

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 niekoľkonásobná.

7.4.4 Šírenie veľmi krátkych vln

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. 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 vysielača 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).

* Ozvena rádiových vln je opakovanie rádiového signálu vplyvom šírenia po niekoľkých rôznych cestách.

8 ANTÉNY

8.1 VYŽAROVANIE ELEMENTÁRNYCH ŽIARIČOV

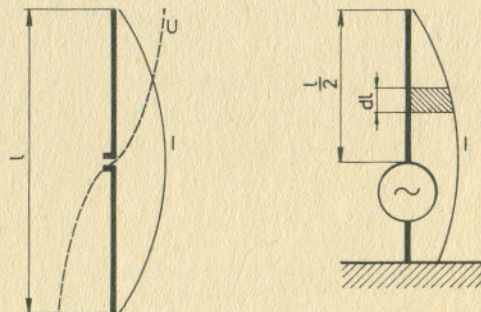
V predchádzajúcej kapitole sme opísali vlastnosti šírenia elektromagnetického vlnenia. V tejto časti sa budeme zaoberať takými časťami vysielačieho zariadenia, príp. prijímačieho zariadenia, ktoré bezprostredne súvisia so vznikom elektromagnetického poľa.

Aby sa vytvorilo v priestore elektromagnetické 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 elektromagnetickej energie alebo anténou. Najjednoduchšou anténou z hľadiska procesu premeny elektrickej energie na elektromagnetické pole je elementárny žiarič. Takýmto je vodič, ktorého rozmery v porovnaní s vlnovou dĺžkou sú malé a pri ktorom rozloženie prúdu pozdĺž vodiča je v každom okamihu rovnaké. Za elementárne žiariče považujeme:

- elementárny elektrický dipól,
- elementárnu štrbinu.

8.1.1 Elementárny elektrický dipól

Najjednoduchší žiarič vznikne roztvorením vedenia naprázdno s dĺžkou $\lambda/4$ (obr. 8.1). Na takomto vedení, pri napájaní s časovo

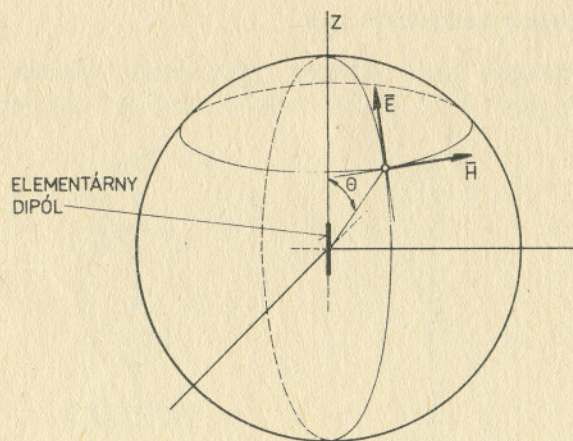


Obr. 8.1. Elementárny elektrický dipól

premenlivým signálom, vzniká stojaté vlnenie, ktoré má na konci prúdový uzol. Vedenie sa správa ako sériový rezonančný obvod, ktorého energia magnetického a elektrického poľa je rozložená pozdĺž vodiča. Úbytok energie v takomto žiariči je spôsobený v podstate vyžarovaním energie do priestoru. 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 elektromagnetického poľa, potom vektor magnetickej zložky (\mathbf{H}) leží vždy v dotyčnici k ekvatoriálnym kružniciam a vektor elektrickej zložky (\mathbf{E}) v dotyčnici k poludnikovým čiarom na guľovom povrchu (obr. 8.2). Rovina, v ktorej ležia tieto dva vektory, je kolmá na smer šírenia elektromagnetického poľa od žiariča, ktorý berieme do úvahy. Elektromagnetické pole v dostatočnej vzdialenosti od žiariča, ako už vieme, môžeme považovať za rovinné. Amplitúda magnetickej zložky poľa je daná vzťahom

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{Il}{r\lambda} \cdot \sin \theta \quad (8.1)$$



Obr. 8.2. Štruktúra elektromagnetického poľa dipólu

a amplitúda elektrickej zložky poľa

$$E = 60 \cdot \pi \frac{Il}{r\lambda} \cdot \sin \theta \quad (8.2)$$

Amplitúdy týchto zložiek dosahujú najväčšiu hodnotu v rovníkovej rovine, keď $\theta = \pi/2$, potom $\sin \theta = 1$. Nulová hodnota v smere osi antény, keď $\theta = 0$, potom je $\sin \theta = 0$. Amplitúdy jednotlivých zložiek elektromagnetického poľa sú priamo úmerné prúdu v anténe a uhlu Θ . Koncové body jednotlivých zložiek, vynesené v rôznych smeroch v závislosti od uhla sprievodiča, tvoria vyžarovací alebo smerový diagram antény. Smerové vlastnosti antény môžeme vyjadriť smerovou funkciou žiarenia pre anténu, ktorú berieme do úvahy, je

$$F(\Theta) = \frac{\pi}{\lambda} I \sin \Theta \quad (8.3)$$

Amplitúda elektrickej zložky elektromagnetického poľa vyjadrená pomocou smerovej funkcie potom bude

$$E = \frac{60I}{r} F(\Theta) \quad (8.4)$$

Výkon, ktorý elementárny dipól vyžiari do okolitého prostredia vo forme elektromagnetického poľa a šíri sa v tomto prostredí, určíme ako výkon, prenesený cez guľový povrch rozložený okolo žiariča. Na vyjadrenie celkového výkonu vyžiareného povrchom gule použijeme vektor Poyntinga — Umova (vzťah 7.9).

Tento vektor udáva hodnotu a smer energie prenášanej elektromagnetickým poľom za jednu sekundu cez jednotkovú plochu, položenú kolmo na smer šírenia elektromagnetického poľa v mieste, ktoré berieme do úvahy. Nás zaujíma namiesto okamžitej hodnoty stredný výkon p_s , musíme preto vo vzťahoch (8.1) a (8.2) brať do úvahy I_{ef} . Dosadením I_{ef} do vzťahu (7.9) dostaneme

$$p_s = 60\pi \frac{I_{ef}}{r} \frac{l}{\lambda} \sin \Theta \cdot \frac{1}{2} \frac{I_{ef}}{r} \frac{l}{\lambda} \cdot \sin \Theta \quad (8.5)$$

Odtiaľ po úprave

$$p_s = 30\pi \frac{I_{et}^2}{r^2} \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \sin \Theta \quad (8.6)$$

Celkový výkon vyžiarený cez guľový povrch dostaneme, keď výkon p_s dF vyžiarený cez elementárny pás s plochou dF budeme integrovať po celom guľovom povrchu v medziach

$$0 \leq \Theta \leq \pi \quad (8.7)$$

$$P = \int_F p_s dF$$

Plochu dF , ktorá prislúcha k uhlu žiarenia do $d\Theta$ (obr. 8.3), vypočítame

$$dF = 2\pi r' r d\Theta \quad (8.8)$$

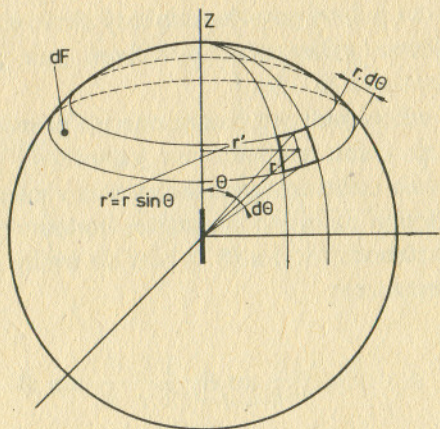
kde

$$r' = r \sin \Theta$$

$$dF = 2\pi r^2 \sin \Theta d\Theta$$

Dosadením za p_s a dF do rovnice (8.7) dostaneme

$$P = \int_0^\pi p_s dF = 60\pi^2 I_{et}^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \int_0^\pi \sin^3 \Theta d\Theta \quad (8.9)$$



Obr. 8.3. Výkon vyžiarený plochou guľového povrchu

Riešenie integrálu

$$\int_0^\pi \sin^3 \Theta d\Theta = \frac{4}{3}$$

Po dosadení a úprave vyžiarený výkon bude

$$P = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 I_{et}^2 \quad (8.10)$$

Konštantu úmernosti medzi vyžiareným výkonom a štvorcom prúdu nazývame vyžarovacím odporom antény R_z .

$$R_z = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \quad (8.11)$$

Vyžarovaný výkon potom bude

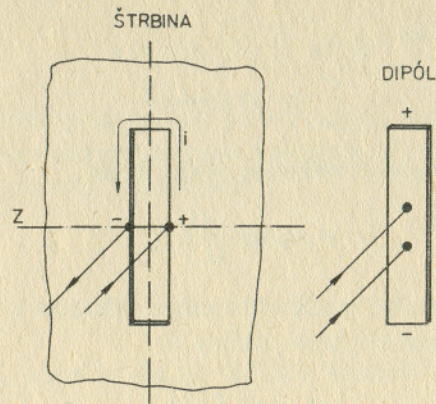
$$P = R_z I_{et}^2 \quad (8.12)$$

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, napr. anténa vyžarujúca na dlhých vlnách pri $\lambda = 10\,000$ m má $R_z = 6 \cdot 10^{-3} \Omega$.

8.1.2 Elementárna štrbina

Keď vo vodivej platni vyrežeme štrbinu s dĺžkou $\lambda/2$, vytvoríme štrbinovú anténu. Žiaričom môže byť vytvorená štrbina ale aj vyrezaný pás vodivého materiálu. Rozdiel medzi nimi je len v polarite rozloženia prúdu a napätia, príp. v spôsobe napájania takto vzniknutých žiaričov (obr. 8.4). Keď zdroj energie je pripojený do stredu štrbiny, prúdy tečú po jej okraji a 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 anténa k dipólu, to 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 (8.11).



Obr. 8.4. Elementárna štrbina

8.2 ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI ANTÉN

8.2.1 Vstupná impedancia antény

Vysokofrekvenčná energia sa do žiariča privádza napájacím vedením. Účinný prenos vŕ energie nastane vtedy, keď vstupný odpor antény má charakter čisto činného odporu. Každá anténa má však v skutočnosti okrem činnnej aj reaktančnú zložku. Je preto správnejšie hovoriť o vstupnej impedancii Z_{vst} antény. Túto môžeme vyjadriť ako pomer napätia a prúdu v napájacom bode antény

$$Z_{\text{vst}} = \frac{U_a}{I_a} = R_a + jX_a \quad (8.13)$$

Reálna časť vstupnej impedancie R_a predstavuje odpor antény a zodpovedá činnému výkonu v anténe. Tento sa čiastočne mení na teplo v odporoch vodičov a zeme, v dielektriku izolantov, podstatná časť sa však vyžiari ako elektromagnetické vlnenie do priestoru. Vyžiarená časť je vlastne užitočná energia. Ak rozložíme odpor na časť, ktorá zodpovedá stratám, a časť, ktorá je úmerná vyžiarenej energii, môžeme pre výkon napísať

$$P = I^2(R_s + R_e) \quad (8.14)$$

kde R_s je stratový odpor a R_e vyžarovací odpor žiariča. Reaktančná zložka jX_a nespotrebuje žiadny výkon. Zhoršuje vlastnosti antény ako žiariča (spotrebiča energie) a spôsobuje frekvenčnú citlivosť antény.

Priebeh vstupnej impedancie môže mať charakter induktívny a kapacitný, čo závisí od pomeru l/λ . Pri rezonančnej dĺžke anténového vodiča je imaginárna zložka nulová, reálna zložka má maximálnu hodnotu, $jX_a = 0$ a $Z_{\text{vst}} = R_a$.

Vstupná impedancia antény, príp. vstupný odpor, musí sa prispôbiť k impedancii napájača, v opačnom prípade prenos energie napájacím do antény je zmenšený o straty spôsobené stojatým vlnením vo vedení.

8.2.2 Účinnosť antény

Je v záujme ekonomickej prevádzky vysieláča, aby vyžiarená energia bola čo najväčšia vzhľadom na celkový privedený výkon do antény.

Účinnosť antény je definovaná z pomeru výkonov

$$\eta = \frac{P_z}{P_a} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8.15)$$

kde P_z je celkový vyžiarený výkon,
 P_a — príkon antény.

Výkon vyžiarený anténou vypočítame z hodnoty prúdu I_a v kmitni antény a z vyžarovacieho odporu R_e . Napájací výkon musí kryť vyžiarený výkon a straty na výkone spôsobené stratovým odporom, ktorý zahŕňa odpor vodičov (R_s), odpor zeme (R_z) a odpor dielektrik (R_d). Dosadením do (8.15)

$$\eta = \frac{I_{\text{set}}^2 R_e}{I_{\text{set}}^2 (R_s + R_z + R_d + R_e)} = \frac{R_e}{R_s + R_z} \quad (8.16)$$

Zo stratových odporov sa dajú pomerne dobre obmedziť dielektrické straty starostlivosťou voľbou izolačného materiálu. Ťažko však možno obmedziť stratový odpor vodičov, ktorý je ešte zvýšený povrchovým javom (skinefektom).

8.2.3 Charakteristická impedancia antény

Anténu si môžeme predstaviť ako krátke vedenie, po ktorom sa šíri energia. Potom ako každé vedenie i anténa má svoju vlnovú impedanciu Z_v . Veľkosť tejto závisí od rozmerov antény. Antény môžeme prirovnáť ku krátkym bezstratovým vedeniam, môžeme preto ich vlnovú impedanciu vyjadriť vzťahom

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (8.17)$$

Vlnovú impedanciu takých vertikálnych antén, ktorých výška je menšia ako dĺžka vlny (dlhé a stredné vlny), vypočítame zo vzťahu [3]

$$Z_v = 60 \left(\ln \frac{\lambda}{\pi r} - 0,577 \right) \quad [\Omega] \quad (8.18)$$

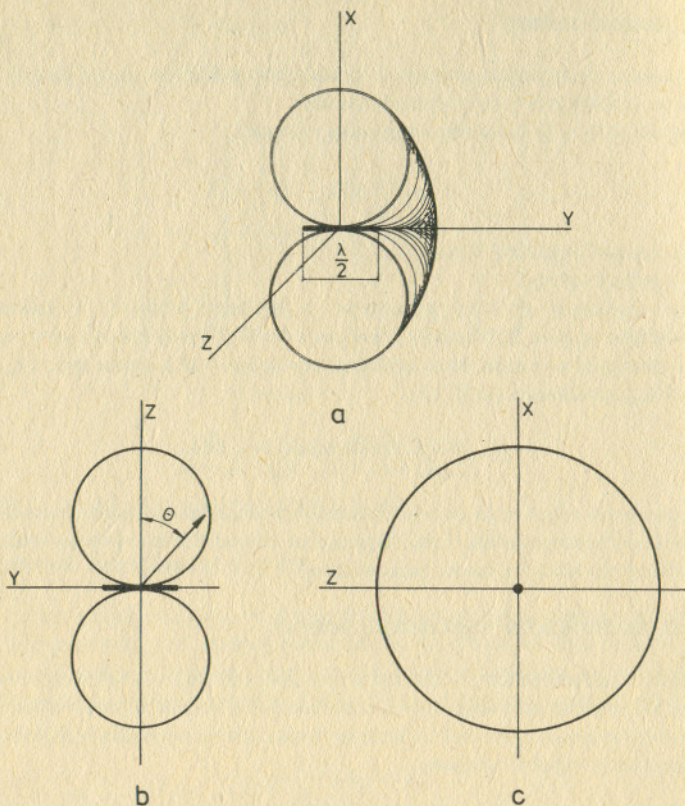
kde r je polomer vodiča [m],

λ — vlnová dĺžka vo voľnom priestore [m].

Pri horizontálnych anténach vystupuje koeficient 120 namiesto 60 pre vertikálne antény.

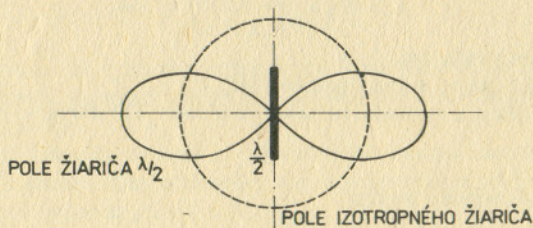
8.2.4 Smerové účinky antén

Skutočnosť, že antény nevyžarujú vŕ energiu vo všetkých smeroch rovnako, sme vyjadrili smerovou funkciou žiarenia. Smerový účinok antén znázorňujeme smerovým



Obr. 8.5. Diagram polvlnového dipólu

a — priestorový, b — horizontálny, c — vertikálny vyžarovací



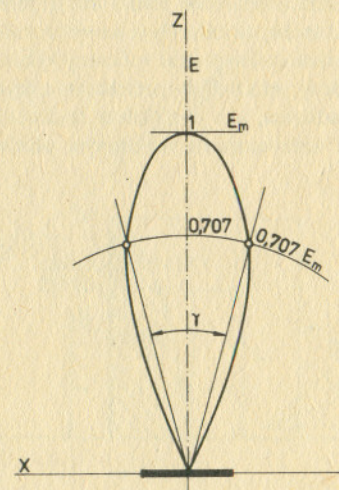
Obr. 8.6. Porovnanie smerových vlastností antén s vyžarovaním izotropného žiariča

vyžarovacím diagramom. Vyžarovací diagram antény je priestorový, pre praktické použitie sa však nahrádza rovinnými vyžarovacími diagramami v horizontálnej a vertikálnej rovine. Priestorový vyžarovací diagram jednoduchého polvlnového dipólu je znázornený na obr. 8.5. Horizontálny vyžarovací diagram je vytvorený rezom vedeným v rovine yz, vertikálny rezom vedeným v rovine xz. Nerovnomerné rozloženie vyžiarenej energie v priestore je spôsobené interferenciou polí od nerovnomerného priebehu prúdu a napätia pozdĺž samotného žiariča. Vertikálny vyžarovací diagram vplyvom prítomnosti zeme a jej zrkadlového účinku, môže nadobudnúť dosť zložité priebehy. Keď neberieme do úvahy vplyv zeme, vertikálny vyžarovací diagram bude kružnica. Veľká časť energie vyžiarená horizontálnym žiaričom smerom k zemi sa však odráža za ideálneho stavu bez strát do priestoru a interferuje s priamo vyžiarenou energiou, pričom vytvára zosilnené výsledné pole. Priebeh výsledného vertikálneho vyžarovacieho diagramu bude závisieť od výšky horizontálnej antény nad zemou.

Keď chceme posúdiť smerové vlastnosti antény, porovnáme tieto s vyžarovaním izotropnej antény, ktorá je idealizovaným fiktívnym zdrojom vyžarujúcim vo všetkých smeroch rovnako. Smerová anténa bude oproti izotropnej anténe vyžarovať v niektorých smeroch väčšiu, v iných menšiu energiu, teda má určitú smerovosť (obr. 8.6). Smerovosť (S_a) je vyjadrená pomerom vyžiareného výkonu izotropnou anténou (P_i) a smerovou anténou (P_A)

$$S_a = \frac{P_i}{P_A} \quad (8.19)$$

Smerovosť udáva, koľkokrát väčší výkon by bolo treba vyžiariť z izotropnej antény, ktorá vyžaruje vo všetkých smeroch rovnako, aby intenzita elektromagnetického poľa



Obr. 8.7. Šírka vyžarovanej väzky