

---

# Vyšetrovanie elektromagnetických vln

## Teoretický úvod

Okrem mechanického vlnenia v prírode (vlny na vodnej hladine, zvuk, ...) je významným druhom vlnenia elektromagnetické vlnenia, teda vlny elektromagnetického poľa. Jeho existenciu teoreticky dokázal anglický fyzik J.C.Maxwell na základe všeobecných rovníc elektromagnetického poľa, experimentálne bola existencia elektromagnetických vln potvrdená nemeckým fyzikom Hertz-om v roku 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 v tvare

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

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

Vzťahy (1), (2) platia pre vektory  $\vec{E}$  a  $\vec{B}$  v neohraničenom homogénnom izotropnom prostredí, kde  $t$  je časová premenná,  $\varepsilon$  je dielektrická konštanta – *permeabilita* prostredia a  $\mu$  je *magnetická permitivita* prostredia,  $\Delta$  je Laplaceov operátor.

Rovnice (1) a (2) majú tvar *vlnovej rovnice*

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

odkiaľ porovnaním s rovnicami (1) a (2) dostávame

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

Odtiaľ vidíme, že pre rýchlosť svetla vo vákuu platí

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \doteq 300000 \text{ km.s}^{-1} \quad (5)$$

V rovnici (3) je  $u$  výchylka ako funkcia polohy a času v danom prostredí, v ktorom sa vlny šíria, pričom

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

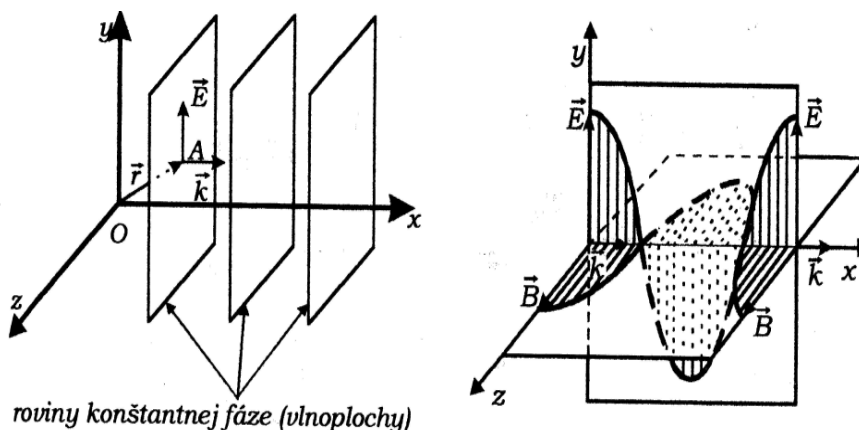
Uvedená skutočnosť, daná vzťahom (5) bola pre Maxwella východiskom k tvrdeniu, že svetlo je vlnenie elektromagnetického poľa. Okrem iného položil tým základ k výkladu optických javov na základe predstavy, že svetlo je elektromagnetické vlnenie s veľmi krátkou

vlnovou dĺžkou. ďalej je možné ukázať, že vlnové rovnice (1) a (2) pripúšťajú riešenie v podobe guľových, resp. rovinných monofrekvenčných vln. Potom napr. v neohraničenom homogénnom a izotropnom prostredí pre rovinnú vlnu 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  $t$ ,  $\omega = 2\pi f$  je uhlová frekvencia vlny ( $f$  je frekvencia),  $\vec{r}_0$  je jednotkový vektor v smere polarizácie vlny,  $E_0$  amplitúda vlny v danom mieste a čase,  $\vec{k}$  je vlnový vektor v smere šírenia vlny (jeho veľkosť  $k = 2\pi/\lambda$  nazývame vlnové číslo,  $\lambda$  je vlnová dĺžka). Výraz  $\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}$  vo vzťahu (6) predstavuje fázu vlny. Schématicky 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 fázy (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  $t$ , teda vlnový stav rovinatej harmonickej vlny danej vzťahom (6). V našom prípade sa vlna šíri v smere osi  $x$  a vlnoplochy sú rovnobežné s rovinou  $y, z$ .



obr. 1

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 schématicky znázornené na obr. 2.

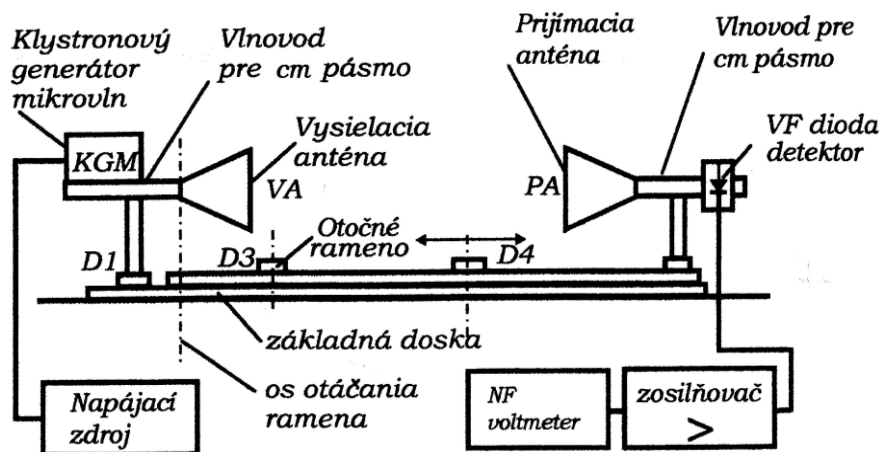
Ak sa veľkosť vektora  $\vec{E}$  mení v čase v rovine  $x, y$  hovoríme, že vlna je lineárne polarizovaná. Obecnne môže vektor  $\vec{E}$  meniť svoj smer, resp. koncový bod vektora  $\vec{E}$  vytvárať v čase a priestore skrutkovicu na povrchu valca alebo eliptického valca, potom hovoríme o kruhovej alebo eliptickej polarizácii elektromagnetickej vlny. Vlna znázornená na obr. 2 znázorňuje rovinnú harmonickú vlnu šíriacu sa v smere osi  $x$ , ktorá je polarizovaná v rovine  $x, y$ . Rovinu  $x, y$  nazývame rovinou polarizácie. Rovinná polarizácia je teda určená smermi vektorov  $\vec{E}$  a  $\vec{k}$ .

Ďalej sa budeme zaoberať vyšetrovaním smerovej charakteristiky antény ako zdroja

elektromagnetických vln, určením vlnovej dĺžky elektromagnetickej vlny a štúdiom polari-  
zácie elektromagnetickej vlny.

## Náčrt a popis meracieho zariadenia

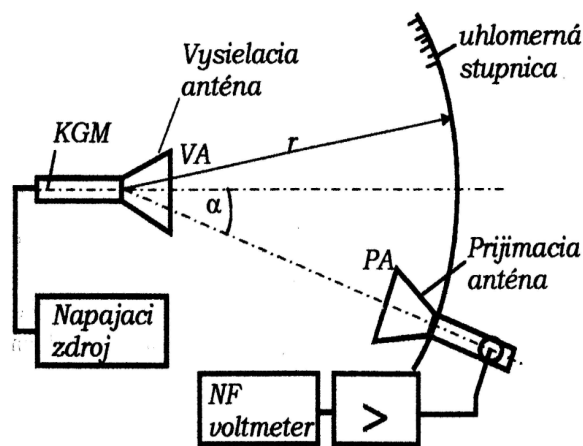
Principiálne usporiadanie meracej aparatury je znázornené na obr. 3. základom meracej  
aparatury je zdroj, vysielateľ elektromagnetických vln s frekvenciou cca 10 GHz ( $\lambda = 3$   
cm, rádiové vlny). Zdrojom je mikrovlnná elektrónka nazývaná reflexný klystrón, z kto-  
rej krátka anténa siaha otvorom do obdĺžnikového vlnovodu trojcentimetrového pásma,  
ktorý je zakončený lievikovitou anténou tvaru ihlana s obdĺžnikovou základňou. Budená  
elektromagnetická vlna s vlnovou dĺžkou cca  $\lambda = 3$  cm sa šíri od vysielanej antény do  
priestoru smerom k prijímacej anténe rovnakého tvaru a tých istých rozmerov. Vo vlnov-  
ode príjmovej antény ja v špeciálnom držiaku zasunutá vf mikrovlnná dióda, z ktorej  
detekovaný signál privádzame prostredníctvom koaxiálneho vodiča na vstup zosilňovača a  
ďalej na nízkofrekvenčný voltmeter. Vysokofrekvenčný signál generátora je modulovaný im-  
pulsným spôsobom s frekvenciou 1 kHz, čo umožňuje po detekcii detekovaný signál zosilniť  
nízkofrekvenčným zosilňovačom a použiť nízkofrekvenčný voltmeter.



obr. 3

## Určenie vyžarovacieho diagramu antény

Poznamenajme, že lievnikové antény majú tú vlastnosť, že elektromagnetickú vlnu vyžarujú len do určitého priestorového uhla. Horeuvedená zostava nám umožňuje študovať vyžarovací diagram, napr. vysielačnej antény VA tým, že prijímacia anténa PA uchytená v držiaku  $D_2$  (obr. 2) sa spolu s otočným ramenom môže otáčať okolo zvislej osi. Na obr. 4 máme schématicky znázornenú situáciu pri pohľade zhora.



obr. 4

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

### Úloha

Namerajte vyžarovací diagram vysielačnej antény.

### Spracovanie výsledkov

Hodnoty detekovaného napätia signálu na voltmetri prijímacej časti aparatury v závislosti od uhla natočenia ramena s prijímacou anténou doporučujeme zapisovať do nasledujúcej tabuľky. Merajte v smere kladných aj záporných uhlov. Grafickú závislosť smerovej charakteristiky vyneste na milimetrový papier v polárnych súradniciach. Na os x vyneste relatívne  $U/U_{\max}$  ( $U_{\max}$  je maximálne napätie pri  $\alpha = 0$ ), čo zodpovedá podľa (7) relatívnej hustote žiarivého toku  $I/I_{\max}$ .

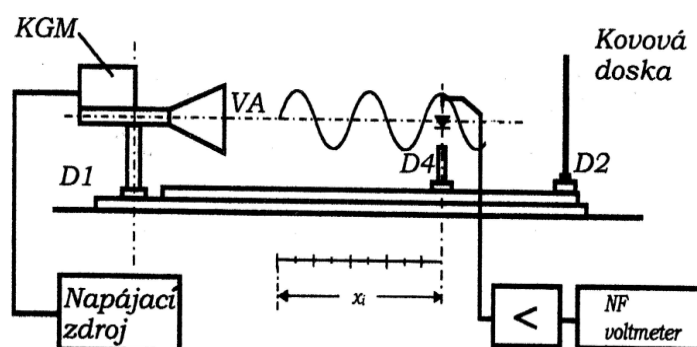
i	1	2	3	...	...	...
$\alpha, ^\circ$	0	2,5	5	...	...	...
$U, \text{mV}$	...	...	...	...	...	...
$U/U_{\max}$	...	...	...	...	...	...

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

## Určenie vlnovej dĺžky stojatej elektromagnetickej vlny

Stojaté vlnenie vzniká ako dôsledok interferencie dvoch oproti sebe postupujúcich vln rovnakej frekvencie, amplitúdy a povahy. Aby sme takúto situáciu realizovali, necháme vlnu

vyžarovanú vysielacou anténou VA dopadať na kovovú dosku, ktorú umiestnime kolmo na smer šírenia vlny 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 (alebo v miestach minimálnej amplitúdy). polohu detekčnej diódy v smere kolmice na kovovú dosku určujeme na meradle, ktoré je súčasťou základnej dosky. Z rozdielu jednotlivých polôh určíme vlnovú dĺžku stojatej elektromagnetickej vlny (pozri spracovanie výsledkov). Usporiadanie aparátúry je schématicky znázornené na obr. 5.



obr. 5

## Úlohy

Zmerajte vlnovú dĺžku elektromagnetických vln vyžarovaných vysielacou 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 nasledujúcich tabuliek.

i	1	2	3	4	5	6		
$U_{\max}$ , mV								
$U_{\min}$ , mV								

$x_i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$		
$\lambda_i$ , cm	$\lambda_1 = x_3 - x_1$		$\lambda_2 = x_4 - x_2$		$\lambda_3 = x_5 - x_3$			$\lambda_{\max}$
$\lambda_i$ , cm								$\lambda_{\min}$
$\Delta\lambda_i$								$\sum \Delta\lambda_i$
$(\Delta\lambda_i)^2$								$\sum (\Delta\lambda_i)^2$

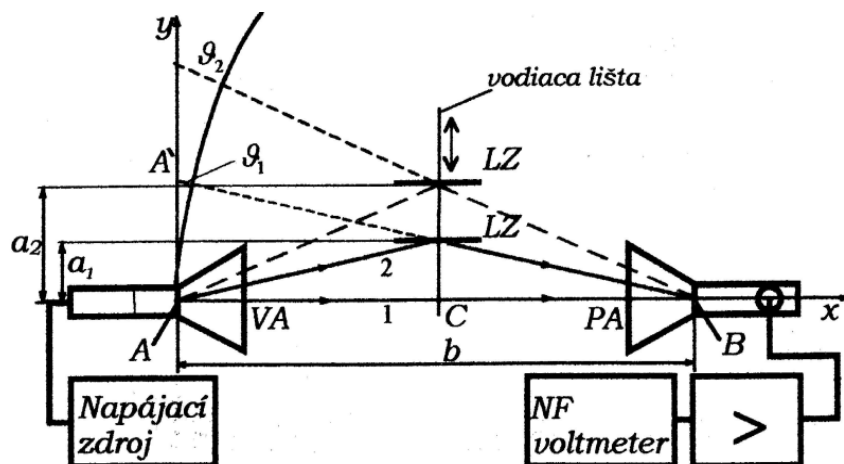
Stanovte strednú kvadratickú chybu podľa vzťahu

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

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

## Určenie vlnovej dĺžky Lloydovým zrkadlom

Usporiadanie aparatury znázornené na obr. 6 predstavuje pohľad zhora.



obr. 6

V smere osi vysielacej antény VA do vzdialenosti  $b$  umiestnime prijimaciu anténu PA s detekčným zariadením. Nízko-frekvenčný voltmetr 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 (obr. 6). Vlny z vysielacej 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  $2\pi$ , interferujú vlny do maxima, ak je rovný nepárnej násobku  $\pi/2$ , interferujú vlny do minima. Ak pri posúvaní LZ v smere osi  $y$  môžeme na voltmetri pozorovať postupnosť maximálnych a minimálnych výchýliek voltmetra.

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

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

Veľičinu  $\vartheta_1$  určíme výpočtom podľa vzťahu (7) alebo graficky (obr. 6). Úsečku  $b$  kružidlom preniesieme z bodu A na preponu trojuholníka AA'B. Po určení hodnoty  $\vartheta_1$  pri polohe LZ v mieste  $a_1$  určíme hodnotu  $\vartheta_2$  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 posun pri odraze na Lloydovom zrkadle sa pri výpočte rozdielu  $\vartheta_2 - \vartheta_1$  ruší. Postup opakujeme pre ďalšie hodnoty detekovaných maxím. Z nameraných hodnôt určíme priemernú hodnotu vlnovej dĺžky.

## Úlohy

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

## Spracovanie výsledkov

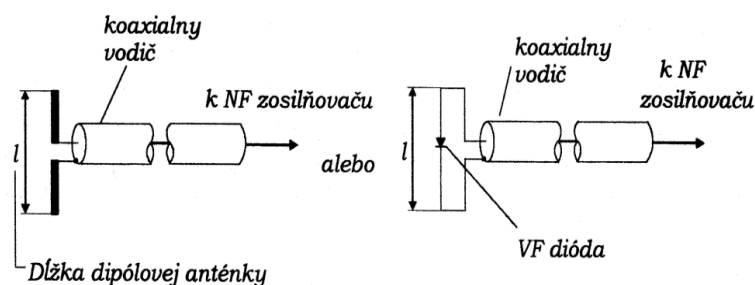
Pomocou Lloydovho zrkadla so stupnicou na lište kolmou k smeru VA a PA základnej dosky stanovíme polohy  $a_i$ . Pre hodnoty detekčného napätia  $U_{i\max}$ ,  $U_{i\min}$  v miestach interferenčných maxím a miním. Získané výsledky zapíšeme do tabuľky.

	$b = \dots$			
$i$	1	2	3	4
$U_{\max}$ , mV				
$U_{\min}$ , mV				
$a_i$ , cm				
$\vartheta_i$	$\vartheta_1$	$\vartheta_2$	$\vartheta_3$	$\vartheta_4$
$\lambda_i$ , cm	$\lambda_1 = \vartheta_2 - \vartheta_1$		$\lambda_1 = \vartheta_2 - \vartheta_1$	
				...

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

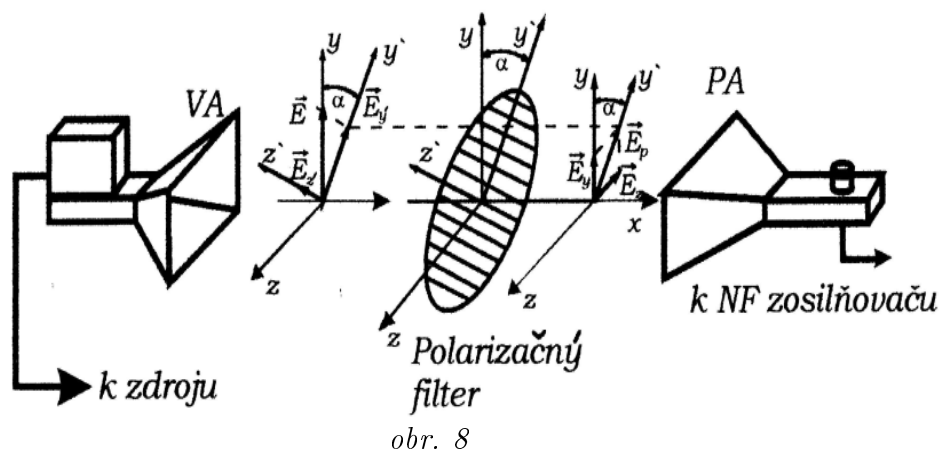
## Štúdium polarizácie elektromagnetických vln

Táto časť má okrem iného demonštračný charakter. Základnou úlohou bude stanoviť rovinu polarizácie elektromagnetickej vlny, ktorú vyžaruje lieviová 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  $\vec{E}$  kolmo, vtedy je indukovaná napätie nulové. Smer šírenia vlny je v experimente známy a je daný osou lieviovkej vysielacej antény.



obr. 7

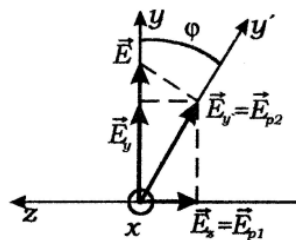
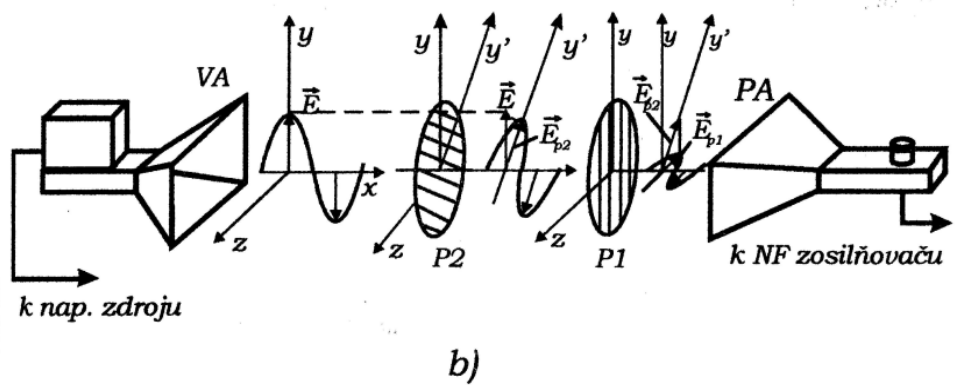
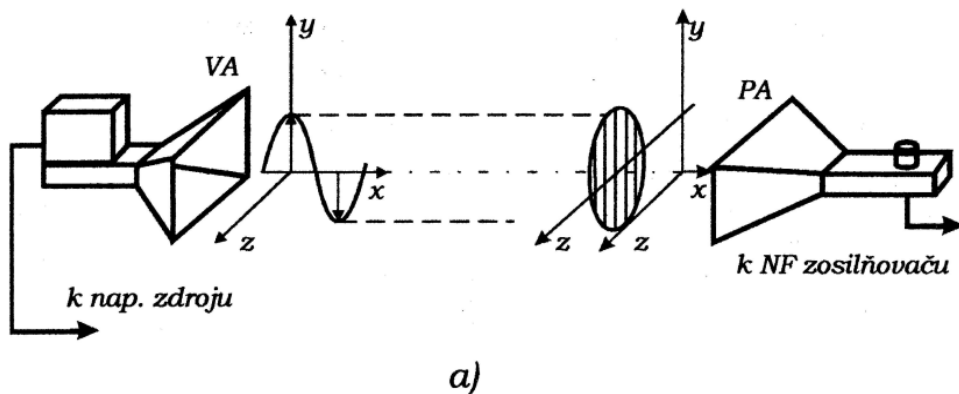
Polarizačné stavy elektromagnetickej vlny je možné tiež študovať s použitím polarizačných filtrov. polarizačný filter pre pásmo centimetrových vln je realizovaný ako sústava rovnobežných tenkých vodičov ležiacich v rovine, napr. uchytených v kruhovom dielektrickom ráme, ktorých vzdialenosť je menšia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



Fyzikálny princíp spočíva na nasledovných zákonitostiach. Keď kovové vodiče filtra majú smer vektora intenzity elektrického poľa  $\vec{E}$ , teda smer polarizácie, indukujú sa v nich prostredníctvom elektrickej zložky poľa vo vlně 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 (t.j. 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 k vzniku sekundárnej elektromagnetickej vlny. Vlna z vysielacej antény sa potom šíri skoro bez jej zmeny, t.j. ako by tam filter ani nebol.





os x je kolmá na nákresňu (smeruje k nám)

c)

obr. 9

Predstavme, si že na filtri existuje značka v smere osi  $y$  (obr. 9), ktorá bude reprezentovať rovinu priepustnosti filtra, teda filter dopadajúcu vlnu prepustí. Pootočme filter tak, ako je to schématicky znázornené na obrázku, rovina priepustnosti bude pootočená o uhol  $\alpha$ . Analyzujme teraz situáciu so šikmo pootočeným filtrom.

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

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 neprejde. Vektor  $\vec{E}_z$  je rovnobežný so smerom kovoých 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 čase  $t_2$  reprezentované vektormi  $\vec{E}_y$  a  $\vec{E}_z$ . Signál zodpovedajúci prešlej vlne detekujeme prijímacím zariadením (prijímačom). Vplyv polarizačného filtra môžeme chápať tak, ako keby filter natočil rovinu polarizácie o uhol  $\alpha$ . Matematicky situáciu popíšeme nasledovne

$$E_p = E_{y'} = E \cos \alpha \quad (9)$$

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

$$I_p = I \cos^2 \alpha \quad (10)$$

Predstavme si ďalej, že polarizačný filter podľa predchádzajúceho natočíme tak, aby prijímač nedetekoval žiadny signál (vodiče filtra majú vtedy smer osi  $y$  – obr. 9a). Ak vsunieme medzi vysielaciu anténu a prvý filter, označme ho P1, druhý filter P2, tak, aby jeho rovina maximálnej priepustnosti zvierala s rovinou  $x, y$  uhol  $\alpha$ , napr.  $45^\circ$ , zistíme, že prijímač bude detekovať nenulový signál menší, aký by bol, keby medzi vysielacou a prijímacou anténou nebol žiadny filter. Situácia je schématicky znázornená na obr. 9b.

Všimnime si, že vertikálne polarizovaná vlna (smer  $\varphi$ ), ktorej zodpovedá na obr. 9a, 9b vektor  $\vec{E}_z$ , po dopade na filter v zmysle vyššie uvedenom, generuje vlnu, ktorej zodpovedá vektor  $\vec{E}_{y'} = \vec{E}_{p2}$  (obr. 9b, 9c). Tu si vieme predstaviť ako superpozíciu reprezentovanú dvomi na seba kolmými rovinne 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, a že intenzita elektrického poľa v elektromagnetickej vlne je vektor 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 fotografickej technike, keď ako zdroj svetla použijeme laser, ktorý má polarizované svetlo, alebo jedným (tretím filtrom) svetlo polarizujeme.

## Úlohy

1. Vyššie popísanou metódou určte rovinu polarizácie elektromagnetických vln vyžarovaných vysielacou anténou.
2. Presvedčte sa vyššie uvedeným spôsobom, že generované vlny sú priečne vlny.
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

Zasuňte 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 nasledujúcej tabuľky.

$i$	1	2	3	...
$\alpha, ^\circ$				...
$U_p, \text{mV}$				...

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

### Kontrolné otázky

1. Vysvetlite vlnovú rovnicu pre elektromagnetické vlny.
2. Viete vypočítať rýchlosť šírenia sa elektromagnetických vln vo vákuu?
3. Aké riešenia má vlnová rovnica pre prípad rovinnej harmonickej vlny?
4. Vysvetlite vzťah (6).
5. Čo je to fáza vlny?
6. Čo je to vlnový vektor a čo vlnové číslo?
7. Nakreslite schématicky 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. Čo je to polarizácia elektromagnetických vln?
11. Vysvetlite, ako je možné určiť polarizačnú rovinu rovinnej harmonickej vlny.