

VYŠETROVANIE ELEKTROMAGNETICKÝCH VĽN

Doc. Ing. Július Štelina, CSc.

Teoretický úvod:

Okrem mechanického vlnenia v prírode (vlny na vode, zvukové vlny, atď.) významným druhom vlnenia je vlnenie elektromagnetického poľa. Jeho existenciu teoreticky dokázal anglický fyzik J. C. Maxwell na základe všeobecných rovníc elektromagnetického poľa. Ich existenciu experimentálne dokázal nemecký fyzik Hertz v r. 1888. Dôkaz existencie elektromagnetického vlnenia spočíva v tom, že na základe Maxwellových rovníc je možné odvodiť pre vektor intenzity elektrického poľa \vec{E} a vektor magnetickej indukcie \vec{B} diferenciálne rovnice totožné s vlnovou rovnicou pre mechanické vlny t. j.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon\mu} \Delta \vec{E} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon\mu} \Delta \vec{B} . \quad (2)$$

Tieto platia pre vektor \vec{E} a \vec{B} v neohraničenom homogénnom izotrópnom prostredí, kde t je časová premenná, ϵ je dielektrická konštanta a μ je magnetická permitivita prostredia, Δ je známy Laplaceov operátor.

Porovnaním rovníc (1) resp. (2) s vlnovou rovnicou

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \Delta u \quad (3)$$

nachádzame, že rýchlosť šírenia týchto vln je daná vzťahom

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} . \quad (4)$$

Vo vákuu musí preto platiť

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = (8,86 \cdot 10^{-12} 4\pi \cdot 10^{-7})^{-\frac{1}{2}} \text{ m.s}^{-1} \doteq 300000 \text{ kms}^{-1} . \quad (5)$$

V rovnici (3) je u výchylka ako funkcia polohy a času v danom prostredí, v ktorom sa vlny šíria, pričom $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$.

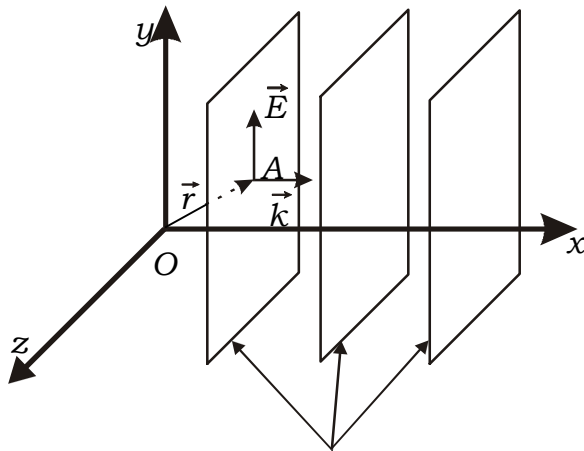
Uvedená skutočnosť, daná vzťahom (5) bola pre Maxwella východiskom k tvrdeniu, že svetlo je vlnenie elektromagnetického poľa. Okrem iného, položil tým základ k výkladu optických javov na základe predstavy, že svetlo je elektromagnetické vlnenie s veľmi krátkou vlnovou dĺžkou. Ďalej je možné ukázať, že vlnové rovnice (1) a (2) pripúšťajú riešenie v podobe guľových, resp. rovinných monochromatických vln. Potom napr. v neohraničenom homogénnom a izotrópnom prostredí pre rovinnú harmonickú vlnu vektor intenzity elektrického poľa môžeme vyjadriť funkciou dvoch premenných

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{r}_0 E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (6)$$

kde \vec{r} je polohový vektor daného miesta v čase t , $\omega = 2\pi f$ uhlová frekvencia vlny (f je frekvencia), \vec{r}_0 jednotkový vektor v smere polarizácie vlny, E_0 amplitúda vlny v danom mieste a čase, \vec{k} je vlnový vektor v smere šírenia sa vlny (jeho veľkosť je vlnové číslo $k = 2\pi / \lambda$, kde λ je vlnová dĺžka). Výraz $(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$ vo vzťahu (6) predstavuje fázu vlny. Schematicky môžeme vektory vystupujúce vo vzťahu (6) pre daný okamih znázorniť tak, ako je to uvedené na obr. 1.

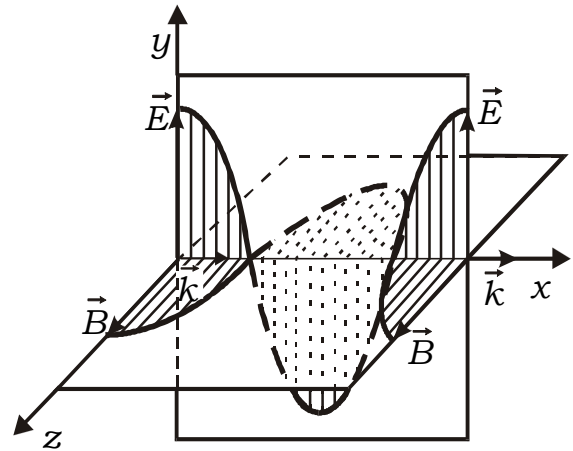
Polohový vektor \vec{r} udáva polohu ľubovoľného bodu (napr. bod A) na rovine konštantnej fáze (napr. na vlnoploche). Vektor \vec{k} udáva smer šírenia vlny.

Vektor $\vec{E}(\vec{r}, t)$ vyjadruje intenzitu elektrického poľa v mieste \vec{r} a v čase t , t. j. vlnový stav



roviny konštantnej fáze (vlnoplochy)

Obr. 1



Obr. 2

rovinnej harmonickej vlny danej vzťahom (6). V našom prípade sa vlna šíri v smere osi x a vlnoplochy sú rovnobežné s rovinou y, z .

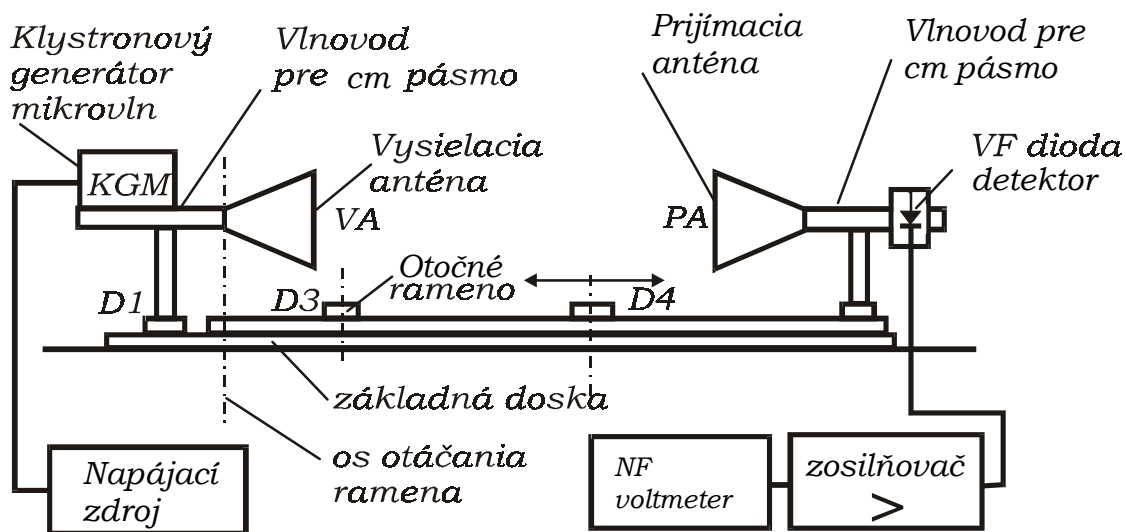
Analogický výraz môžeme písať pre vektor \vec{B} ako riešenia rovnice (2). Podrobnejšou analýzou je možné ukázať, že elektromagnetické vlnenie je vlnenie priečne, t. j. vektory \vec{E} a \vec{B} sú na seba kolmé, pričom vlnový vektor \vec{k} je súčasne kolmý na \vec{E} a \vec{B} , tak ako je to schematicky pre rovinnú harmonickú vlnu v danom časovom okamihu znázornenú na obr. 2.

Ak sa veľkosť vektora \vec{E} mení v čase v rovine x, y hovoríme, že vlna je lineárne polarizovaná. Obecnne môže vektor \vec{E} meniť svoj smer, respektíve koncový bod vektora \vec{E} vytvárať v čase a priestore skrutkovicu na povrchu valca alebo eliptického valca, potom hovoríme o kruhovej polarizácii, alebo eliptickej polarizácii elektromagnetickej vlny (bližšie pozri literatúru). Vlna znázornená na obr. 2 reprezentuje rovinnú harmonickú vlnu šíriacu sa v smere osi x , ktorá je polarizovaná v rovine x, y . Rovinu x, y nazývame rovinou polarizácie. Inými slovami: rovinná polarizácia je daná smerom vektora \vec{E} a smerom šírenia vlny (smer vektora \vec{k}).

Ďalej sa v tejto úlohe budeme zaoberať vyšetrením smerovej charakteristiky antény ako zdroja elektromagnetických vln, určením vlnovej dĺžky elektromagnetickej vlny a štúdiom polarizácie elektromagnetickej vlny.

Náčrt a popis meracieho zariadenia

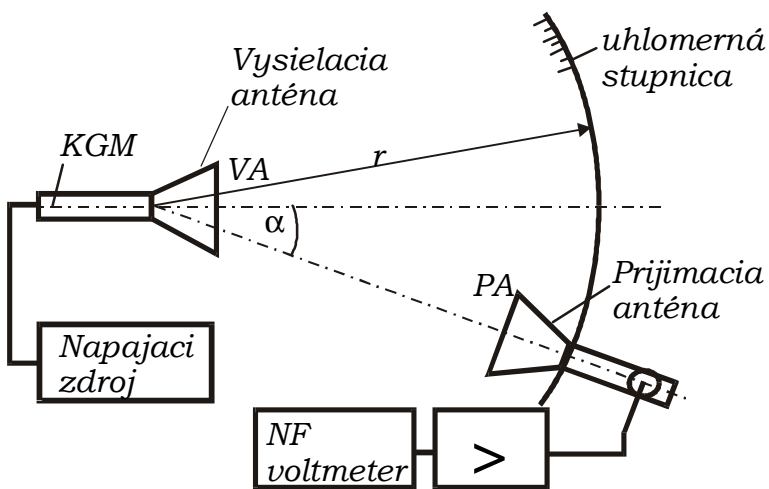
Principiálne usporiadanie meracej aparatury je znázornené na obr. 3. Základom meracej aparatury je zdroj (vysielač) elektromagnetických vln s frekvenciou cca 10 GHz (resp. cca 3 cm). Hovoríme, že zdroj pracuje v trojcentimetrovej oblasti rádiovln. Zdrojom je mikrovlnná elektrónka nazývaná reflexný klystrón, z ktorej krátká anténka siaha otvorom do obdĺžnikového vlnovodu trojcentimetrového pásma, ktorý je zakončený „lievikovou“ anténou tvaru ihlana s obdĺžnikovou základňou. Budená elektromagnetická vlna s vlnovou dĺžkou cca $\lambda = 3\text{cm}$ sa šíri od vysielačnej antény do priestoru smerom k príjmovej anténe rovnakého tvaru a tých istých rozmerov. Vo vlnovode príjmovej antény je v špeciálnom držiaku zasunutá v mikrovlnná dióda, z ktorej detekovaný signál privádzame prostredníctvom koaxiálneho vodiča (kábla) na vstup zosilňovača a ďalej na nízko-frekvenčný voltmeter. Vysokofrekvenčný signál generátora je modulovaný impulzným spôsobom s frekvenciou 1 kHz, čo umožňuje po detekcii detekovaný signál zosilniť nízko-frekvenčným zosilňovačom a použiť nízko-frekvenčný voltmeter.



Obr. 3

A. URČENIE VYŽAROVACIEHO DIAGRAMU ANTÉNY

Poznamenajme, že „lievikové“ antény majú tú vlastnosť, že elektromagnetickú vlnu vyžarujú len do určitého priestorového uhla. Horeuvedená zostava nám umožňuje študovať vyžarovací diagram, napr. vysielacej antény VA, tým že prijímacia anténa PA uchytená v držiaku D₂ (obr. 2) sa spolu s otočným ramenom môže otáčať okolo zvislej osi. Na obr.4 máme schematicky znázornenú situáciu pri pohľade zhora.



Obr. 4

Pretože meracia aparatúra je vybavená uhlomernou stupnicou, pri postupnom nastavovaní prijímacej antény PA pod rôznymi uhlami α , vo vodorovnej rovine voči vysielanej anténe a súčasnom odčítaní detekovaného napätia na nf voltmetri získame jeho závislosť od uhla α .

Úlohy:

Namerajte vyžarovací diagram vysielacej (lievikovej) antény!

Spracovanie výsledkov:

Hodnoty detekovaného napätia signálu na voltmetri prijímacej časti aparatúry v závislosti od uhla natočenia ramena s prijímacou anténou doporučujeme zapisovať do nasledovnej tabuľky. Merajte v smere kladných aj záporných uhlov.

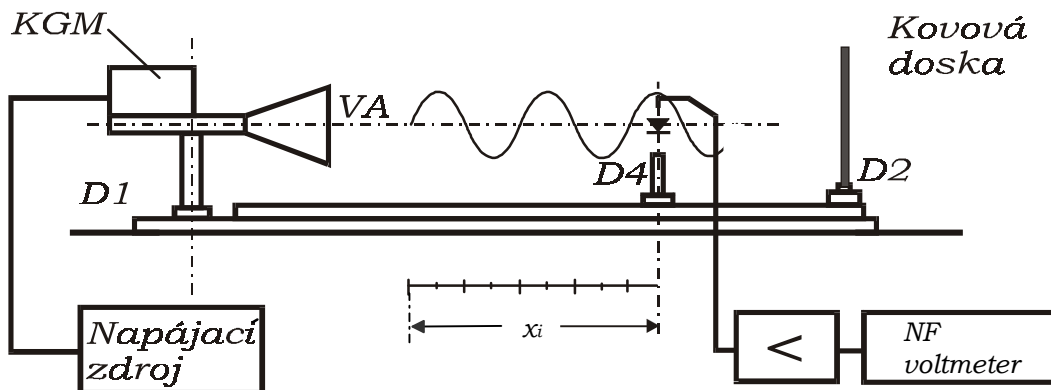
i	1	2	3	...	..	...
α [°]	0	2,5	5	...	..	...
U [mV]	...	...	...	...	..	...
U/U_{\max}	...	...	...	...	..	...

Grafickú závislosť smerovej charakteristiky vyneste na milimetrový papier v polárnych súradniciach. Na os x vyneste relatívne hodnoty U/U_{max} (U_{max} je maximálne napätie pri $\alpha = 0$), čo zodpovedá podľa (7) relatívnej hustote žiarivého toku I/I_{max} .

Z grafu určte na úrovni $U/U_{max} = 0,5$ šírku vyžarovacej charakteristiky $\Delta\alpha$.

B. URČENIE VLNOVEJ DĹŽKY STOJATEJ ELEKTROMAGNETICKEJ VLNY

Stojaté vlnenie vzniká ako dôsledok interferencie dvoch proti sebe idúcich vln rovnakej amplitúdy a frekvencie. Aby sme takúto situáciu realizovali, necháme vlnu vyžarovanú vysielačou anténou VA dopadať na kovovú dosku, ktorú umiestnime kolmo na smer šírenia v držiaku D2. Odrazená vlna od dosky potom interferuje s vlnou dopadajúcou. Postupným premiestňovaním Hallovej detekčnej diódy umiestnenej v špeciálnom držiaku a pripojenej k nf voltmetru máme možnosť zisťovať napätie zodpovedajúce detekovanému signálu v miestach maximálnej amplitúdy stojatej vlny (alebo v miestach minimálnej amplitúdy). Polohu detekčnej diódy v smere kolmice na kovovú dosku určujeme na merítku, ktoré je súčasťou základnej dosky. Z rozdielu jednotlivých polôh určíme vlnovú dĺžku stojatej elektromagnetickej vlny (pozri spracovanie výsledkov). Usporiadanie aparatury je schematicky znázornené na obr. 5.



Obr. 5

Úlohy:

Zmerajte vlnovú dĺžku elektromagnetických vln vyžarovaných vysielačou anténou metódou stojateho vlnenia.

Spracovanie výsledkov:

Pri meraní vlnovej dĺžky postupujeme hore uvedeným spôsobom. Hodnoty detekovaných napätí v závislosti od polohy sondy v miestach maxím a miním zapisujeme do nasledujúcej tabuľky.

i	1	2	3	4	5	6		
U_{max} [mV]								
U_{min} [mV]								
x_i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6		
λ_i [cm]	$\lambda_1 = x_3 - x_1$		$\lambda_2 = x_4 - x_2$		$\lambda_3 = x_5 - x_3$			$\bar{\lambda}$ z max.
λ_i [cm]								$\bar{\lambda}$ z min.
Δ_i								$\Sigma \Delta_i$
Δ_i^2								$\Sigma \Delta_i^2$

Stanovte strednú kvadratickú chybu podľa vzťahu (11) (odsek – Vyhodnocovanie chyby merania) t. j.

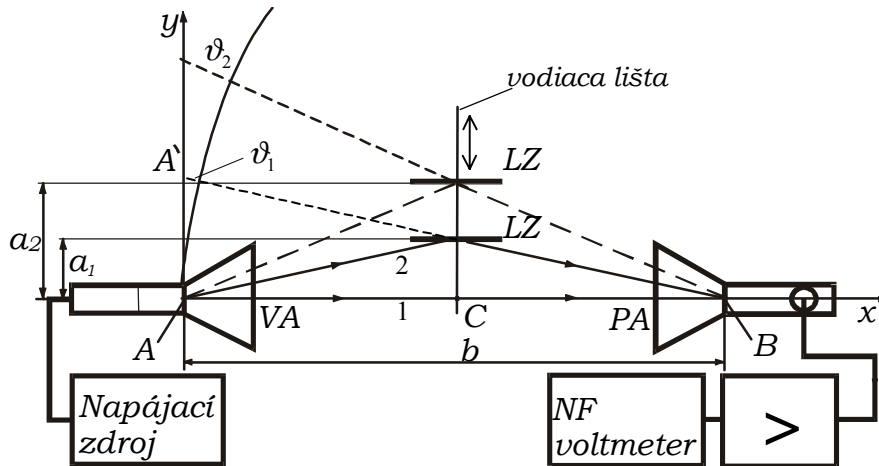
$$\bar{\delta}_\lambda = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n(n-1)}} .$$

Výsledok zapíšte v tvare $\lambda = \bar{\lambda} \pm \bar{\delta}_\lambda$.

Porovnajzte výsledok získaný z merania pomocou maxim v stojatej vlne s meraním pomocou mínim.

C. URČENIE VLNOVEJ DĹŽKY LLOYDOVÝM ZRKADLOM

Usporiadanie aparatury znázornené na obr. 6 predstavuje pohľad zhora



Obr. 6

V smere osi vysielačnej antény VA do vzdialenosti b umiestime prijímaciu anténu PA s detekčným zariadením. Nízkovrekvenčný voltmeter NF detekčného zariadenia umožňuje určiť veľkosť detekovaného napätia. Toto napätie odpovedá intenzite elektrického poľa dopadajúcej elektromagnetickej vlny v prijímacej anténe. V špeciálnom držiaku na vodiacej lište je umiestnená kovová doska – Lloydovo zrkadlo LZ (pozri obr.6). Vlny z vysielačnej antény VA sa šíria v priestorovom uhle jej vyžarovacieho diagramu. Potom napr. vlna 2 (lúč 2) po odraze od LZ, ktoré má polohu a_1 bude v mieste prijímacej antény PA (bod B) interferovať s vlnou 1 (lúčom 1) postupujúcou v smere spojnice AB. Posúvaním LZ sa mení veľkosť dráhy, po ktorej postupuje vlna 2, takže sa bude meniť aj vzájomný fázový rozdiel týchto dvoch vln. Ak celkový fázový rozdiel bude mať hodnotu 2π , interferujú vlny do maxima. Ak je rovný nepárnej násobku $\pi/2$, interferujú uvažované vlny do minima. A tak pri posúvaní LZ v smere osi y môžeme na voltmetri pozorovať postupnosť maximálnych a minimálnych výchyliek voltmetra.

Keď bude LZ v polohe a_1 , pri ktorej prijímacie zariadenie zaznamená maximum, potom podľa obr.6 bude rozdiel geometrických dráh lúčov vyjadrený vzťahom

$$\vartheta_1 = \sqrt{(2a_1)^2 + b^2} - b . \quad (7)$$

Veličinu ϑ_1 určíme výpočtom podľa vzťahu (7) alebo graficky (obr.6). Úsečku b kružidlom preniesieme z bodu A na preponu trojuholníka AA'B. Po určení hodnoty ϑ_1 pri polohe LZ v mieste a_1 určíme hodnotu ϑ_2 pre novú polohu a_2 zodpovedajúcu ďalšiemu maximu prijímača.

Vlnovú dĺžku študovaných elektromagnetických vln určíme zo vzťahu

$$\lambda = \vartheta_2 - \vartheta_1 . \quad (8)$$

Poznamenajme, že fázový posuv pri odraze na Lloydovom zrkadle sa pri výpočte rozdielu $\vartheta_2 - \vartheta_1$ ruší. Postup opakujeme pre ďalšie hodnoty detekovaných maxim. Z nameraných hodnôt určíme priemernú hodnotu vlnovej dĺžky.

Úlohy:

Zmerajte vlnovú dĺžku elektromagnetických vln vyžarovaných vysielacou anténou s využitím Lloydovho zrkadla.

Spracovanie výsledkov:

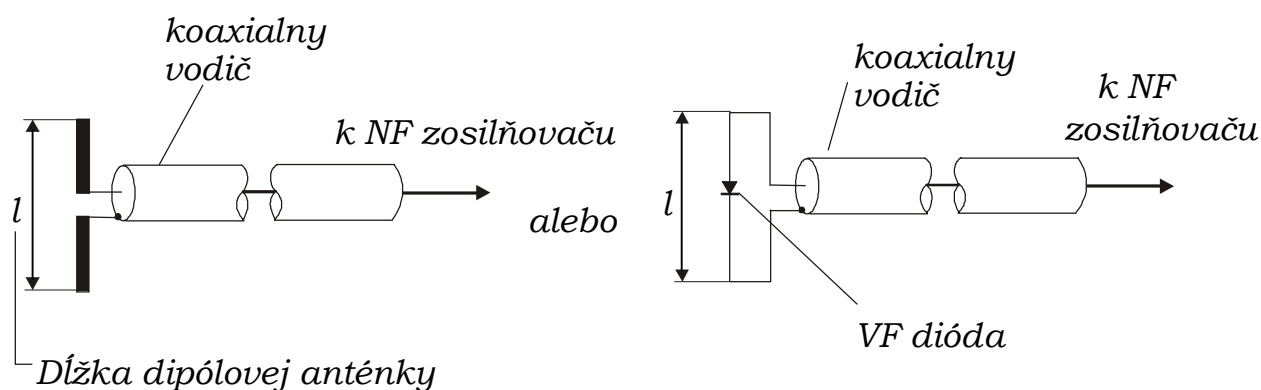
Pomocou Lloydovho zrkadla so stupnicou na lište kolmou k smeru VA a PA základnej dosky stanovíme polohy a_i , t. j. a_1, a_2, \dots pre hodnoty detekčného napätia U_{imax} a U_{imin} v miestach interferenčných maxím a miním. Získané výsledky zapíšeme do tabuľky.

	$b = \dots$				
i	1	2	3	4	
U_{imax} [mV]					
U_{imin} [mV]					
a_i [m]					
ϑ_i	ϑ_1	ϑ_2	ϑ_3	ϑ_4	
λ_i [cm]	$\lambda_1 = \vartheta_2 - \vartheta_1$		$\lambda_2 = \vartheta_3 - \vartheta_2$		....

Po stanovení veličín ϑ_i určíme podľa vzťahu (8) vlnovú dĺžku. Výsledok porovnajte s predchádzajúcou metódou.

D. ŠTÚDIUM POLARIZÁCIE ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN

Táto časť má okrem iného demonštračný charakter. Základnou úlohou bude stanoviť rovinu polarizácie elektromagnetickej vlny, ktorú vyžaruje „lieviková“ anténa. Najjednoduchšie rovinu polarizácie stanovíme malou dipólovou anténkou (obr. 7), v ktorej vlna indukuje maximálne napätie vtedy, keď je dipólová anténka natočená v smere vektora \vec{E} elektromagnetickej vlny. Ak bude anténka natočená na vektor \vec{E} kolmo, indukované napätie je nulové. Smer šírenia vlny je v experimente známy a je daný osou lievikovej vysielacej antény.



Obr. 7

Polarizačné stavy elektromagnetickej vlny je možné tiež študovať s použitím polarizačných filtrov. Polarizačný filter pre pásmo centimetrových vln je realizovaný ako sústava rovnobežných tenkých vodičov ležiacich v rovine, napr. uchytených v kruhovom dielektrickom ráme, ktorých vzdialenosť je menšia ako polovica vlnovej dĺžky elektromagnetickej vlny. Takýto filter vkladáme jeho rovinou kolmo na smer šírenia elektromagnetickej vlny medzi vysielaciu a prijímaciu anténu.

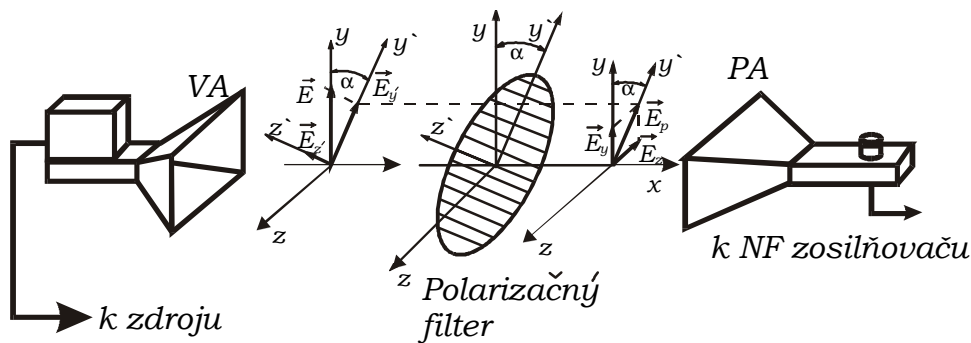
Fyzikálny princíp filtra spočíva na nasledovných zákonitostiach. Keď kovové vodiče filtra majú smer vektora intenzity elektrického poľa \vec{E} , t. j. smer polarizácie, indukujú sa v nich,

prostredníctvom elektrickej zložky poľa vo vlne, pozdĺžne elektrické prúdy. Tieto sú zdrojom sekundárnej elektromagnetickej vlny, šíriacej sa na obidve strany od roviny filtra s polarizáciou v smere kovových vodičov filtra. Táto sekundárna vlna má v rovine filtra opačnú fázu ako vlna, ktorá ju vyvolala (tj. vlna dopadajúca na filter). V pôvodnom smere šírenia sa teda vlny interferenciou rušia, to znamená, že situácia sa nám javí tak, že filter neprepúšťa. V opačnom smere od filtra sa šíri vlna odrazená.

Ak sú vodiče filtra kolmé na smer polarizácie prijímacej (dopadajúcej vlny), nedochádza k vzniku indukovaných prúdov a teda ani ku vzniku sekundárnej elektromagnetickej vlny. Vlna z vysielacej antény sa potom šíri skoro bez jej zmeny, t. j. ako keby tam filter nebol.

Predstavme si, že na filtri existuje značka v smere osi y (obr. 9), ktorá bude reprezentovať rovinu priepustnosti filtra, t. j., že filter dopadajúcu vlnu prepustí. Pootočíme filter tak, ako je to schematicky znázornené na obrázku, t. j. rovina priepustnosti je pootočená o uhol α . Analyzujeme teraz situáciu teda so šikmo pootočeným filtrom.

Je možné ukázať, že každá rovinne polarizovaná vlna je ekvivalentná superpozícii dvoch rovinne polarizovaných vln, ktorých roviny polarizácie sú na seba kolmé. Schématicky je tento prípad znázornený na obr. 8 (pozri vektor \vec{E} , \vec{E}_y , \vec{E}_z).



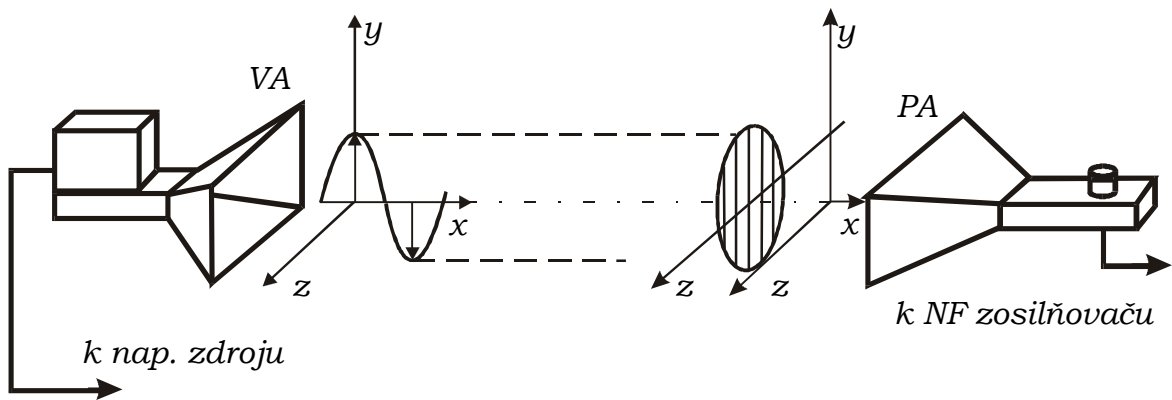
Obr. 8

Pre vektor intenzity elektrického poľa \vec{E} môžeme písať $\vec{E} = \vec{E}_y + \vec{E}_z$. Pretože \vec{E}_y je kolmé na vodiče filtra, zodpovedá vlne, ktorá cez filter prejde. Vektor \vec{E}_z je rovnobežný so smerom kovových vodičov filtra, teda zodpovedá vlne, ktorá cez filter neprejde. Za filtrom sa objaví vlna, v ktorej vektor $\vec{E}_y = \vec{E}_p$ bude mať napr. v okamihu t_2 smer osi y' . Túto si tiež môžeme predstaviť ako superpozíciu dvoch vln, ktoré sú v okamihu t_2 reprezentované vektormi \vec{E}_y a \vec{E}_z . Signál zodpovedajúci prešlej vlne detekujeme prijímacím zariadením (prijímačom). Vplyv polarizačného filtra môžeme teda chápať tak, ako keby filter natočil rovinu polarizácie o uhol α . Matematicky situáciu popíšeme nasledovne

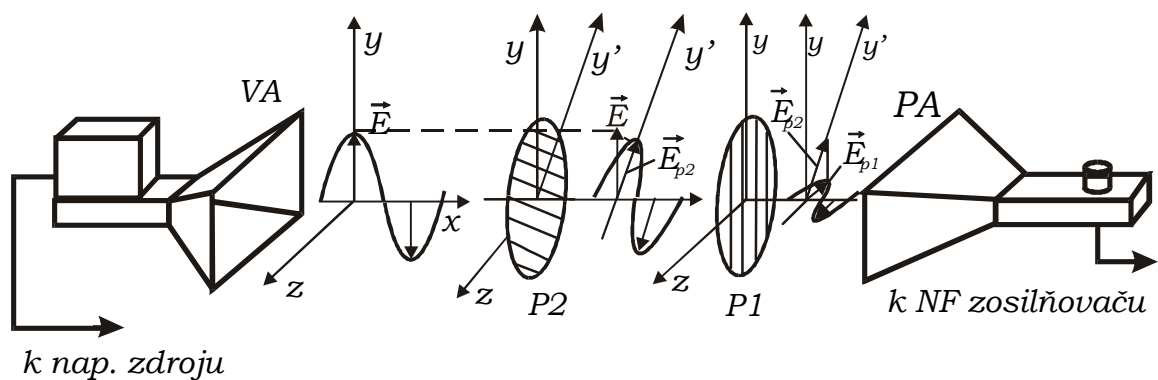
$$E_p = E_y = E \cos \alpha . \quad (6)$$

Tento vzťah vyjadruje veľkosť vektora intenzity E_p prešlej vlny v závislosti od natočenia filtra daným uhlom α , keď na filter dopadala kolmo vlna reprezentovaná veľkosťou vektora intenzity elektrického poľa E . Vidíme, že napr. pre $\alpha = \frac{\pi}{2}$ je $E_p = 0$. Ďalej tiež hustota žiarivého toku je daná vzťahom

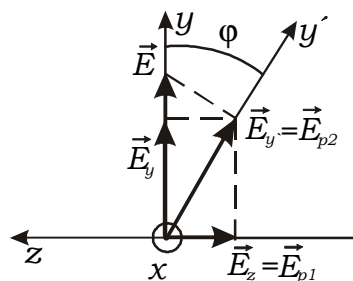
$$I_p = I \cos^2 \alpha . \quad (7)$$



a)



b)



os x je kolmá na nákresňu (smeruje k nám)

c)

Obr.9.

Predstavme si ďalej, že polarizačný filter podľa predchádzajúceho natočíme tak, aby prijímač nedetekoval žiadny signál (t. j. je to vtedy, keď kovové vodiče filtra majú smer osi y) obr.9a. Ak vsunieme medzi vysielačnú anténu a prvý filter, ktorý označíme $P1$, druhý filter $P2$, ale tak, aby jeho rovina maximálnej priepustnosti zvierala s rovinou x, y uhol α , napr. 45° , zistíme, že prijímač bude detekovať nenulový signál menší, aký by bol, keby medzi vysielačnou a prijímacou anténou nebol žiadny filter. Situácia je schematicky znázornená na obr. 9b.

Všimnime si, že vertikálne polarizovaná vlna (smer ϕ), ktorej zodpovedá na obr. 9a,b vektor \vec{E} , po dopade na filter v zmysle vyššie uvedeného generuje vlnu, ktorej zodpovedá vektor

$\vec{E}_{y'} = \vec{E}_{p2}$. (obr. 9b, c). Tu si vieme predstaviť ako superpozíciu reprezentovanú dvomi na seba kolmými rovinné polarizovanými vlnami, ktorým zodpovedajú vektory elektrickej intenzity \vec{E}_{py} a $-\vec{E}_{pz} = -\vec{E}_{p1}$. Filter P1 je však pre zložku \vec{E}_{py} nepriepustný. Filtrom P1 prejde vlna, ktorej zodpovedá polarizácia \vec{E}_{pz} a túto detekuje prijímač aparatury. Tento experiment dokazuje, že elektromagnetické vlny sú vlny priečne, že intenzita elektrického poľa v elektromagnetickej vlne je vektor, a navyše je kolmý na smer šírenia. Pre pozdĺžne vlny nič podobné nie je možné.

Uvedené experimenty je možné realizovať efektne aj s optickými polarizačnými filtermi používanými vo fotografii, keď ako zdroj svetla použijeme laser, ktorý má polarizované svetlo, alebo jedným (tretím filtrom) filtrom svetlo polarizujeme.

Úlohy:

1. Vyššie popísanou metódou určte rovinu polarizácie elektromagnetických vln vyžarovaných vysielacou anténou.
2. Presvedčte sa vyššie uvedeným postupom, že generované vlny sú vlny priečne.
3. Využitím polarizačného filtra overte vzťah $I_p = I \cos^2 \alpha$ resp. $U_p = U \cos^2 \alpha$, kde U je napätie na voltmetri prijímača, keď elektromagnetická vlna postupuje v smere osi x bez zaradeného polarizačného filtra.

Spracovanie výsledkov:

Zasunte polarizačný filter do držiaka D4 (obr.3) tak, aby bol kolmý na spojnicu prijímacia anténa – vysielacia anténa. Získanú závislosť detekovaného signálu od uhla natočenia filtra zapíšte do tabuľky:

i	1	2	3	...
$\alpha [^\circ]$				..
U_p [mV]				...

Získanú závislosť vyneste graficky. Súčasne zistite, či platí vzťah $U_p = U \cos^2 \alpha$ analogicky vzťahu (7) t. j. $I_p = I \cos^2 \alpha$.

Kontrolne otázky:

1. Vysvetlite vlnovú rovnicu pre elektromagnetické vlny.
2. Viete vypočítať rýchlosť elektromagnetických vln šíriacich sa vo vákuu?
3. Aké riešenie má vlnová rovnica pre prípad rovinatej harmonickej vlny?
4. Vysvetlite vzťah (6).
5. Čo je to fáza vlny?
6. Čo je to vlnový vektor a čo vlnové číslo?
7. Nakreslite schematicky model rovnice harmonickej elektromagnetickej vlny a smery vektorov \vec{E} , \vec{B} , \vec{k} .
8. Za akých podmienok vzniká stojatá vlna?
9. Viete vysvetliť vznik maxím a miním v stojatej vlne?
10. Vysvetlite princíp merania vlnovej dĺžky elektromagnetickej vlny.
11. Čo je to polarizácia elektromagnetických vln?
12. Vysvetlite, ako je možné určiť polarizačnú rovinu rovinatej harmonickej vlny.