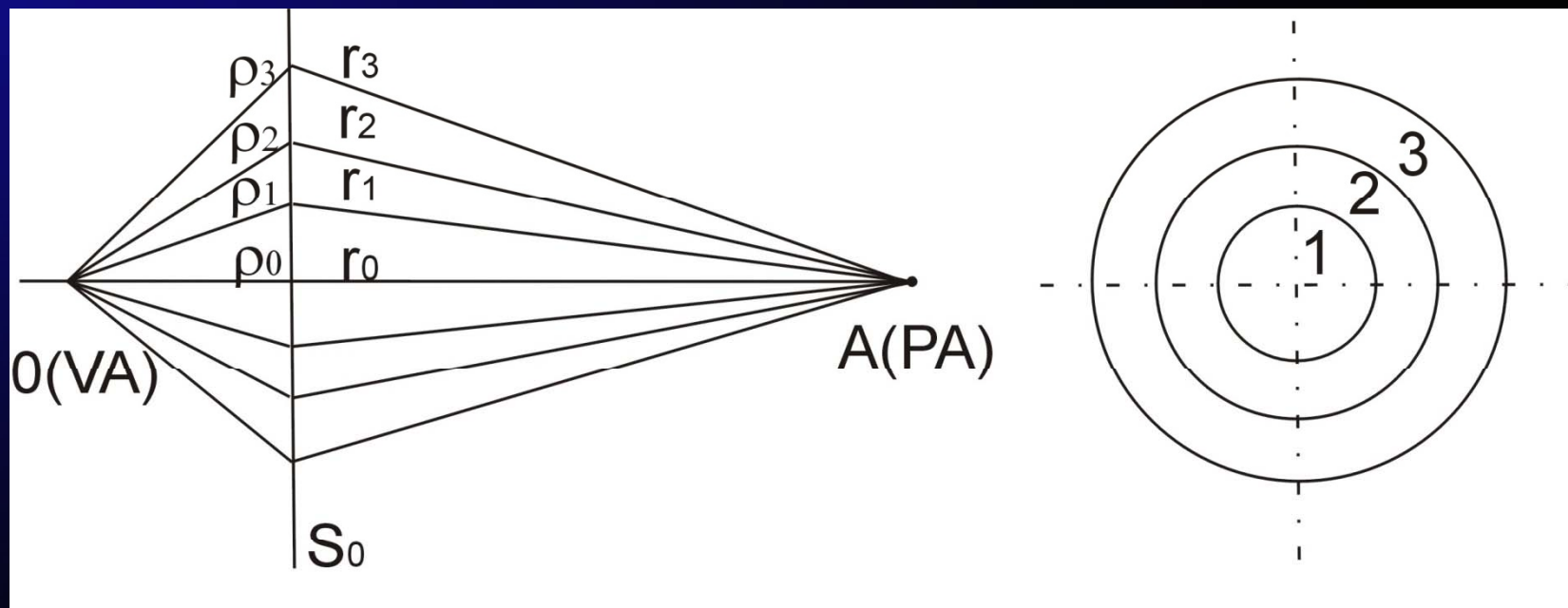
$$P_2 = \frac{G_1 G_2 \lambda^2 P_1}{(4\pi R)^2} |W|^2$$

- Veličina, ktorá popisuje rozptyl elektromagnetickej energie pri šírení sa vlny vo voľnom priestore medzi izotropnými anténami sa nazýva **tlmenie voľného priestoru**

$$\lambda / 4\pi R$$

Fresnelove zóny

- Pri analýze šírenia elm vln musíme predovšetkým poznať, ktorá časť priestoru rozhodujúcim spôsobom ovplyvňuje šírenie, t. j. oblasť, v ktorej je elm vlna „**sústredená**“
- Uvažujme dva body „0“ a „A“ vo voľnom priestore; nech bod „0“ je zdrojovým bodom; rovina „ S_0 “ je kolmá na priamku „0A“
- Rovina „ S_0 “ je rozdelená na sústredné medzikružia (**Fresnelove zóny**) - tieto medzikružia sú určené polomerami „ ρ_n “ a „ r_n “



- Každá Fresnelova zóna vytvára v bode pozorovania zložky el. poľa, ktoré sa líši o 180° od fázy zložky el. poľa vytvorenej susednou zónou
- Potom pre výsledné elektrické pole platí

$$E(A) = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 + \dots$$

- pričom sčítance tohto radu sa navzájom líšia **tým menej**, čím je **kratšia** vlnová dĺžka
- Dochádzame k záveru, že el. pole v bode pozorovania je približne rovné súčtu polí elementárnych zdrojov umiestnených v **polovici prvej Fresnelovej zóny**

$$E(A) \approx \frac{E_1}{2}$$

- Tento vzťah platí tým presnejšie, čím lepšie je splnená nerovnosť

$$\rho_0 + r_0 \gg \lambda$$

- V každom prípade je el. pole v bode „A“ **menšie** ako súčet polí elementárnych zdrojov umiestnených v prvej Fresnelovej zóne

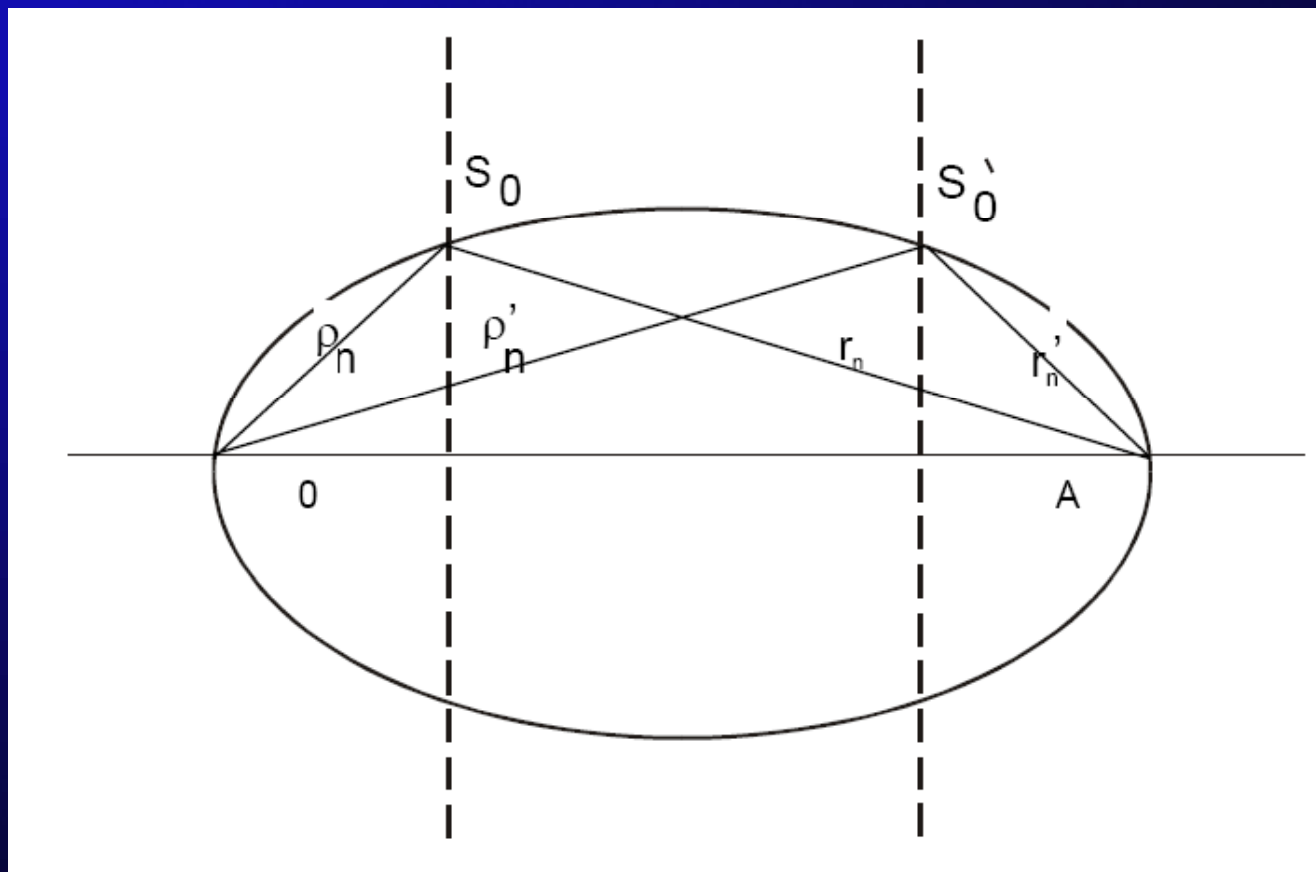
$$\frac{E_1}{2} < E(A) < E_1$$

- Ak premiestnime rovinu „S₀“ pozdĺž osi „OA“, budú hranice Fresnelových zón **opisovať povrchy elipsoidov** s ohniskami v bodoch „0“ a „A“ (rovnica elipsoidu)

$$\rho_n + r_n = \rho_0 + r_0 + n \frac{\lambda}{2} = \text{konštanta}$$

- **Záver:**
 - pri šírení vlny medzi bodmi „0“ a „A“ rozhodujúcu úlohu hrá objem ležiaci vo vnútri prvej Fresnelovej zóny
 - tento objem je tým ostrejšie ohraničený, čím silnejšie platia nerovnosti $\rho_0 \gg \lambda; r_0 \gg \lambda$
 - pri $\lambda \rightarrow 0$ všetky elipsoidy (priestorové Fresnelové zóny) prechádzajú na úsečku „0A“, čo zodpovedá šíreniu vlny pozdĺž lúča (aproximácia geometrickej optiky); (obr.2.12)

Obr.2.12. Priestorové Fresnelove zóny



Polomery Fresnelových zón

Plochy (FZ) sú rovnaké

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda\rho_0 r_0}{\rho_0 + r_0}}$$

$$S_F = \frac{n\lambda\rho_0 r_0}{\rho_0 + r_0}$$

Šírenie rádiových vln

- Za rádiové vlny považujeme vlny od 1000m (DV) do 0,1m (UKV)
- Rádiové vlny sú generované v rádiových vysielачoch, ktoré v elektronických obvodoch vytvoria signál potrebnej frekvencie, namodulujú tento signál prenášanou informáciou a signál s potrebným výkonom vyšlú pomocou vysielacej antény
- DV sa šíria na veľké vzdialenosti pozdĺž zemského povrchu
- KV sa odrážajú od ionosféry (priestor s iónmi a voľnými elektrónmi – chová sa ako vodivá plocha), ktorej stav a vlastnosti sa menia v závislosti od slnečného žiarenia (deň-noc, leto-zima,...), takže sa menia aj podmienky šírenia KV (veľký dosah)
- VKV – prenos TV signálu a FM rádio - vysielania, potrebujú priamu viditeľnosť VA a PA – ináč odrazy, interferencie
- UKV – GSM mobily, potrebujú priamu viditeľnosť VA a PA

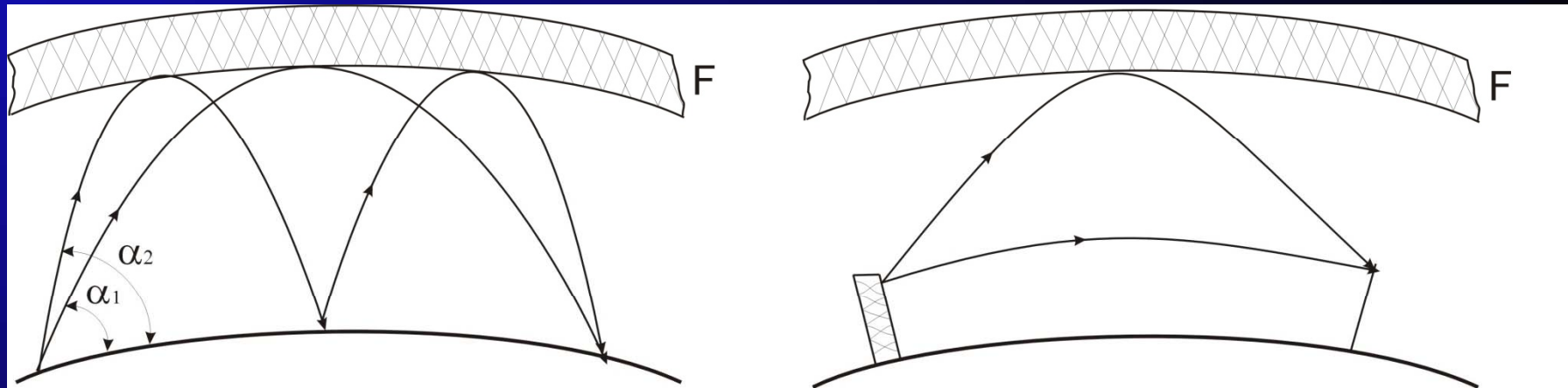
ŠÍRENIE DV (15 – 100 kHz; 20 000 – 3000 m)

- Šíri sa **povrchovými vlnami** na vzdialenosť 3000 – 4000 km difrakciou (odrazmi) a **priestornými vlnami**, ktoré vznikajú odrazom od spodných vrstiev ionosféry
- Následkom zmeny koncentrácie elektrónov a iónov v ionosfére sa mení výška jej odrazových vrstiev, a teda aj fáza vln, ktoré prichádzajú do miesta príjmu po rôznych dráhach, v dôsledku čoho vzniká kolísanie intenzity poľa v mieste príjmu
- Kolísanie intenzity v pásme DV je však také nepatrné a pomalé, že sa sluchom nedá ani postrehnúť
- Keď má nastať kolísanie príjmu, musí sa zmeniť fáza jedného z odrazených lúčov o 180°
- Takejto zmene fázy zodpovedá dráhový rozdiel daný polovičnou hodnotou vlnovej dĺžky. Pri $\lambda = 10\,000\text{ m}$ je to 5000 m, čo je taký veľký dráhový rozdiel, ktorý málokedy vzniká
- Výkyvy môžu byť väčšie pri menších vlnových dĺžkach DV

ŠÍRENIE SV (100kHz – 1,5MHz; 3000 – 200 m)

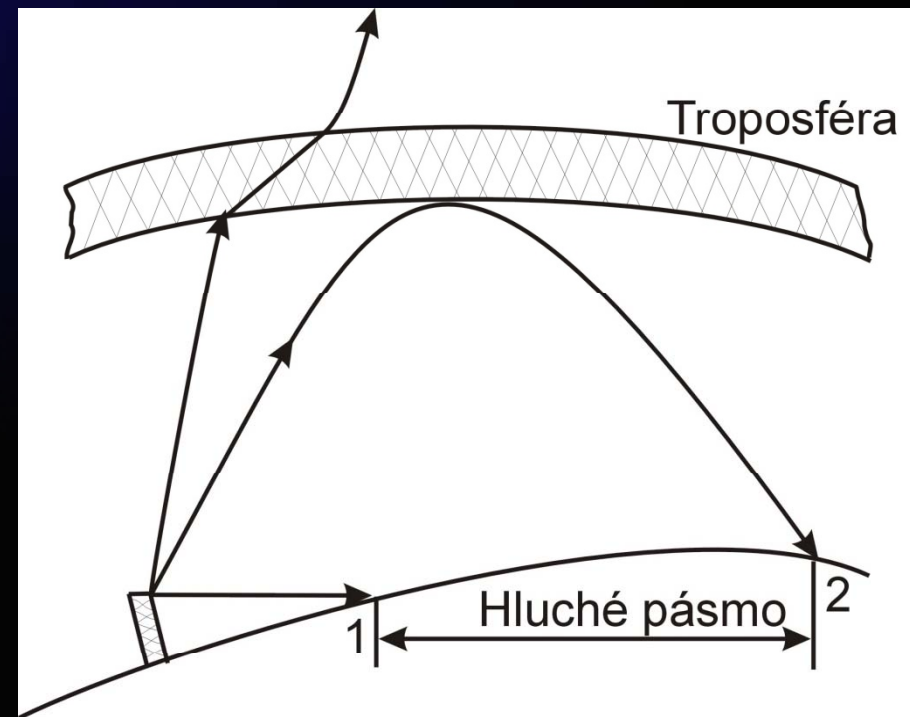
- Šíri sa **povrchovými vlnami** a **priestornými vlnami**, ktoré vznikajú odrazom od horných vrstiev ionosféry (väčšia koncentrácia elektrónov)
- **Vo dne** vzniká silné pohlcovanie priestorovej vlny, preto táto zaniká a vlnenie sa šíri len povrchovou vlnou, ktorá je tlmená zemským povrchom
- **V noci** sa stredné vlny šíria prízemnou aj priestorovou vlnou, preto sú ich dráhy šírenia rôzne a môže dôjsť v mieste príjmu k **interferencii dvoch signálov** z povrchovej a priestorovej vlny, čo má za následok **kolísanie príjmu – únik**; (obr.2.13)
- Ako opatrenie proti úniku, sa používajú na vysielacej strane proti únikové antény - antény postavené tak, aby intenzívnejšie vyžarovali povrchové vlny na úkor priestorových vln

Obr.2.13. Šírenie vln pomocou povrchových a priestorných vln



ŠÍRENIE KV (1,5 – 30MHz; 200 – 10 m)

- Šíri sa **povrchovými** a **priestornými vlnami**
- Vplyvom polovodivého povrchu a guľatosti Zeme sa **povrchové vlny** už pri vzdialenostiach niekoľko desiatok km **utlmia**, **priestorové vlny** vznikajú odrazom od horných vrstiev ionosféry
- Únik u tohto typu vln je omnoho silnejší ako v pásme SV
- Tvorí sa **Hluché pásma** spôsobené tým, že povrchové vlny, ktoré sú veľmi tlmené, dosiahnu len určitú vzdialenosť 1 od vysielača, priestorové vlny umožňujú príjem v oblasti „2“ a v priestore medzi „1“ a „2“ sa vytvorilo hluché pásmo, v ktorom nie je možný príjem



- **Ozvena rádiových vln** je opakovanie rádiového signálu vplyvom šírenia po niekoľkých rôznych cestách
- je spôsobená dopadom KV signálu šíriaceho sa priestorovou vlnou na miesto príjmu po obehnutí okolo Zeme - takto vzniká ozvena s oneskorením asi 0,13 s; môže byť aj niekoľkonásobná

ŠÍRENIE VKV (nad 30 MHz; pod 10 m)

- Šíri sa len **povrchovými vlnami**
- Od ionosféry sa neodrážajú - prenikajú do medzihviezdneho priestoru
- Odraz od ionosféry môže nastať len v mimoriadnych prípadoch, v obdobi veľkej slnečnej činnosti
- Pretože príjem je možný len v dosahu priamej viditeľnosti, zlepšenie príjmu sa docieli vhodným umiestením VA a PA
- Vlny oblasti VKV sa odrážajú od predmetov, ktoré sú im v ceste, a to tým viac, čím majú kratšiu vlnovú dĺžku - využíva sa to v rádiolokačnej technike (radar)

Témy na zapamätanie

- Zložky elektromagnetického vlnenia (E, H, rýchlosť šírenia, hustota toku energie, intenzita el. poľa)
- Polarizácia elektromagnetického vlnenia (lineárna, kruhová, eliptická, vlastnosti a porovnanie)
- Frekvenčné pásma rádiových vln (využívanie)
- Spôsobý šírenia elektromagnetických vln (delenie spojenia, útlm, ohyb, odraz, lom, typ vln – prízemná, troposférická, ionosférická,...)
- Šírenie elektromagnetického poľa v rôznom prostredí (ideálnom homogénnom dielektriku; homogénnom, polovodivom prostredí; odraz a lom elm. vln; priamych elm. vln vo voľnom priestore)
- Činiteľ tlmenia
- Fresnelove zóny (polomer, plocha, závery,...)
- Šírenie rádiových vln (rozdelenie RV; šírenie DV, SV, KV, VKV; hluché pásmo, ozvena)

Kontrolné otázky

- Ako je umiestnené elm vlnenie vo voľnom priestore vzhľadom na smer šírenia?
- Z akých zložiek sa skladá elm vlnenie vo voľnom priestore?
- Čomu sa rovná rýchlosť šírenia elm vlnenia vo voľnom priestore?
- Akým vzťahom sa vyjadruje rýchlosť šírenia elm vlnenia?
- Čo je polarizácia elektromagnetického vlnenia?
- Aké typy polarizácie elm vlnenie poznáme?
- Ktorú polarizáciu môžeme deliť na vertikálnu a horizontálnu?
- Ako sa mení veľkosť výsledného vektora „ E “ a uhlová rýchlosť „ ω “ pri lineárnej polarizácii?
- Ako sa mení veľkosť výsledného vektora „ E “ a uhlová rýchlosť „ ω “ pri kruhovej polarizácii?
- Ako sa mení veľkosť výsledného vektora „ E “ a uhlová rýchlosť „ ω “ pri eliptickej polarizácii?
- Ako polarizované elm vlnenie si zachováva polarizáciu aj pri prechode ionosférou, čím je zaručené verné sledovanie cieľov?

- Aký charakter majú elm vlny?
- Rozdelenie frekvenčného pásma rádiových vln.
- Príklady komerčného využitia frekvenčného pásma rádiových vln.
- Aké sú spôsoby šírenia elm vln v okolí Zeme?
- Ako sa šíri povrchová vlna?
- Ako rozdeľujeme prízemné vlny a ako sa šíria?
- Aké sú to trposférické a ionosférické vlny a ako sa šíria?
- Aké vlastnosti (δ , ϵ , μ) má ideálne homogénne dielektrikum z hľadiska šírenie elm vln?
- Akú amplitúdu jednotlivých zložiek a fázový posun v smere osi šírenia má elm vlnenie v ideálnom homogénnom dielektriku?
- Aké vlastnosti (δ , ϵ , μ) má homogénne, polovodivé prostredie z hľadiska šírenie elm vln?
- Akú amplitúdu jednotlivých zložiek a fázový posun v smere osi šírenia má elm vlnenie v homogénnom, polovodivom prostredí?
- Kedy dochádza ku totálnemu lomu (uhol lomu $\psi=90^\circ$) pri dopade elm vlnenia na rozhranie dvoch dielektrík?

- Na aké prostredie musí dopadať elm vlna aby došlo k totálnemu odrazu?
- Čo robí činiteľ tlmenia („ W “) s intenzitou elektrického poľa vlny šíriacej sa v reálnom prostredí v porovnaní s intenzitou poľa, ktorá by existovala v ideálnom voľnom priestore?
- Kde sa stráca (dochádza k tlmeniu) energia elm vlnenia pri jej šírení v reálnom prostredí?
- Objem ležiaci vo vnútri, ktorej Fresnelovej zóny hrá rozhodujúcu úroveň pri šírení vlny medzi vysielacou (VA) a prijímacou anténou (PA)?
- Ktorá vlna pri svojom šírení využíva difrakciu (lámanie)?
- Akými vlnami sa šíria „DV“ (15 – 100 kHz; 20 000 – 3000 m)?
- V dôsledku čoho dochádza ku kolísaniu intenzity poľa v mieste príjmu pri šírení „DV“ priestorovými vlnami?
- Akými vlnami sa šíria „SV“ (100 kHz – 1,5 MHz; 3000 – 2000 m)?
- V dôsledku čoho dochádza v noci ku kolísaniu príjmu – úniku intenzity poľa pri šírení „SV“?

- Akými vlnami sa šíria „KV“ (1,5 – 30 MHz; 200 – 10 m)?
- Čím sú spôsobené hluché pásme pri šírení „KV“?
- Akými vlnami sa šíria „VKV“ (nad 30 MHz; pod 10 m)?

Zoznam použitých skratiek a symbolov

■ Skratky:

- el- elektrický
- ELM,elm- elektromagnetický
- mag- magnetický

■ Značky:

- E- elektrická zložka vlnenia
- ε - permitivita
- h- výška
- H- magnetická zložka vlnenia
- φ - fázový posun
- K- činiteľ smerovosti
- μ - permeabilita
- P- výkon
- σ - merná elektrická vodivosť

Ďakujem za pozornosť