

1. Základné vedomosti zo šírenia elektromagnetických vln

Elektromagnetické žiarenie je prenos energie v podobe elektromagnetického vlnenia.

Elektromagnetické vlnenie alebo elektromagnetická vlna je lokálne vzniknutá zmena elektromagnetického poľa, periodický dej, pri ktorom dochádza k priestorovej a časovej zmene vektora intenzity elektrického poľa a súčasne vektora magnetickej indukcie.

Charakteristickou črtou každého bezdrôtového prenosového systému (rádiového, telekomunikačného, dátového, a pod.) je prenos informácie prostredníctvom elektromagnetických vln. Na rozdiel od vysielacích a prijímacích zariadení, prenosová cesta medzi nimi v podstate nezávisí od človeka. Modulácia a vysielanie signálov a ich príjem a demodulácia závisí od konštrukcie zariadení určených na tento účel; podmienky šírenia elektromagnetických vln však závisia od mnohých činiteľov. V každom mieste, čase a frekvenčnom pásme je preto potrebné poznať (aspoň v štatistickom zmysle) podmienky šírenia elektromagnetických vln. Poznanie týchto podmienok prispieva k optimálnemu projektovaniu a využitiu rádiokomunikačných systémov.

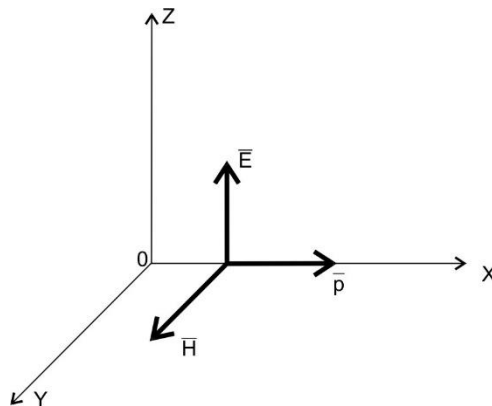
1.1. Zložky elektromagnetického vlnenia

Elektromagnetické vlnenie vo voľnom priestore, v dostatočnej vzdialenosti od zdroja vlnenia, obyčajne považujeme za rovinné. Je to najjednoduchší druh vlnenia a je vždy kolmé na smer šírenia. Takéto vlnenie znázornené na obrázku (Obr. 1.1) sa skladá z elektrickej (E) a magnetickej (H) zložky. Tieto dve zložky sú na seba vždy kolmé a majú v každom bode priestoru rovnakú fázu. Keď zložka elektrického poľa (\vec{E}) v smere osi OZ , zložka magnetického poľa (\vec{H}) v smere osi OY , potom smer osi OX súhlasí so smerom šírenia vlnenia (\vec{p}).

V ľubovoľnom okamihu amplitúdy E a H sú viazané vzťahom

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad , \quad (1.1)$$

kde μ a ε je permeabilita a permitivita prostredia, v ktorom sa vlnenie šíri.



Obr. 1.1: Orientácia vektorov elektrickej a magnetickej zložky elektromagnetického poľa

Rýchlosť šírenia elektromagnetického vlnenia je daná vzťahom

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \quad , \quad (1.2)$$

pričom

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad \text{a} \quad \mu = \mu_r \mu_0$$

kde

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \quad [F/m] \quad \text{a} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [H/m]$$

a ε_r a μ_r a relatívna permitivita a permeabilita prostredia, v ktorom sa vlnenie šíri. Pre vákuum (v našom ponímaní aj pre čistý vzduch) platí

$$Z_0 = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \quad , \quad (1.3)$$

čo je impedancia voľného priestoru (približne 377Ω), ktorú tiež nazývame vlnovou impedanciou. Pre prostredie, ktoré prichádza prakticky do úvahy na šírenie vlnenia, sa $\mu_r = 1$ ale ε_r môže byť rôzne od jednotky ($\varepsilon_r > 1$). Potom amplitúda intenzity magnetického poľa súvisí s amplitúdou intenzity elektrického poľa vzťahom

$$E = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_r}} H \quad . \quad (1.4)$$

Rýchlosť šírenia elektromagnetického vlnenia vo voľnom priestore sa rovná rýchlosti šírenia svetla

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = c \quad . \quad (1.5)$$

Rýchlosť šírenia v inom prostredí ako vo vzduchoprázdne alebo vo voľnom priestore je daná vzťahom

$$v_1 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad , \quad (1.6)$$

kde c je rýchlosť šírenia svetla ($3 \cdot 10^8$ m/s) a ε_r je vždy rovná jednej. Zo vzťahu (1.6) vyplýva, že prechodom rádiovkej vlny do iného prostredia sa mení jej rýchlosť a úmerne tejto, pri nezmenenej frekvencii, sa mení vlnová dĺžka

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad , \quad (1.7)$$

kde λ_0 je vlnová dĺžka vo voľnom priestore (vákuu, vzduchu s permitivitou ε_0) a λ_1 je vlnová dĺžka v prostredí s dielektrickou konštantou ε_r . Napríklad vlnová dĺžka v polyetyléne sa rovná približne 2/3 jej hodnoty vo voľnom priestore. Rýchlosť šírenia je väčšia vo vzduchu ako vo vode, z čoho vyplýva, že aj vlnová dĺžka elektromagnetického vlnenia sa pri prechode zo vzduchu do vody zmení, a to tak, že vo vode bude menšia.

Predpokladajme, že elektromagnetické vlnenie, ktorého zdrojom je žiarič rovnomerne vyžarujúci všetkými smermi, sa šíri v homogénnom prostredí bez tlmenia. Ak výkon vyžiarený takýmto zdrojom označíme P , potom hustotu toku energie prenášanú za 1 s cez jednotkovú plochu kolmú na smer šírenia poľa vo vzdialenosti r od zdroja, za predpokladu, že vyžarovaná energia sa rozdeľuje rovnomerne v priestore, vypočítame podľa

$$S = \frac{P}{4\pi \cdot r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.8)$$

Strednú hodnotu toku energie môžeme vypočítať aj vektorom Poytinga-Umova. Tento vektor je vektor hustoty toku elektromagnetickej energie elektromagnetickej vlny. Jeho veľkosť je úmerná súčinom vektora intenzity elektrického a magnetického poľa, jeho smer je k obidvom vektorom kolmý a súhlasí so smerom šírenia vlny. Ak vyjadríme intenzitu elektrického poľa vo V/m a intenzitu magnetického poľa v A/m potom platí

$$\mathbf{p} = \mathbf{E}_{ef} \mathbf{H}_{ef} \left[\frac{W}{m^2}; \frac{V}{m}; \frac{A}{m} \right] \quad (1.9)$$

kde E_{ef} a H_{ef} sú efektívne hodnoty intenzít poľa. Dosadením za H_{ef} z rovnice (1.4) a za predpokladu, že $\varepsilon_r = 1$, dostaneme pre hustotu toku energie p

$$p = \frac{E_{ef}^2}{120 \cdot \pi} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.10)$$

Porovnaním výrazov (1.8) a (1.10) dostaneme vzťah pre výpočet efektívnej hodnoty intenzity elektrického poľa vo vzdialenosti r od žiariča

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30 \cdot P}}{r} \left[\frac{V}{m} \right] \quad (1.11)$$

V praxi sa väčšinou používajú smerové vyžarovacie sústavy – žiariče. Stupeň smerovosti sa vyjadruje činiteľom smerovosti (ziskom) vzhľadom ku žiariču, ktorý vyžaruje všetkými smermi rovnako. Činiteľ smerovosti K je bezrozmerná veličina, ktorá udáva stupeň sústredenia vyžarovanej energie v určitom smere. Smerová anténa, ktorá vyžaruje výkon P , vytvorí v mieste príjmu tú istú intenzitu poľa ako nesmerová anténa (izotropná), ktorá vyžaruje výkon KP . Použitie smerovej antény zodpovedá K – násobnému zväčšeniu výkonu vyžarovania nesmerovej antény. Potom intenzita poľa vo vzdialenosti r od antény bude

$$E_{ef} = \frac{\sqrt{30 \cdot K \cdot P}}{r} \left[\frac{V}{m} \right] \quad (1.12)$$

Z uvedeného vzorca je zrejmé, že so zväčšovaním vzdialenosti r medzi žiaričom a bodom príjmu klesá intenzita elektromagnetického poľa. Tento pokles je spôsobený rozptylom a útlmom - pohltením rádiových vln. Intenzita elektromagnetického poľa sa okrem výpočtu dá zistiť aj meraním meračmi elektromagnetického poľa. Tieto umožňujú merať pole od niekoľko $\mu\text{V/m}$ do desiatok mV/m vo frekvenčnom rozsahu rádovo od 10^5Hz do 10^8Hz .

Obidve zložky elektromagnetického poľa majú rovnakú energiu, preto je dostatočné určiť veľkosť jednej zložky, aby sme dostali hodnotu druhej. Okrem toho, obidve majú rovnaký účinok na prijímaciu anténu, pokiaľ ide o indukované napätie vo vodiči. Zmeny magnetického toku indukujú napätie v rovine kolmej na

vodič, zmeny elektrického toku v rovine rovnobežnej s vodičom. Intenzita elektrického poľa pre dobrý príjem je odlišná pre príjem rozhlasu a televízie. V mestách s rozvinutým priemyslom a výškovými budovami potrebujeme väčšiu intenzitu poľa ako vo vidieckych oblastiach s malou členitosťou.

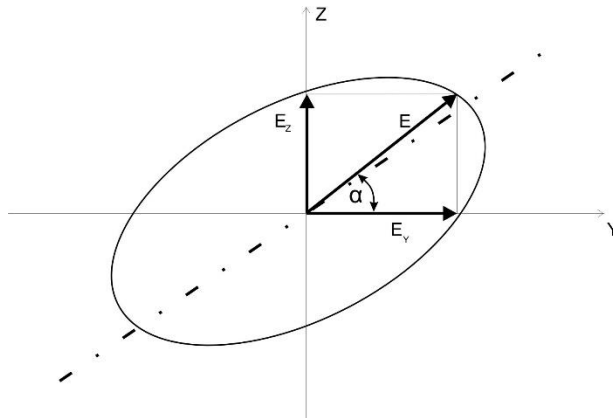
Všetky uvedené vzťahy platia za predpokladu, že zdroj elektromagnetického vlnenia je umiestený v ideálnom homogénnom prostredí, pričom uvažujeme rovinné vlnenie. V skutočnosti anténa vyžaruje guľové vlny, t.j. vlny, pri ktorých plocha rovnakých fáz je guľa a jej stred je v mieste žiariča. Tak ako môžeme považovať malý úsek guľového povrchu zeme za rovinu, môžeme v dostatočných vzdialenostiach od žiariča a v medziach ohraničeného objemu prisúdiť guľovým vlnám charakter rovinných vln.

1.2. Polarizácia elektromagnetického vlnenia

Vlastnosťou priečného vlnenia je jeho polarizovateľnosť. Polarizáciou elektromagnetického vlnenia rozumieme zmenu smeru a veľkosti intenzity elektrickej zložky elektromagnetického poľa v danom bode za jednu periódu. Rozlišujeme tri druhy polarizácie elektromagnetických vln:

- lineárna,
- kruhovú,
- eliptickú.

Elektromagnetické vlnenie vyžiarené žiaričom (napr. anténou), ktoré sa šíri do bodu príjmu, má vzhľadom na povrch zeme horizontálnu a vertikálnu zložku elektromagnetického vlnenia. Tieto dve zložky, schematicky znázornené na obrázku (Obr. 1.2), prechádzajú pri šírení vlnenia rôznym prostredím, takže v mieste príjmu sa líšia veľkosťou amplitúdy a fázy.



Obr. 1.2: Polarizácia elektromagnetického vlnenia (α - fáza, E - amplitúda)

1.2.1. Lineárna polarizácia

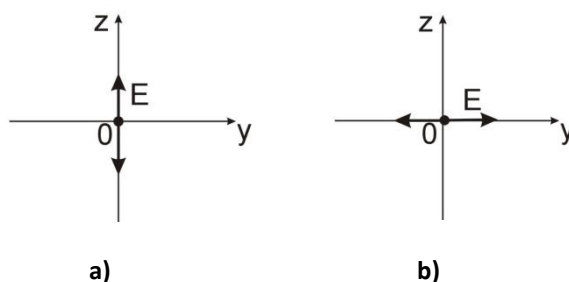
Elektromagnetické vlnenie je lineárne polarizované vtedy, keď výsledný vektor intenzity elektrickej zložky elektromagnetického poľa má konštantnú orientáciu (fázu), ale jeho veľkosť sa periodicky mení s uhlovou rýchlosťou ω . Veľkosť vektora je vyjadrená vzťahom

$$E = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} \cos \omega t \quad . \quad (1.13)$$

Veľkosť uhla α , ktorým je určená orientácia výsledného vektora je konštantná

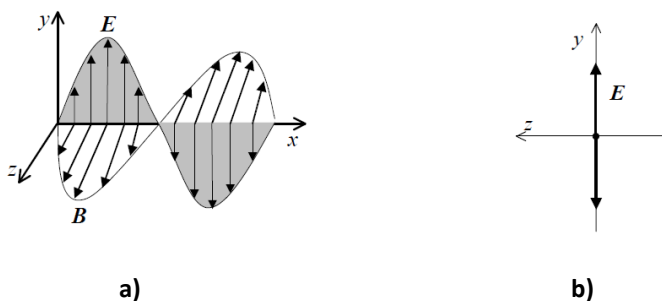
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E_z}{E_y} = \text{konštantna} \quad . \quad (1.14)$$

Ak má lineárne polarizované vlnenie len vertikálnu zložku ($E_y = 0$), hovoríme, že vlnenie je vertikálne polarizované (Obr. 1.3a). Ak má lineárne polarizované vlnenie len horizontálnu zložku ($E_z = 0$), hovoríme o horizontálne polarizovanom vlnení (Obr. 1.3b). Lineárna polarizácia sa používa v prípadoch, keď sa vzájomná poloha vysielačej a prijímacej antény nemení.



Obr. 1.3: a) Vertikálna a b) horizontálna polarizácia elektromagnetického vlnenia (E - amplitúda)

Z pohľadu roviny kmitov je rovinná elektromagnetická vlna lineárne polarizovaná, ak kmity vektora intenzity elektrického poľa sú v rovine určenej smerom šírenia vlnenia a smerom polarizácie. Túto rovinu voláme rovina kmitov. Na obrázku (Obr. 1.4a,b) je v dvoch pohľadoch zobrazená lineárne polarizovaná elektromagnetická vlna, ktorej rovina kmitov je rovina xy. Zobrazenie na obrázku (Obr. 1.4b) je pohľad z hľadiska pozorovateľa, ku ktorému elektromagnetická vlna „prichádza“.



Obr. 1.4: Lineárne polarizovaná elektromagnetická vlna (E - amplitúda)

1.2.2. Kruhová polarizácia

Elektromagnetické vlnenie je kruhovo polarizované vtedy, ak sú amplitúdy horizontálnej a vertikálnej zložky vektora E rovnaké a mení sa len ich fáza, pričom veľkosť výsledného vektora sa nemení

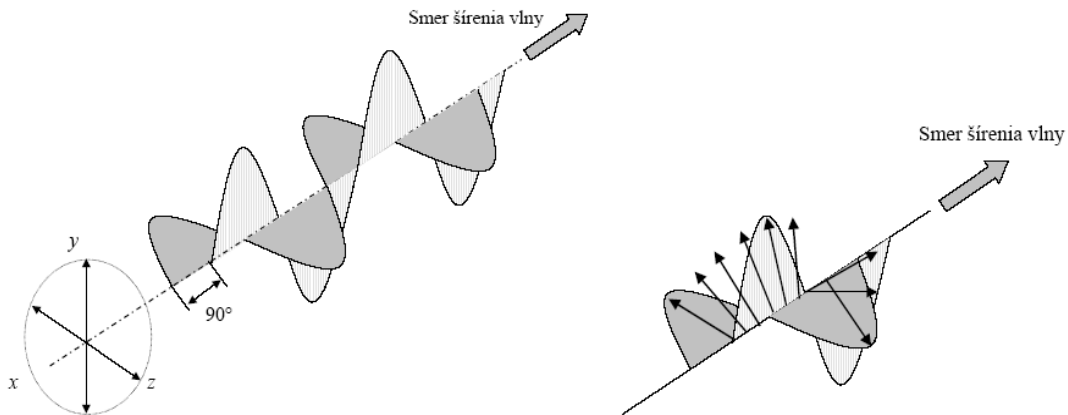
$$E = \sqrt{E_y^2 + E_z^2} = \text{konštantna} \quad . \quad (1.15)$$

Uhol α , ktorým je určená orientácia výsledného vektora sa mení s rýchlosťou ω

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E_z}{E_y} = \operatorname{tg} \omega t \quad . \quad (1.16)$$

Pre optické javy, videnie a interakciu elektromagnetického vlnenia s prostredím vôbec, je najvýznamnejšie elektrické pole a vektor \mathbf{E} . Pod rovinou kmitov elektromagnetického vlnenia preto rozumieme rovinu určenú vektorom \mathbf{E} a smerom šírenia vlnenia (\vec{p}). Ak koncový bod vektora \mathbf{E} opisuje v šíriacej sa vlne kružnicu, hovoríme, že vlnenie je kruhovo polarizované. Kruhovo polarizované vlnenie je vytvorené superpozíciou dvoch lineárne polarizovaných kolmých rovinných vlnení rovnakej amplitúdy fázovo posunutých o $\pi/2$ (Obr. 1.5).

Kruhovo polarizované elektromagnetické vlnenie si zachováva polarizáciu aj pri prechode ionosférou, čím je zaručené verné sledovanie cieľov. Kruhovú polarizáciu sa používa v prípadoch, keď sa vzájomná poloha vysielačej a prijímacej antény mení.



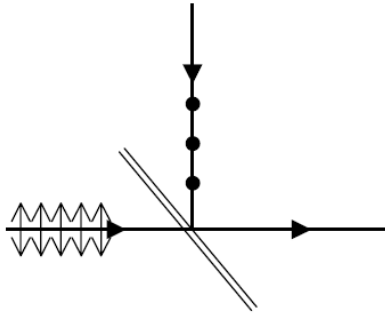
Obr. 1.5: Kruhovo polarizovaná elektromagnetická vlna

1.2.3. Eliptická polarizácia

Elektromagnetické vlnenie je elipticky polarizované vtedy, ak vektor výsledného elektrického poľa opisuje svojím koncom elipsu, t.j. veľkosť vektora \mathbf{E} a jeho fáza α sa periodicky menia s rýchlosťou ω . Eliptická polarizácia sa používa pre svoje výhody vtedy, keď sa mení vzájomná poloha vysielačej alebo prijímacej antény (napr. pri sledovaní družíc, rádiolokácii, rádionavigácii a pod.). Pri rovnosti polos elipsy sa mení eliptická polarizácia na kruhovú a pri neobmedzenom znižovaní malej polosi na lineárnu polarizáciu.

1.2.4. Vytváranie polarizácie elektromagnetického vlnenia

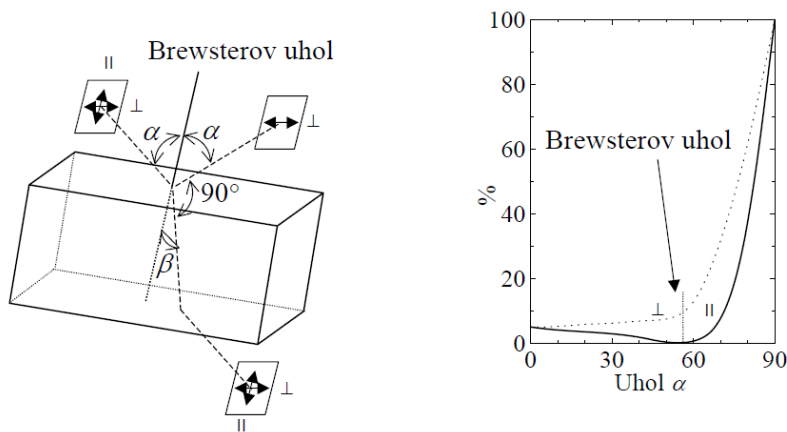
Kruhovo, resp. elipticky polarizované vlnenie získame pomocou polopriepustného zrkadla, na ktoré dopadajú dve navzájom kolmé lineárne polarizované vlnenia (Obr. 1.6).



Obr. 1.6: Skladanie dvoch lineárne polarizovaných vlnení

Elektromagnetické vlnenie od bežných zdrojov, napr. svetlo žiarovky, slnka, plameňa nie je polarizované. Vektor E je v každom mieste kolmý na smer šírenia elektromagnetického vlnenia, ale je orientovaný náhodne. Veľký význam má polarizácia elektromagnetického vlnenia v optickej oblasti. Polarizovane je vysielaný napr. tiež televízny signál rôznych vysieláčov, a to v horizontálnej alebo vo vertikálnej rovine.

Lineárne polarizovanú vlnu môžeme získať polarizáciou a to odrazom a lomom, dvojlomom, alebo polarizačnými filtermi (polaroidmi). Pri odraze je odrazený lúč úplne polarizovaný a vektor intenzity elektrického poľa kmitá v rovine kolmej na rovinu dopadu ak uhol medzi lomeným a odrazeným lúčom je $\pi/2$ (Obr. 1.7).



Obr. 1.7: Polarizácia odrazom

Pre uhol dopadu zo Snellovho zákona potom platí $\text{tg } \alpha = N_2/N_1$, kde N_i sú absolútne indexy lomu. Pri polarizácii dvojlomom sa využíva rôzny index lomu anizotropických kryštálov pre svetlo polarizované v rôznych smeroch. Vhodnou úpravou tvaru lámavého hranola dosiahneme, že kryštálom prejde iba lineárne polarizované svetlo. Významné praktické využitie majú polaroidy. Polaroidy sú fólie zo špeciálneho plastu zloženého z dlhých orientovaných molekúl. Ak na orientované makromolekuly dopadá elektromagnetická vlna potom sa v polarizátore absorbuje tá časť elektromagnetických vln, v ktorých vektor intenzity elektrického poľa kmitá v smere molekulového reťazca. Elektromagnetické vlny, v ktorých vektor elektrickej intenzity kmitá v rovine kolmej na molekulový reťazec polaroidom prechádzajú. Tento smer označíme ako smer polarizácie.

Zamerajme sa teraz na intenzitu prejdeného elektromagnetického vlnenia. Nech na polaroid (Obr. 1.7) dopadá nepolarizované elektromagnetické vlnenie. Všetky chaoticky orientované vektory elektrickej intenzity dopadajúceho vlnenia môžeme rozdeliť na dve navzájom kolmé zložky a to v smere polarizácie a v smere kolmom. Polarizátorom prejde z nich iba jedna zložka a intenzita prejdeného svetla je vyjadrená vzťahom.

$$I = \frac{1}{2} I_0 . \quad (1.17)$$

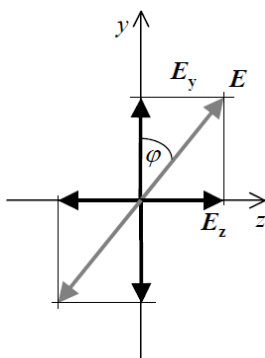
Nech polarizátor je orientovaný tak, že ním prechádza elektromagnetické vlnenie, ktorého vektor elektrickej intenzity kmitá v smere osi y. Nech smer osi y je smer polarizácie polaroidu. Ak na takýto polarizátor dopadá lineárne polarizované vlnenie a to tak, že rovina kmitov zvierá so smerom polarizácie polaroidu určitý uhol φ (Obr. 1.8) potom vektor elektrickej intenzity dopadajúceho vlnenia môžeme podľa obrázka (Obr. 1.8) rozložiť na zložku rovnobežnú so smerom polarizácie a zložku na tento smer kolmú.

Polaroidom prejde iba zložka rovnobežná so smerom polarizácie pre ktorú platí

$$E_z = E \cos \varphi . \quad (1.18)$$

Intenzita prejdeného vlnenia je úmerná druhej mocnine amplitúdy elektrickej intenzity a pre intenzitu vlnenia prejdeného polarizátorom v tomto prípade dostávame

$$I = I_0 \cos^2 \varphi . \quad (1.19)$$



Obr. 1.8: Prechod lineárne polarizovaného vlnenia polaroidom

Praktické využitie má polarizácia napr. aj v chemickej analýze. Niektoré molekuly stáčajú rovinu polarizovaného svetla. Látky ktoré stáčajú rovinu polarizovaného svetla sa volajú opticky aktívne. Uhol otočenia je úmerný koncentrácii opticky aktívnej zlúčeniny v roztoku, ktorým polarizované svetlo prechádza. Polarimetria sa používa v rôznych odboroch potravinárskeho priemyslu na stanovenie cukrov, laktózy, glukózy, škrobu, atď. V bežnom živote sú používané polarizačné okuliare, ktoré znižujú intenzitu svetla odrazeného od mokrej vozovky (je odrazom čiastočne polarizované) a znižujú tak osvetlenie od protiidúcich vozidiel.

1.3. Frekvenčné pásma rádiových vln

Do priestoru je možné vyžiariť elektromagnetické vlny vo veľkom frekvenčnom rozsahu (rozsahu vlnových dĺžok), čomu zodpovedá aj veľký počet žiaričov (antén).

Tab. 1.1: Rozdelenie rádiových vln

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

Pomer najväčších a najmenších frekvencií používaných vo všeobecnosti v praxi je približne 10^{10} . V dôsledku veľmi veľkej šírky frekvenčného pásma sú veľké rozdiely vo vlastnostiach používaných elektromagnetických vln. V praxi sa používa nasledovné rozdelenie rádiových elektromagnetických vln podľa frekvencie, resp. vlnovej dĺžky (Tab. 1.1).

Elektromagnetické vlny sú vo fyzike charakterizované vlastnosťami vlnovými a kvantovými (duálny charakter elektromagnetickej vlny). Za vlnové vlastnosti považujeme odraz, lom, ohyb, interferenciu a polarizáciu vln. Za kvantovú vlastnosť považujeme napr. predstavu fotónu, ktorý vyvoláva fotoelektrické javy.

Využitie rôznych vlnových dĺžok elektromagnetického vlnenia je väčšinou viazané na vlastnosti vln z hľadiska možnosti ich generovania (vysielania), vlastností ich šírenia, možnosti ich zachytenia, alebo napr. ich prípadných účinkov.

Za **rádiové vlny** považujeme vlny od dĺžky 1000 m do dĺžky 0,1 m, (od DV do UKV), na ktorých sa šíria, okrem iných služieb i pozemný (terestriálny) rozhlas a televízia. Pásma mikrovln 3 ÷ 300 GHz sú rovnako používané pre verejnú rozhlasovú službu, avšak len vo veľmi úzko vymedzených kmitočtových pásmach. Rádiové vlny sú generované v rádiových vysielачoch, ktoré v elektronických obvodoch vytvoria signál potrebnej frekvencie, namodulujú na tento signál prenášanú informáciu a signál s potrebným výkonom vyšlú pomocou vysielacej antény. Dlhé vlny sa šíria do veľkých vzdialeností po zemskom povrchu. Krátke vlny sa odrážajú od ionosféry (začína vo výške 60 ÷ 80 km nad zemským povrchom, obsahuje určité množstvo molekúl vzduchu rozštiepených na ióny a voľné elektróny, takže sa chová podobne ako vodivá

plocha. Stav ionosféry sa mení vplyvom slnečného žiarenia, takže sa mení aj podmienky šírenia krátkych vln v rôznych denných a nočných dobách). Krátke vlny majú vďaka ionosférickým odrazom veľký dosah. Veľmi krátke vlny sa používajú k prenosu televízneho signálu a zahŕňajú tiež pásmo rozhlasového vysielania FM. Veľmi krátke a ultra krátke vlny vyžadujú priamu viditeľnosť medzi vysielačom a prijímačom, a pokiaľ sú zachytené mimo viditeľnosť, jedná sa o vlny odrazené od prekážok s veľkým rizikom interferencií medzi rôzne odrazenými vlnami. V centre záujmu súčasných komunikačných technológií je pásmo na hornom okraji UKV a pásmo mikrovln.

Mikrovlny v pásme medzi rádiovými vlnami a infračerveným žiarením plní okrem komunikačných úloh tiež úlohu tepelného zdroja. Mikrovlnové žiarenie môže rozkmitávať molekuly vody a organických štruktúr, čo sa využíva napr. v mikrovlnnej rúre alebo v termoterapii v medicíne (mikrovlnná deštrukcia nežiaducich tkanív). Kratšie vlnové dĺžky sú spojené s tak vysokými frekvenciami, že k ich generovaniu sa nedá vytvoriť elektronický obvod, ktorý by generoval elektrický signál príslušnej frekvencie. Zdrojom vln sú fyzikálne pochody v rôznych materiáloch a technologických štruktúrach, a to bežne dostupných (zohriate železo) i vysoko špeciálnych (polovodičový laser).

Infračervené (IR infrared) žiarenie alebo tepelné žiarenie je podstatou šírenia tepla žiarením, a to aj vákuom (napr. aj povrch Zeme je zohrievaný infračerveným slnečným žiarením). Zdrojom IR žiarenia je každé teleso, ktoré má teplotu vyššiu ako je absolútna nula. Pôvodom IR žiarenia sú zmeny elektromagnetického poľa vyvolané pohybom molekúl. Pohyb molekúl závisí na teplote. Preto telesá zohriate na vyššiu teplotu sú zdrojom silnejšieho IR žiarenia ako chladnejšie telesá. IR žiarenie nie je viditeľné okom, preniká hmlou a znečisteným ovzduším, pomocou vhodných prístrojov (infrakamier) je ich možné zachytiť, aj keď ho v tme okom nevnímame. Pri pohlcovaní IR žiarenia vzniká tepelná odozva - energia elektromagnetického vlnenia sa mení na teplo v ožiarenom telese. Praktické aplikácie zahŕňajú: videnie v hmlie, infralokátory, okuliare pre nočné videnie (je možné pozorovať v úplnej tme ľudské telo, ktoré vyžaruje IR žiarenie), videokamery pre nočné natáčanie, kedy ako osvetlenie slúžia IR žiariče, okom vnímame tmú, ale kamera zachytí osvetlené predmety. Preto sa v diaľkových ovládačoch neruší rádiový signál a zároveň ho nevnímame. Infražiariče slúžia tiež k vykurovaniu (infrasauna, atď.).

Viditeľné svetlo môže byť zložené z množstva vln o rôznych vlnových dĺžkach. Ide o svetlo chromatické, napr. biele svetlo môže byť zložené z troch základných farieb, ale tiež môže mať takmer spojité spektrum s veľmi veľkým počtom zložiek. V prípade, že ide o svetlo monochromatické, tak je žiarenie nesené jednou vlnovou dĺžkou. Typickým zdrojom monochromatického svetla je laser. Pri svetle rozoznávame jeho intenzitu a farbu, ktorá závisí na vlnových dĺžkach obsiahnutých v svetle. Svetelné spektrum je časť elektromagnetického spektra, v ktorom je zobrazená závislosť farieb svetla na vlnových dĺžkach: stredné vlnové dĺžky sa uvádzajú nasledovne: červená (650 nm), oranžová (600 nm), žltá (580 nm), zelená (525 nm), modrá (450 nm), fialová (400 nm).

Ultrafialové žiarenie. Zdrojom tohto typu svetla sú telesá zohriate na veľmi vysokú teplotu: slnko, výbojky, elektrický oblúk (zváranie). Spôsobuje zhnednutie kože a produkciu vitamínu D, vo vyšších dávkach rakovinu kože, ničí mikroorganizmy. Vyvoláva luminiscenciu (pri dopade na luminofóry sa mení na viditeľné svetlo), je pohlcované obyčajným sklom.

Röntgenové žiarenie (lúče X). Röntgenové žiarenie vzniká zmenami elektromagnetického poľa v atómovo obale, čo sa dá vyvolať vo vákuovej elektrónke bombardovaním kovového povrchu zväzkom elektrónov. Je pohlcované v závislosti na protónovom čísle a v závislosti na hrúbke látky. To je využité v medicínskej röntgenológii a v defektoskopii materiálov.

Gama žiarenie. Zdrojom vlnenia sú zmeny elektromagnetického poľa pri jadrových reakciách. Podobne ako röntgenové žiarenie je pohlcované podľa štruktúry - používa sa v defektoskopii. Spôsobuje genetické zmeny, chorobu z ožiarenia (po genetických zmenách buniek môže dôjsť k rakovinovému bujneniu buniek).

Pre príklad uvádzame niektoré frekvencie a frekvenčné pásma využívané v rôznych aplikáciách a službách:

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, len 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

1.4. Spôsoby šírenia elektromagnetických vln

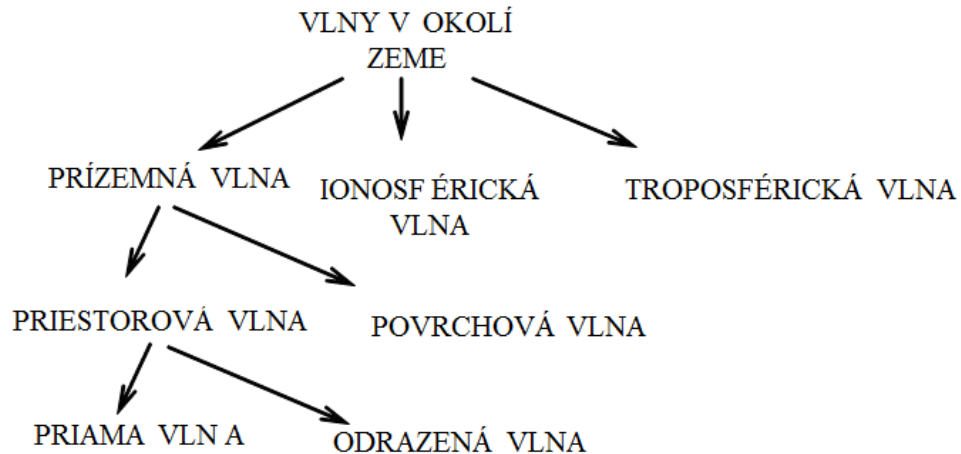
Elektromagnetické vlny môžeme klasifikovať s uvážením charakteru dráhy, po ktorej sa šíria od vysielača k prijímaču. V závislosti od polohy bodov v priestore, medzi ktorými sa uskutočňuje spojenie, môžeme rozlíšiť tri prípady:

Zem – Zem (obidva body sa nachádzajú na Zemi);

Zem - kozmický priestor(jeden z bodov je na Zemi, druhý v kozmickom priestore);

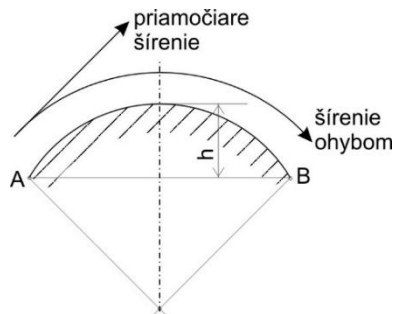
kozmicke priestor – kozmicke priestor (obidva body sa nachádzajú v kozmickom priestore).

V prvom prípade ide o šírenie elektromagnetických vln v prítomnosti Zeme, ďalšie dva prípady možno považovať v prvom priblížení za šírenie elektromagnetických vln vo voľnom priestore. Pritom sa však treba uvedomiť, že elektromagnetická vlna vyžiarená zo Zeme do medziplanetárneho priestoru prechádza cez atmosféru Zeme a okrem toho medziplanetárny priestor má skôr charakter plazmy než ideálneho vákuu. Rozdelenie spôsobov šírenia rádiových vln je znázornené na obrázku (Obr. 1.9).



Obr. 1.9: Rozdelenie spôsobov šírenia

V homogénnom a izotropnom prostredí sa šíria elektromagnetické vlny konštantnou rýchlosťou po priamočiarych trajektóriách. Prítomnosť Zeme a zvláštnosti zloženia atmosféry pôsobia na šírenie elektromagnetických vln dvojakým spôsobom. Tam, kde sa elektromagnetická vlna dotýka polovodivého povrchu Zeme, skresľuje sa štruktúra vlny, čo je príčinou vzniku tlmenia. Guľový tvar povrchu spôsobuje ohyb (difrakciu) dráhy šírenia vlny okolo zemského povrchu (Obr. 1.10). Difrakcia vlny nastane vtedy, keď sú rozmery prekážky rádovo rovnaké ako dĺžka vlny.

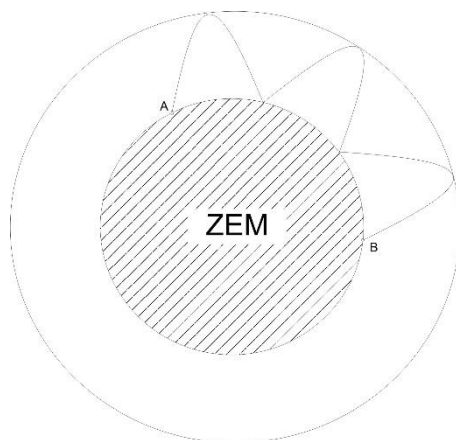


Obr. 1.10: Šírenie elektromagnetického vlnenia ohybom

Pri šírení vlnenia nad zemou za takúto prekážku môžeme považovať výšku „h“ guľovej výseče obmedzenej rovinou preloženou tetivou „AB“. Elektromagnetické vlny, ktorých vlnová dĺžka je menšia ako výška „h“, nie sú podrobené ohybu a šíria sa priamočiarno. Keď vlnová dĺžka vlnenia je porovnateľná s výškou „h“, šíria sa tak, že sledujú povrch zeme. Pomocou povrchových elektromagnetických vln nemožno ani za najpriaznivejších podmienok dosiahnuť väčšiu vzdialenosť spoja ako 4000 km. Vlny, ktoré sa šíria v blízkosti zemského povrchu a ktoré sa ohýbajú okolo neho vplyvom difrakcie, nazývame **povrchovými** elektromagnetickými vlnami.

Šírenie elektromagnetických vln na väčšie vzdialenosti je ovplyvnené najmä ionizovanými vrstvami atmosféry. Celý proces šírenia vlnenia sa odohráva podľa zákonov odrazu a lomu od ionizovanej oblasti

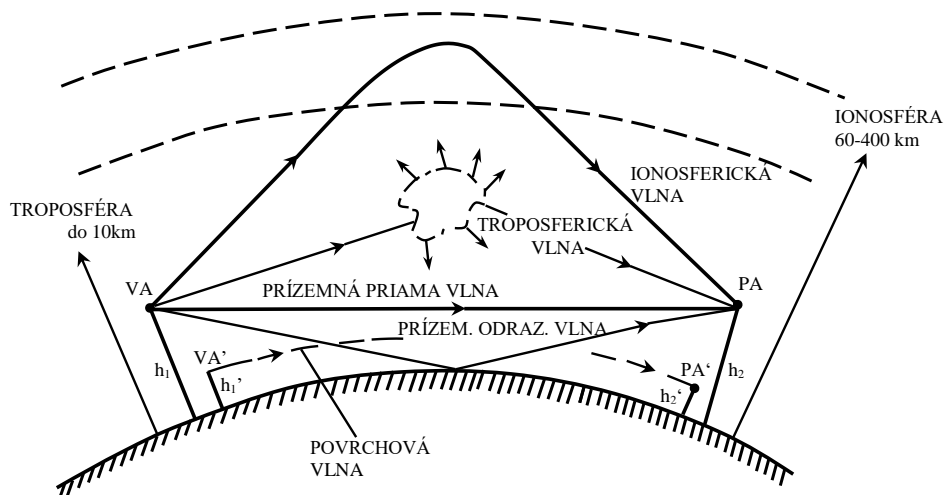
(ionosféra: 60-400 km). Následkom mnohonásobného odrazu vln od ionosféry a od Zeme, môže vlnenie dosiahnuť veľmi vzdialené body (B) na povrchu Zeme, dokonca za priaznivých podmienok obehnúť niekoľkokrát okolo Zeme. Vlny, ktoré sa šíria na veľké vzdialenosti a ohýbajú sa okolo zeme následkom jednoduchého alebo mnohonásobného odrazu od ionosféry alebo touto prenikajú, sa nazývajú **priestorové** (Obr. 1.11).



Obr. 1.11: Šírenie elektromagnetického vlnenia mnohonásobným odrazom

Na obrázku (Obr. 1.12) sú schematicky znázornené rôzne spôsoby šírenia sa elektromagnetických vln v okolí Zeme. Vlny šíriace sa v blízkosti povrchu Zeme sa nazývajú prízemné vlny. **Prízemné vlny** delíme na vlny povrchové a vlny priestorové. Povrchová vlna je vyžarovaná vysielačou anténou umiestnenou bezprostredne nad povrchom Zeme a šíri sa pozdĺž tohto povrchu. Priestorová vlna sa vyskytuje hlavne v prípade veľmi krátkych vln, keď antény (vďaka svojim malým rozmerom) sú umiestnené relatívne vysoko nad zemským povrchom. Priestorové vlny s väčšou vlnovou dĺžkou sa používajú pri spojeniach medzi Zemou a lietadlom. Priestorové vlny ďalej delíme na vlny priame a vlny odrazené od zemského povrchu. V prípade, že vysielač i prijímač je umiestnená na povrchu Zeme, priame a odrazené vlny majú rovnakú amplitúdu, ale opačnú fázu, preto sa navzájom rušia. Prízemná vlna sa potom šíri ako vlna povrchová. Ionosférickými vlnami nazývame vlny, ktoré dosiahnu prijímač vďaka refrakcii (lomu) v troposfére.

Intenzita elektrického poľa elektromagnetickej vlny ako i jej fáza a smer v mieste príjmu sú výsledkom vlastností priestoru, cez ktorý táto vlna prešla. Výsledná intenzita elektrického poľa v mieste príjmu závisí od fáz, amplitúd a polarizácii jej jednotlivých zložiek, ktoré sa môžu šíriť rôznymi spôsobmi. Môže napr. nastať prípad, že na prijímaciu anténu dopadajú dve elektromagnetické vlny s relatívne veľkými intenzitami, ale fázový posun medzi nimi je približne 180° , v dôsledku čoho intenzita výsledného poľa je veľmi malá. Výsledné pole sa pritom môže meniť s časom, ak jedna zo zložiek mení s časom svoju amplitúdu alebo polarizáciu. Zmeny intenzity poľa v mieste príjmu spôsobuje vznik únikov. Únikom nazývame veľké zníženie úrovne signálu vzhľadom na jeho strednú hodnotu.



Obr. 1.12: Šírenie elektromagnetického vlnenia v okolí Zeme

Troposférická vlna (Obr. 1.12) sa šíri na veľké vzdialenosti (až 1000 km) troposférickým rozptylom a troposférickým vlnovodom. Patria sem vlny kratšie ako 10 m (VKV, UKV) a šírenie je ovplyvnené vlastnosťami ionosférických vrstiev.

Ionosférická vlna (Obr. 1.12) sa šíri na veľké vzdialenosti jedným alebo viacerými odrazmi od ionosféry (vlny dlhšie ako 10 m – 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.

1.5. Šírenie elektromagnetických vln v rôznom prostredí

1.5.1. Šírenie v ideálnom homogénnom dielektriku

Vlastnosti prostredia (ideálne homogénne dielektrikum) z hľadiska šírenia elektromagnetického vlnenia charakterizujú nasledovné parametre:

merná elektrická vodivosť $\sigma = 0$,

dielektrická konštanta (permitivita) $\varepsilon = \text{konštanta}$,

permeabilita $\mu_r = \mu_0$.

Za takéto dielektrikum môžeme považovať spodné vrstvy zemskej atmosféry, ktorých relatívna dielektrická konštanta $\varepsilon_r = 1$. Rýchlosť šírenia vlnenia v takomto prostredí je daná vzťahom (1.6). Ako sme už spomenuli, guľové vlnenie sme nahradili rovinným, preto elektrické a magnetické pole bude mať len jednu zložku, ostatné sa rovnajú nule.

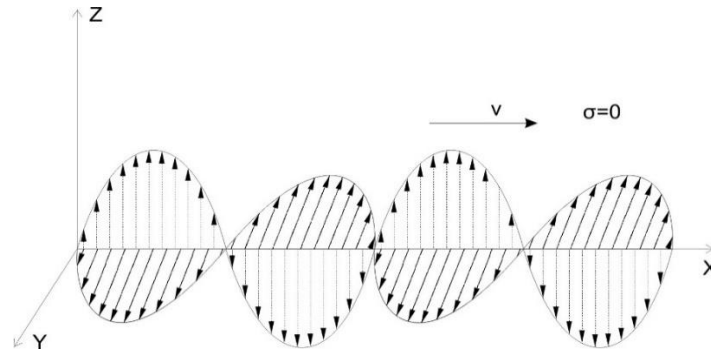
Zložky elektrického a magnetického poľa rovinnej vlny môžeme vyjadriť rovnicami

$$\mathbf{E}_z = \mathbf{E}_m \cos \omega \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad , \quad (1.20)$$

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

(1.21)

Vzájomná orientácia vektorov \mathbf{E} a \mathbf{H} je kolmá, smer šírenia je daný kladným smerom osi x , fázový posun v smere osi šírenia je nulový a amplitúda jednotlivých zložiek je, konštantná. Rovnice (1.20) a (1.21) nám umožňujú vyjadriť v určitom časovom okamihu, vzťah medzi vektorom elektrického a magnetického poľa. Grafické vyjadrenie vzájomného vzťahu elektrického a magnetického poľa rovinatej vlny v ideálnom dielektriku je na obrázku (Obr. 1.13). Argument $(t + x/v)$ v rovniciach (1.20) a (1.21) vyjadruje periodickú zmenu rovinatej vlny.



Obr. 1.13: Elektrické a magnetické pole rovinatej vlny v ideálnom dielektriku

1.5.2. Šírenie v homogénnom polovodivom prostredí

S takýmto prípadom šírenia elektromagnetického vlnenia sa stretávame pri preniknutí vlnenia do morskej vody alebo do zemského povrchu. Okrem toho aj horné ionizované vrstvy atmosféry majú takéto vlastnosti. Polovodivé prostredie s parametrami:

merná el. vodivosť $\sigma \neq 0$,

permeabilita μ ,

dielektrická konštanta (permitivita) $\epsilon = n - jp$,

sa správa vzhľadom na elektromagnetické vlnenie, ktoré sa v ňom šíri, ako dielektrikum s komplexnou hodnotou dielektrickej konštanty $\epsilon = n - jp$. Reálna zložka (n) tejto dielektrickej konštanty ovplyvňuje rýchlosť šírenia vlnenia a imaginárna zložka (p) veľkosť amplitúdy.

Zložky elektrického a magnetického poľa rovinatej vlny môžeme pre tento prípad vyjadriť rovnicami

$$E_z = E_m e^{-\delta x} \cos \omega \left(t + \frac{x}{v} \right) \quad , \quad (1.22)$$

$$H_y = H_m e^{-\delta x} \cos \left[\omega \left(t + \frac{x}{v} \right) - \varphi \right] \quad . \quad (1.23)$$

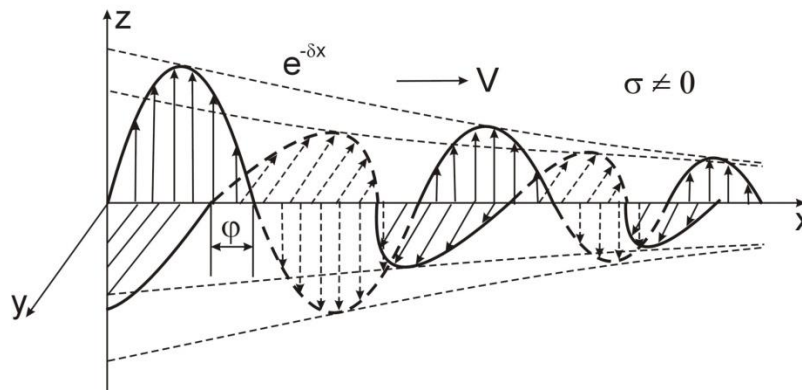
V týchto rovniciach δ je konštanta útlmu, ktorej veľkosť je ovplyvnená imaginárnou zložkou dielektrickej konštanty

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} p \quad . \quad (1.24)$$

Rýchlosť šírenia v je číselne ovplyvňovaná reálnou zložkou dielektrickej konštanty

$$v = \frac{c}{n} \quad . \quad (1.25)$$

Výraz $e^{-\delta x}$ v rovniciach (1.22) a (1.23) vyjadruje, že amplitúda elektrickej a magnetickej zložky poľa exponenciálne klesá. Rýchlosť šírenia v sa líši od rýchlosti šírenia v ideálnom dielektriku. Magnetické pole je fázovo posunuté oproti elektrickému poľu o uhol φ . Priebeh elektrickej a magnetickej rovinnej elektromagnetickej vlny pri šírení v polovodivom prostredí je znázornený na obrázku (Obr. 1.14). Útlm rádiových vln v polovodivom prostredí stúpa s frekvenciou, preto sú najdlhšie vlny najvýhodnejšie pre rádiové spojenia v takomto prostredí.



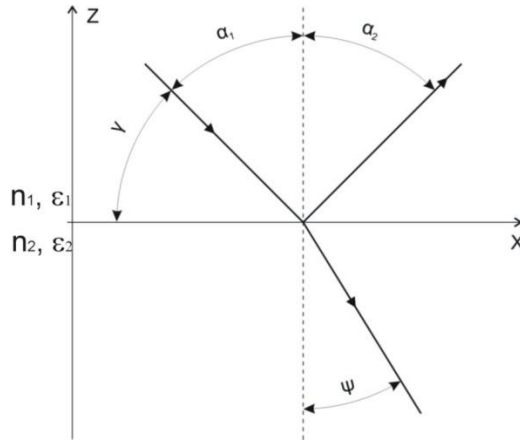
Obr. 1.14: Elektrické a magnetické pole rovinnej vlny v polovodivom prostredí

1.5.3. Odraz a lom elektromagnetických vln

Odraz elektromagnetického vlnenia nastáva hlavne pri krátkych a veľmi krátkych vlnách, pri prechode vlnenia z prostredia s dielektrickou konštantou ε_1 do prostredia s dielektrickou konštantou ε_2 .

a) Odraz a lom elektromagnetického vlnenia na rozhraní dvoch dielektrík, ak merná elektrická vodivosť $\sigma = 0$.

Keď dopadne elektromagnetické vlnenie na rozhranie dvoch dielektrík pod určitým uhlom α_1 časť vlnenia sa odrazí pod uhlom α_2 , časť preniká do nového média pod uhlom ψ - láme sa (Obr. 1.15).



Obr. 1.15: Odraz a lom na rozhraní dvoch dielektrík

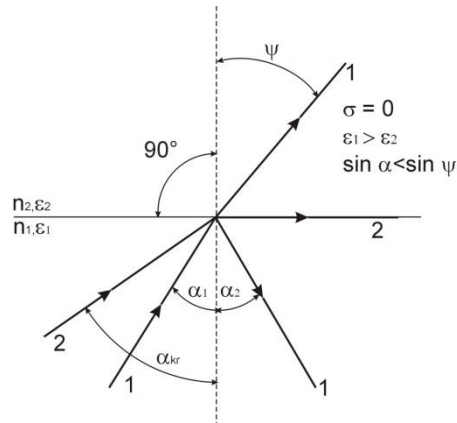
Podľa známeho zákona odrazu, uhol dopadu sa rovná uhlu odrazu, čiže $\sin \alpha_1 = \sin \alpha_2$, pričom obidva uhly ležia v tej istej rovine. Časť vlnenia, ktoré prechádza do iného média, mení svoj smer. Ak α_1 je uhol dopadu a ψ uhol lomu a ak predpokladáme, že vlnenie prechádza z jedného média, kde má vlnenie rýchlosť šírenia v_1 , do druhého s rýchlosťou šírenia v_2 , potom platí vzťah

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \psi} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_1}}}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_2}}} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.26)$$

Rovnica (1.26) je totožná so Snellovým zákonom lomu známym z optiky. Pomer rýchlostí vlnenia v rôznych dielektrikách alebo pomer odmocnín dielektrických konštánt je relatívny indexu lomu.

Ak vstupuje elektromagnetické 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 elektromagnetické vlnenie z prostredia s väčšou dielektrickou konštantou do prostredia s menšou dielektrickou konštantou ($\epsilon_2 < \epsilon_1$), vlnenie sa láme od kolmice, a teda $\sin \alpha_1 < \sin \psi$. $\sin \psi$ môže nadobudnúť najviac hodnotu 1, keď $\psi = 90^\circ$. Tomuto uhlu lomu prislúcha v prostredí s väčšou dielektrickou konštantnou uhol α_{kr} , ktorý sa nazýva kritický alebo medzný uhol

$$\sin \alpha_{kr} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.27)$$



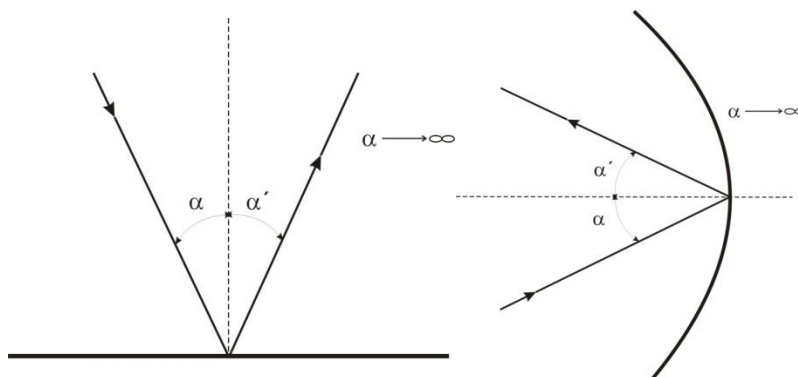
Obr. 1.16: Úplný odraz na rozhraní dvoch prostredí

Ak sa tento uhol prekročí, žiadne vlnenie neprenikne rozhraním a všetka energia sa odrazí (Obr. 1.16).

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

b) Odraz elektromagnetického vlnenia dokonale vodivého prostredia (merná elektrická vodivosť $\sigma \rightarrow \infty$).

Pre dokonale vodivé prostredie merná elektrická vodivosť $\sigma \rightarrow \infty$. Z toho vyplýva, že energia dopadajúcej vlny nepreniká do druhého prostredia, pretože v dokonalom vodivom prostredí sa nemôžu vlny šíriť. Nastáva odraz. Odrazové plochy môžu byť rovinné alebo sférické (Obr. 1.17). Podľa zákona odrazu uhol dopadajúcej vlny sa rovná uhlu odrazenej vlny. 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. 1.17: Odraz od rovinných a sférických vodivých povrchov

1.5.4. Šírenie elektromagnetických vln vo voľnom priestore

Skúmame šírenie elektromagnetických vln vo fiktívnom prostredí, tzv. voľnom priestore

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

(1.28)

Umiestnime v tomto priestore izotropne (t.j. všesmerovo) vyžarujúcu anténu. Prostredie má nulové tlmenie. Ak výkon vyžarovania anténou označíme P , potom hustotu výkonu vo vzdialenosti R od antény možno vyjadriť vzťahom

$$S = \frac{P}{4\pi R^2} \quad (1.29)$$

Na druhej strane môžeme modul strednej hodnoty Poyntingovho vektora vyjadriť pomocou amplitúdy intenzity elektrického poľa šíriacej sa vlny

$$S = \frac{E^2}{2Z_0} = \frac{E^2}{240\pi} \quad (1.30)$$

Porovnaním vzťahov (1.29) a (1.30) môžeme určiť amplitúdu intenzity elektrického poľa, ktoré vytvorí vo vzdialenosti R izotropný žiarič vyžarujúci výkon P

$$E = \frac{\sqrt{60P}}{R} \quad (1.31)$$

V praxi sa však používajú smerové antény ($G \neq 1$). Pole takouto anténou v smere maximálneho vyžarovania môžeme tiež určiť pomocou vzťahu (1.31), ak výkon P nahradíme ekvivalentným izotropným vyžiareným výkonom, t.j. súčinom energetického zisku antény (vzhľadom na izotropný žiarič) a výkonu privádzaného do antény P_1

$$E = \frac{\sqrt{60P_1G_1}}{R} \quad (1.32)$$

Jednotky, v ktorých sú vyjadrené jednotlivé veličiny v (1.32), nie sú najvýhodnejšie pre praktické použitie. Výhodnejší tvar vzťahu (1.32) dostaneme, ak vyjadríme vyžiarený výkon v kW , vzdialenosť v km a intenzitu elektrického poľa v mVm^{-1}

$$E = \frac{245\sqrt{P_1G_1}}{R} \quad (1.33)$$

V špeciálnom prípade, keď zdrojom je polvlnový dipól ($G_1 = 1,64$), vzťah (1.33) môžeme napísať v tvare

$$E = \frac{314\sqrt{P_1}}{R} \quad (1.34)$$

Často je potrebné vypočítať miesto intenzity elektrického poľa v mieste príjmu skutočný výkon P_2 dodávaný prijímacou anténou do prijímača. Ak efektívna plocha antény je

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_2, \quad (1.35)$$

potom platí

$$P_2 = SA_{ef} = \frac{G_1P_1A_{ef}}{4\pi R_2} = \frac{G_1G_2\lambda^2P_1}{(4\pi R)^2} \quad (1.36)$$

1.6. Činiteľ tlmenia

Elektromagnetické vlny šíriace sa v reálnom prostredí sú viac alebo menej tlmené. Napr. pri šírení prízemnej vlny časť energie vlny preniká pod povrch Zeme a mení sa na teplo, časť energie sa rozptyľuje a iba pomerne malá časť energie dopadá na prijímaciu anténu.

Zmenšenie intenzity elektrického poľa vlny šíriacej sa v reálnom prostredí v porovnaní s intenzitou poľa, ktorá by existovala v ideálnom voľnom priestore, sa popisuje zavedením činiteľa tlmenia W . Keď pre dané podmienky šírenia vieme určiť činiteľ tlmenia, potom pre intenzitu elektrického poľa v mieste príjmu platí vzťah

$$E = \frac{245\sqrt{P_1 G_1}}{R} |W| \quad , \quad (1.37)$$

kde $[P] = \text{kW}$, $[R] = \text{km}$ a $[E] = \text{mV/m}$.

Činiteľ tlmenia je funkciou vzdialenosti R . V mnohých prípadoch sa tlmenie trasy mení s časom, preto činiteľ tlmenia je tiež funkciou času. Výkon P_2 dodávaný prijímacou anténou do prijímača pri šírení elektromagnetických vln v reálnom prostredí určíme vynásobením vzťahu (1.36) druhou mocninou činiteľa tlmenia

$$P_2 = \frac{G_1 G_2 \lambda^2 P_1}{(4\pi R)^2} |W|^2 \quad . \quad (1.38)$$

V praktických aplikáciách je výhodné vyjadriť výkon vysielateľa a výkon privádzaný do prijímača v dB vzhľadom na jeden $W(\text{dBW})$. Vzťah (38) vyjadrený v logaritmickej stupnici potom má tvar

$$P_2 = P_1 + 20 \log \frac{\lambda}{4\pi R} + G_1 + G_2 + W \quad , \quad (1.39)$$

kde G_1 , G_2 a W sú vyjadrené v dB. Veličina $20 \log(\lambda/4\pi R)$ popisuje rozptyl elektromagnetickej energie pri šírení sa vlny vo voľnom priestore medzi izotropnými anténami a nazýva sa tlmenie voľného priestoru.

1.7. Fresnelove zóny

Pri analýze šírenia elektromagnetických vln musíme predovšetkým poznať, ktorá časť priestoru rozhodujúcim spôsobom ovplyvňuje šírenie, t.j. oblasť, v ktorej je elektromagnetická vlna "sústredená". Uvažujme dva body O a A vo voľnom priestore. Nech bod O je zdrojovým bodom. Obklopíme ho plochou Σ , ktorú tvorí rovina S_0 kolmá na priamku OA a pologuľa s nekonečne veľkým polomerom. V súlade s Huygensovým – Fresnelovým princípom elektromagnetické pole v bode A je určené rozložením poľa na ploche Σ . Pretože pole zdroja O musí spĺňať podmienky vyžarovania, integrál po povrchu pologule je nulový a pre pole v bode A dostaneme vzťah

$$\vec{E}(A) = -\frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \left(\psi \frac{\partial \vec{E}}{\partial n} - \vec{E} \frac{\partial \psi}{\partial n} \right) dS \quad . \quad (1.40)$$

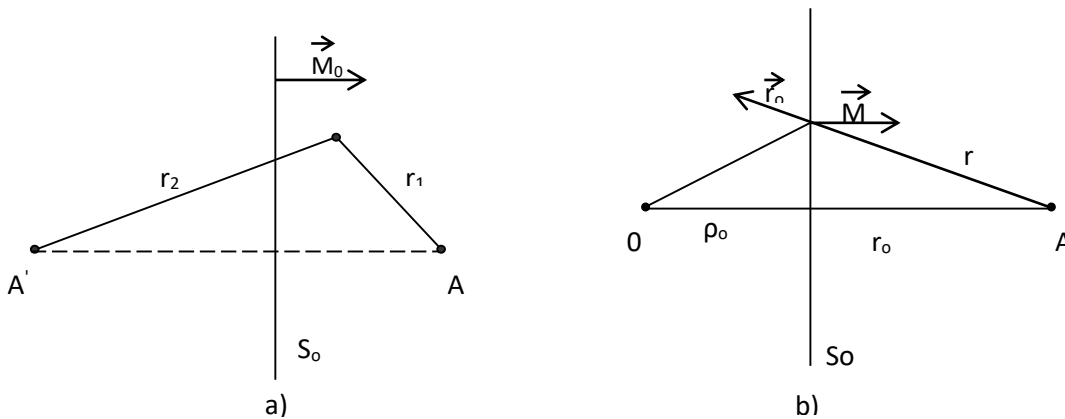
Greenova funkcia pre tento problém má tvar (1.41)

$$\psi = \frac{e^{-jk r_1}}{r_1} - \frac{e^{-jk r_2}}{r_2}, \quad (1.41)$$

kde r_1 a r_2 sú vzdialenosti ľubovoľného bodu vnútri plochy Σ od bodu pozorovania A , resp. jeho zrkadlového obrazu A' (Obr. 1.18a).

Na rovine S_0 je funkcia φ rovná nule (lebo $r_1 = r_2 = r$, Obr. 1.18b) a pre jej deriváciu podľa normály platí vzťah

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} = 2 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) (\vec{n}_0 \cdot \vec{r}_0). \quad (1.42)$$



Obr. 1.18: a) Pomocný obrázok pre voľbu Greenovej funkcie; b) k analýze integrálu vo vzťahu (1.46)

V praktických prípadoch je vzdialenosť medzi zdrojovým bodom O a bodom pozorovania vždy veľká v porovnaní s vlnovou dĺžkou, preto môžeme zvoliť polohu roviny S_0 tak, aby jej vzdialenosť od bodov O aj A bola veľká vzhľadom na λ

$$\zeta_0 \gg \lambda, \quad r_0 \gg \lambda. \quad (1.43)$$

Za týchto predpokladov môžeme vzťah (1.42) napísať v tvare

$$\frac{\partial \psi}{\partial n} \approx -jk \frac{e^{-jkr}}{r} (\vec{n}_0 \cdot \vec{r}_0). \quad (1.44)$$

Ak okrem toho ζ_0 je veľké v porovnaní s rozmermi zdrojovej oblasti, potom pole na rovine S_0 má tvar

$$\vec{E} = E_0 \frac{e^{-jk\zeta}}{\zeta}, \quad (1.45)$$

kde vektor \vec{E}_0 popisuje smerové a polarizačné vlastnosti zdroja. Po dosadení vzťahov (1.44) a (1.45) do (1.40) môžeme vyjadriť elektrické pole v bode pozorovania vzťahom

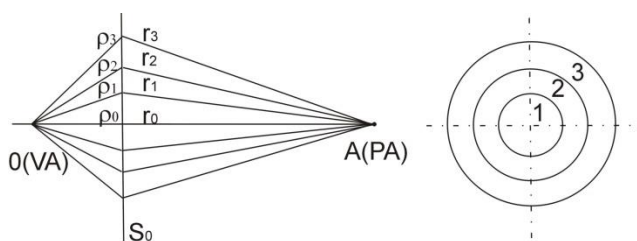
$$\vec{E}(A) = -\frac{j}{\lambda} \int_{S_0} \vec{E}_0 \frac{e^{-jk(\zeta+r)}}{\zeta} \left(\vec{n}_0 \cdot \vec{r}_0 \right) dS. \quad (1.46)$$

Analýza integrálu vo vzťahu (1.46) umožňuje určiť významnú oblasť pre šírenie elektromagnetických vln. Každý element roviny S_0 vytvára v bode pozorovania A elementárne pole s amplitúdou

$$\frac{E_0}{\lambda} \cdot \frac{\left(\vec{n}_0 \cdot \vec{r}_0 \right)}{\zeta r} dS \quad (1.46a)$$

a s fázou (koeficient j (1.46) neuvažujeme)

$$k(\zeta + r). \quad (1.46b)$$



Obr. 1.19: Fresnelove zóny

Rozdelíme rovinu S_0 nesústredné medzikružia tak, aby fázy elementárnych polí elementov plochy ležiacich v danom medzikruží sa nelíšili o viac ako 180° . Tieto medzikružia, tzv. Fresnelove zóny (Obr. 1.19) sú určené polermi ξ_n (ρ_n) a r_n , pre ktoré platí rovnica

$$\zeta_n + r_n - \zeta_0 - r_0 = n \frac{\lambda}{2}, \quad (1.47)$$

každá Fesnelova zóna vytvára v bode pozorovania zložky elektrického poľa, ktoré sa líši o 180° od fázy zložky elektrického poľa vytvorenej susednou zónou. Výsledné elektrické pole môžeme vyjadriť v tvare radu

$$E(A) = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 + \dots, \quad (1.48)$$

pričom sčítance tohto radu sa navzájom líšia tým menej, čím je kratšia vlnová dĺžka. Môžeme predpokladať, že každý člen radu (48) je približne rovný aritmetickému priemeru susedných členov. Ak prepíšeme rad (1.48) na tvar

$$E(A) = \frac{E_1}{2} + \left(\frac{E_1}{2} - E_2 + \frac{E_3}{2} \right) + \left(\frac{E_3}{2} - E_4 + \frac{E_5}{2} \right) + \dots \quad (1.49)$$

a uvážime, že $\lim_{n \rightarrow \infty} E_n = 0$, dochádzame k záveru, že elektrické pole v bode pozorovania je približne rovné súčtu polí elementárnych zdrojov umiestnených v polovici prvej Fresnelovej zóny

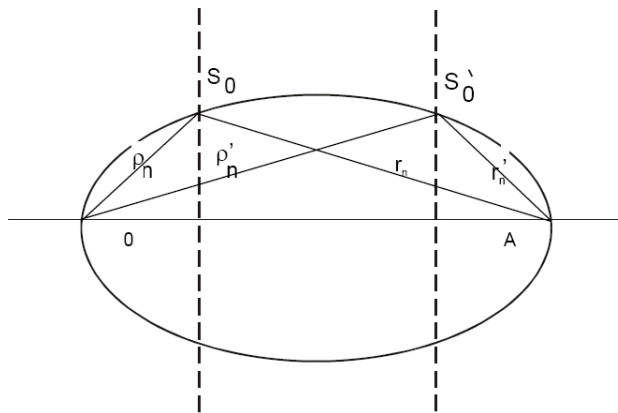
$$E(A) \approx \frac{E_1}{2}. \quad (1.50)$$

Tento vzťah platí tým presnejšie, čím lepšie je splnená nerovnosť $r_0 + \zeta_0 \gg \lambda$. V každom prípade je elektrické pole v bode A menšie ako súčet polí elementárnych zdrojov umiestnených v prvej Fresnelovej zóne

$$\frac{E_1}{2} < E(A) < E_1. \quad (1.51)$$

Premiestnime teraz rovinu S_0 pozdĺž osi OA . Hranice Fresnelových zón budú opisovať povrchy elipsoidov s ohniskami v bodoch O a A (Obr. 1.20), pretože vzťah (1.52) je rovnica elipsoidu.

$$\zeta_n + r_n = \zeta_0 + r_0 + n \frac{\lambda}{2} = konst. \quad (1.52)$$



Obr. 1.20: Priestorové Fresnelove zóny

Z uvedených úvah vyplýva dôležitý záver. Pri šírení vlny medzi bodmi O a A hrá rozhodujúcu úlohu objem ležiaci vo vnútri prvej Fresnelovej zóny. Tento objem je tým ostrejšie ohraničený, čím silnejšie platia nerovnosti (1.43). Pri $\lambda \rightarrow 0$ všetky elipsoidy (priestorové Fresnelové zóny) prechádzajú na úsečku OA , čo zodpovedá šíreniu vlny pozdĺž lúča (aproximácia geometrickej optiky).

Vypočítame rozmery Fresnelových zón. Označme polomer a – tej Fresnelovej zóny R_n . Z jednoduchých geometrických vzťahov a z podmienky (1.41) vyplýva

$$\zeta_n = \sqrt{\zeta_0^2 + R_n^2} \approx \zeta_0 + \frac{R_n^2}{2\zeta_0}, \quad (1.53)$$

$$r_n = \sqrt{r_0^2 + R_n^2} \approx r_0 + \frac{R_n^2}{2r_0}. \quad (1.54)$$

S využitím vzťahov (1.53) a (1.54) a rovnice (1.47) môžeme vyjadriť polomery Fresnelových zón v tvare

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda\zeta_0r_0}{\zeta_0 + r_0}} \quad (1.55)$$

a plochy všetkých Fresnelových zón sú rovnaké a rovnajú sa

$$S_F = \frac{n\lambda\zeta_0r_0}{\zeta_0 + r_0}. \quad (1.56)$$

1.8. Šírenie rádiových vln rôznych frekvencií

Za rádiové vlny považujeme vlny od 1000 m (DV) do 0,1 m (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, napr. prenos TV (televízneho) signálu a FM (frekvenčne modulovaného) rádio vysielania, potrebujú priamu viditeľnosť VA (vysielacia anténa) a PA (prijímacia anténa), v opačnom prípade vznikajú odrazy či interferencie. UKV – GSM zariadenia, taktiež potrebujú priamu viditeľnosť VA a PA.

1.8.1. Šírenie dlhých (DV) vln vo voľnom priestore

Elektromagnetické vlny, ktoré sa rozprestierajú v pásme frekvencií 15 až 100 kHz (20000 až 3000 m), sa nazývajú dlhými vlnami (DV). Vlnenie s takouto frekvenciou sa šíri povrchovými vlnami do vzdialenosti 3 až 4 tisíc km difrakciou a priestorovými vlnami, ktoré vznikajú odrazom od dolnej hranice ionosféry (vrstva *D*) v denných hodinách, príp. vrstvy *E* v nočných hodinách. Druhý spôsob sa podobá šíreniu vlnenia vo vlnovode, v ktorom hornú stenu predstavuje dolná hranica ionizácie a dolnú vodivý povrch Zeme. Pretože vrstva *D* sa v noci stráca, odraznou vrstvou sa stáva vrstva *E*, ktorá je vyššie položená, preto sa dlhé vlny v noci šíria na väčšie vzdialenosti.

Následkom zmeny koncentrácie elektrónov a iónov v atmosfére sa mení výška 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 ani nedá 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

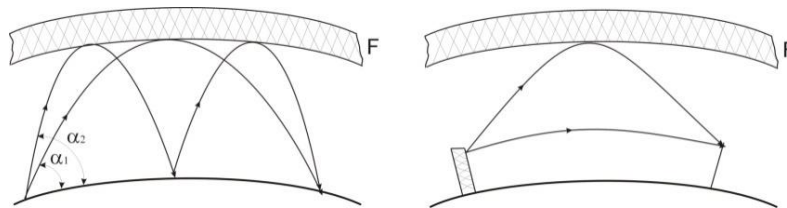
$\lambda = 10\,000\text{ m}$ je to $5\,000\text{ m}$, čo je taký veľký dráhový rozdiel, ktorý málokedy vzniká. Výkyvy môžu byť väčšie pri menších vlnových dĺžkach dlhých vln.

Pri geofyzikálnej poruche preniknú slnečné častice do zemskej atmosféry, v dôsledku čoho dôjde k vlekkej poruche ionosféry. Takáto porucha sa nazýva ionosférickou búrkou, ktorá spôsobí podstatné zmeny v štruktúre vrstvy F_2 .

Vplyv ionosférických búrok je malý, pretože tieto ovplyvňujú len horné vrstvy atmosféry, ktoré nemajú vplyv na šírenie dlhých vln.

1.8.2. Šírenie stredných (SV) vln vo voľnom priestore

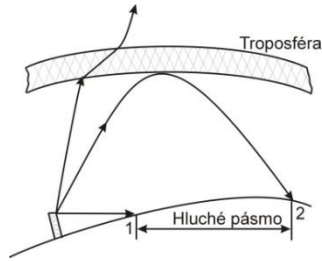
Stredné vlny (SV) sa rozprestierajú v pásme 100 kHz až $1,5\text{ MHz}$ ($3\,000$ až $2\,000\text{ m}$). Oproti dlhým vlnám, ktoré sa odrážajú od dolnej vrstvy ionosféry, potrebujú stredné vlny k odrazu väčšiu hodnotu koncentrácie elektrónov, odrážajú sa preto len od vyšších vrstiev (vrstva E a F_1). Cez deň vzniká silné pohlcovanie priestorovej vlny, preto táto zaniká a vlnenie sa šíri len povrchovou vlnou, ktorá je tlmená zemským povrchom. V noci sa útlm vo vrstve E , podstatne zmenší, nastáva odraz a stredné vlny sa šíria prízemnou aj priestorovou vlnou. Ich dráhy šírenia sú rôzne, preto môže dôjsť v mieste príjmu k interferencii dvoch signálov z povrchovej a priestorovej vlny, čo má za následok kolísanie príjmu, t.j. vzniká únik (Obr. 1.21). Ako opatrenie proti úniku, sa používajú na vysielačnej strane protiúnikové antény. Sú to antény postavené tak, aby intenzívnejšie vyžarovali povrchové vlny na úkor priestorových vln.



Obr. 1.21: Vznik úniku

1.8.3. Šírenie krátkych (KV) vln vo voľnom priestore

Krátke vlny (KV) sa rozprestierajú v pásme od $1,5$ až do 30 MHz (200 až 10 m). Krátke vlny sa môžu šíriť ako povrchové a priestorové. Vplyvom polovodivého povrchu a guľatosti Zeme sa povrchové vlny už pri vzdialenostiach niekoľko desiatok km utlmia. Priestorové vlny sú čiastočne tlmené vrstvou E , cez ktorú preniknú a odrážajú sa od vrstvy F_1 a F_2 . Vlny vyšších frekvencií prenikajú ionosférou a neodrážajú sa, preto ich možno použiť pre rádiové spojenie len po maximálne použiteľnú frekvenciu. Vrstva F_2 je nestála a táto jej vlastnosť má veľký vplyv na šírenie krátkych vln. Je to predovšetkým únik, ktorý je omnoho silnejší ako v pásme stredných vln. Nestálosť vrstvy F_2 spôsobí, že sa mení dĺžka trajektórií a fáza prichádzajúcich elektromagnetických vln, čím vzniká útlm. Šírenie krátkych vln sa vyznačuje niektorými osobitosťami, ku ktorým patrí: vytváranie hluchých pásiem a ozvena. Hluché pásma sú pri šírení KV spôsobené tým, že povrchové vlny, ktoré sú veľmi tlmené, dosiahnu len určitú vzdialenosť 1 od vysielača, naproti tomu priestorové vlny umožňujú príjem v oblasti 2 . Priestorom medzi 1 a 2 sa vytvorilo hluché pásmo, v ktorom nie je možný príjem (Obr. 1.22).



Obr. 1.22: Tvorenie hluchých pasiem

Za priaznivých podmienok môže vzniknúť ozvena*, ktorá je spôsobená dopadom krátkovlnného signálu šíriaceho sa priestorovou vlnou na miesto príjmu po obehnutí okolo Zeme. Takto vzniká ozvena s oneskorením asi 0,13 s; môže byť i niekoľko násobná.

1.8.4. Šírenie veľmi krátkych (VKV) vln vo voľnom priestore

Veľmi krátke vlny (VKV) sa rozprestierajú v pásme nad 30 MHz (pod 10 m). Toto pásmo sa rozdeľuje ešte ďalej na pásmo metrových vln ($\lambda = 10 \text{ m}$ až 1 m), decimetrových vln ($\lambda = 10 \text{ dm}$ až 1 dm) a centimetrových vln ($\lambda = 10 \text{ cm}$ až 1 cm). Veľmi krátke vlny sa šíria len ako povrchové vlny. Od ionosféry sa neodrážajú, ale prenikajú do medzihviezdneho priestoru. Odraz od ionosféry môže nastať len v mimoriadnych prípadoch, v období veľkej slnečnej činnosti. Pretože príjem je možný len v dosahu priamej viditeľnosti, zlepšenie príjmu sa docieli vhodným umiestením antény vysielачa aj prijímača.

Vlny oblasti VKV sa odrážajú od predmetov, ktoré sú im v ceste, a to tým viac, čím majú kratšiu vlnovú dĺžku. Táto ich dôležitá vlastnosť sa využíva v rádiolokačnej technike (radar).