

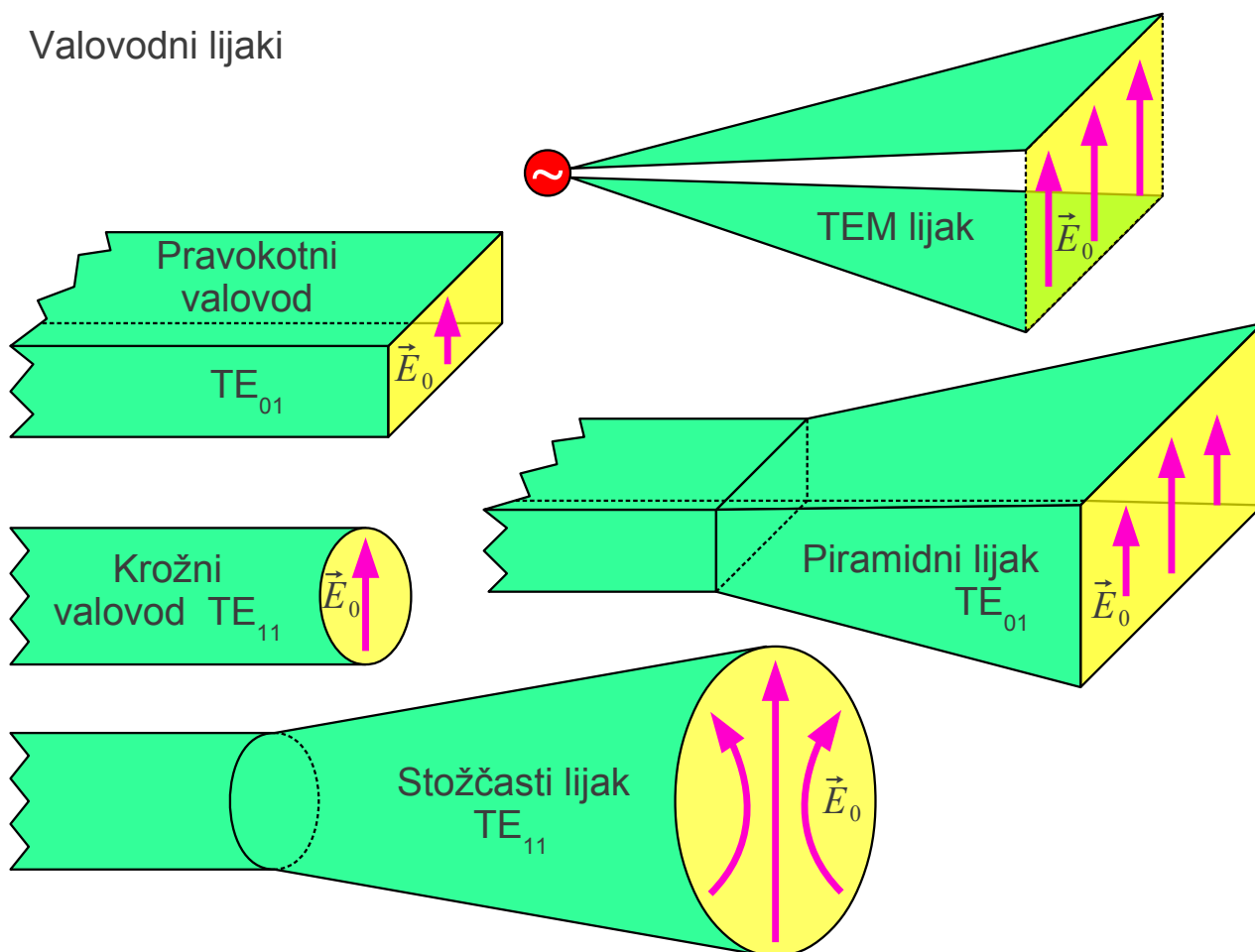
## 8. Valovodni lijaki

Valovodni lijaki (angleško: waveguide horn) sodijo med najpreprostejše usmerjene antene. Osnova je električni prenosni vod, kjer sta električno polje in magnetno polje med sabo približno pravokotna  $\vec{E} \perp \vec{H}$  in v razmerju

$E/H \approx Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  valovne impedance praznega prostora. Prečne izmere prenosnega voda lijak počasi razširi, da postanejo primerljive oziroma večje od valovne dolžine. Odboj na odprtini lijaka je tedaj majhen, večina valovanja nadaljuje pot v prazen prostor.

Valovodni lijaki so nezahtevne antene za telebane. Skoraj vsaka kovinska trobenta je povsem uporabna usmerjena antena v določenem frekvenčnem pasu. Najpreprostejša antena je trakasti TEM (prečno električno in magnetno polje brez vzdolžnih komponent) dvovod, razširjen v TEM lijak. Sevalne lastnosti TEM lijaka kazi neskončno veliko stresano elektromagnetno polje, ki ni omejeno na prostor med trakastima vodnikoma:

Valovodni lijaki

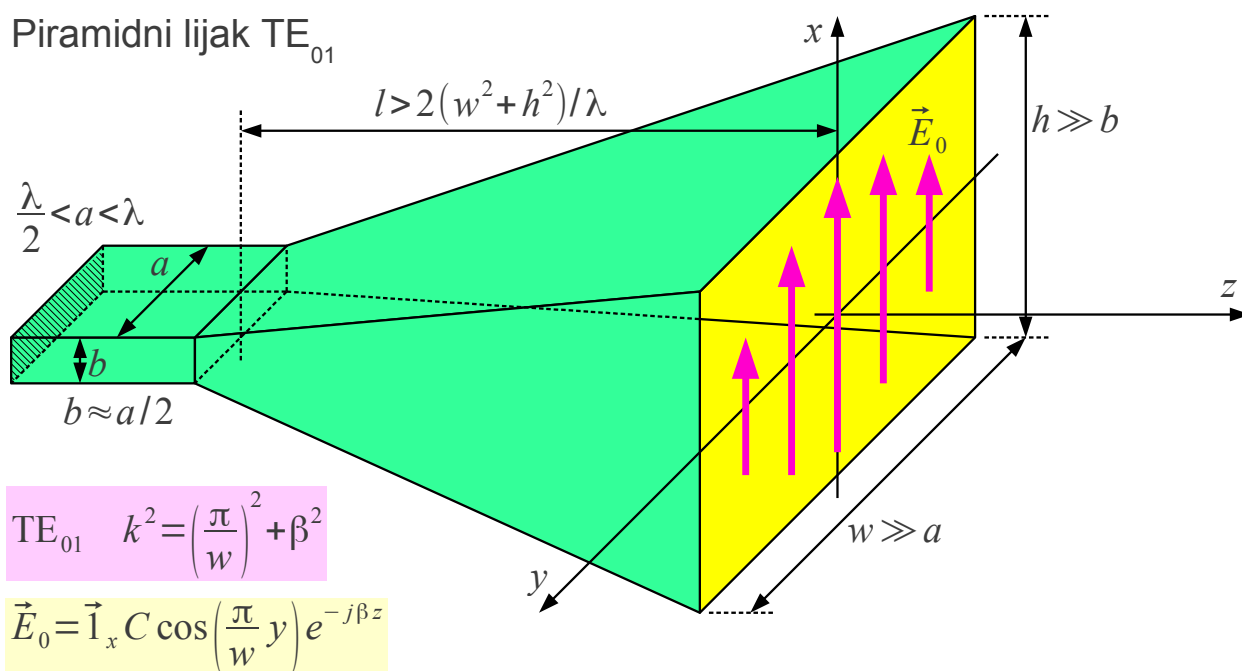


Sevalne lastnosti antene lažje nadziramo z lijaki iz prenosnih vodov, kjer

je elektromagnetno polje omejeno na notranjost voda. Koaksialni kabel lahko odpremo v bikonično anteno. Različne kovinske valovode: pravokotni, krožni, eliptični, grebenasti lahko razširimo v učinkovite lijake. Prve valovodne lijake je izdelal in uspešno uporabil v svojih poskusih z mikrovalovi že Jagadish Chandra Bose leta 1897.

Povsem uporabna antena je že odrezani konec valovoda pravokotnega oziroma krožnega prereza. Ker so prečne izmere kovinskega valovoda, v katerem se razširja osnovni rod  $TE_{01}$  (pravokotni) oziroma  $TE_{11}$  (krožni), primerljive z valovno dolžino, je odbojnost odrezanega konca valovoda običajno manjša od  $\Gamma_{dB} = 20 \log_{10} |\Gamma| < -10 \text{ dB}$ . Če pravokotni oziroma krožni valovod razširimo v piramidni oziroma stožčasti lijak, postane odbojnost odprtega konca zanemarljivo majhna.

Učinkovita antena zahteva enakomerno in sofazno osvetljeno odprtino. Blag prehod iz valovoda v lijak zagotavlja, da ne vzbudimo višjih valovodnih rodov. Majhno napako faze zagotavlja lijak, daljši od  $l > 2(w^2 + h^2)/\lambda$ . Rayleighove razdalje:



$$\vec{H}_0 = \frac{j}{k Z_0} \text{rot } \vec{E}_0 = \vec{1}_y \frac{\beta C}{k Z_0} \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right) e^{-j\beta z} + \vec{1}_z \frac{jC \pi}{k Z_0 w} \sin\left(\frac{\pi}{w} y\right) e^{-j\beta z}$$

$$k \gg \frac{\pi}{w} \rightarrow \beta \approx k, H_{0z} \ll H_{0y} \quad \vec{E}_0 \approx \vec{1}_x C \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right) e^{-jkz} \quad \vec{H}_0 \approx \vec{1}_y \frac{C}{Z_0} \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right) e^{-jkz}$$

Elektromagnetno polje osnovnega rodu  $TE_{01}$  v pravokotnem valovodu z

ima prečno komponento električnega polja  $E_{0x}$  ter prečno  $H_{0y}$  in vzdolžno  $H_{0z}$  komponenti magnetnega polja. Ko pravokotni valovod razširimo v piramidni lijak  $w \gg a$  in  $h \gg b$ , postane vzdolžna komponenta magnetnega polja  $H_{0z} \gg H_{0y}$  zelo majhna v primerjavi s prečno komponento. Elektromagnetno polje na odprtini piramidnega lijaka približno ustreza ravninskemu valu  $E_{0x}$  in  $H_{0y}$ .

Sevanje piramidnega lijaka računamo kot vsoto Huygensovih izvorov. Porazdelitev polja na odprtini dolgega in položnega lijaka  $\vec{E}_0(x, y, z=0)$  ustreza povečani sliki polja v pravokotnem valovodu: konstantna porazdelitev v ravnini E in kosinusna porazdelitev  $\cos(\pi y/w)$  v ravnini H:

Sevanje piramidnega lijaka

$$\vec{E}_0(x, y, z=0) \approx \vec{1}_x C \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right)$$

$$\vec{E} \approx (\vec{1}_\Theta \cos \Phi - \vec{1}_\Phi \sin \Phi) \frac{jC}{2\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} (1 + \cos \Theta) \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-w/2}^{w/2} \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right) e^{jkx \cos \Theta_x} e^{jky \cos \Theta_y} dx dy$$

$$I_x = \int_{-h/2}^{h/2} e^{jkx \cos \Theta_x} dx = \frac{e^{\frac{jkh}{2} \cos \Theta_x} - e^{-\frac{jkh}{2} \cos \Theta_x}}{jk \cos \Theta_x} = h \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \cos \Theta_x\right)}{\frac{kh}{2} \cos \Theta_x}$$

$$\begin{aligned} \cos \Theta_x &= \sin \Theta \cos \Phi \\ \cos \Theta_y &= \sin \Theta \sin \Phi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_y &= \int_{-w/2}^{w/2} \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right) e^{jky \cos \Theta_y} dy = \int_{-w/2}^{w/2} \frac{1}{2} \left[ e^{j\left(k \cos \Theta_y + \frac{\pi}{w}\right)y} + e^{j\left(k \cos \Theta_y - \frac{\pi}{w}\right)y} \right] dy = \\ &= w \left[ \frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \cos \Theta_y + \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{kw}{2} \cos \Theta_y + \frac{\pi}{2}} + \frac{\sin\left(\frac{kw}{2} \cos \Theta_y - \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{kw}{2} \cos \Theta_y - \frac{\pi}{2}} \right] = \left(\frac{w}{\pi/2}\right) \frac{\cos\left(\frac{kw}{2} \cos \Theta_y\right)}{1 - \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \left(\frac{kw}{2} \cos \Theta_y\right)^2} \end{aligned}$$

$$\vec{E} \approx (\vec{1}_\Theta \cos \Phi - \vec{1}_\Phi \sin \Phi) \frac{jCwh}{\lambda \pi/2} \frac{e^{-jkr}}{r} \frac{1 + \cos \Theta}{2} \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \cos \Theta_x\right)}{\frac{kh}{2} \cos \Theta_x} \frac{\cos\left(\frac{kw}{2} \cos \Theta_y\right)}{1 - \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \left(\frac{kw}{2} \cos \Theta_y\right)^2}$$

Integracija po odprtini lijaka se preprosto razcepi na integracijo v smeri  $x$ , ki daje odvisnost sevanja od  $\cos \Theta_x$  v ravnini E in na integracijo v smeri  $y$ , ki daje odvisnost od  $\cos \Theta_y$  v ravnini H. Sam Huygensov izvor dodaja odvisnost  $1 + \cos \Theta$ . Če normiramo smerni diagram

$F(\Theta_{MAX}=0)=1$ , je končni rezultat sorazmeren  $Cwh/(\pi/2)$ .

Kosinusna porazdelitev v ravnini H dodaja faktor  $\pi/2$  v imenovalcu.

Smerni diagram zapišemo v običajnih krogelnih koordinatah  $(r, \Theta, \Phi)$  s tečajem v osi  $z$  v smeri največjega sevanja. Zapis smernega diagrama  $F(\Theta, \Phi)$  se zelo poenostavi v ravnini E  $\Phi=0$  oziroma v ravnini H  $\Phi=\pi/2$  :

$$F(\Theta, \Phi) = \frac{1 + \cos \Theta}{2} \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin \Theta \cos \Phi\right)}{\frac{kh}{2} \sin \Theta \cos \Phi} \frac{\cos\left(\frac{kw}{2} \sin \Theta \sin \Phi\right)}{1 - \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \left(\frac{kw}{2} \sin \Theta \sin \Phi\right)^2}$$

$$F(\Theta, \Phi=0) = \frac{1 + \cos \Theta}{2} \frac{\sin\left(\frac{kh}{2} \sin \Theta\right)}{\frac{kh}{2} \sin \Theta} \equiv \text{ravnina E}$$

$$E_0(x, y, z=0) \approx C \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right)$$

$$F(\Theta, \Phi=\pi/2) = \frac{1 + \cos \Theta}{2} \frac{\cos\left(\frac{kw}{2} \sin \Theta\right)}{1 - \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \left(\frac{kw}{2} \sin \Theta\right)^2} \equiv \text{ravnina H}$$

$$A = wh$$

$$D = \frac{4\pi \left| \iint_A E_0 dA \right|^2}{\lambda^2 \iint_A |E_0|^2 dA} = \frac{4\pi \left| \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-w/2}^{w/2} C \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right) dx dy \right|^2}{\lambda^2 \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-w/2}^{w/2} \left| C \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right) \right|^2 dx dy} = \frac{4\pi \left| C h \frac{w}{\pi/2} \right|^2}{\lambda^2 |C|^2 h \frac{w}{2}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} wh \frac{8}{\pi^2}$$

$$\eta_0 = \frac{8}{\pi^2} \approx 0.81$$

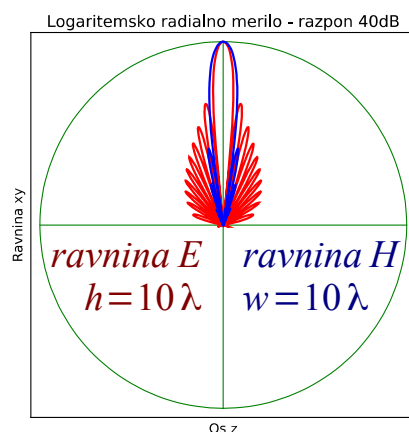
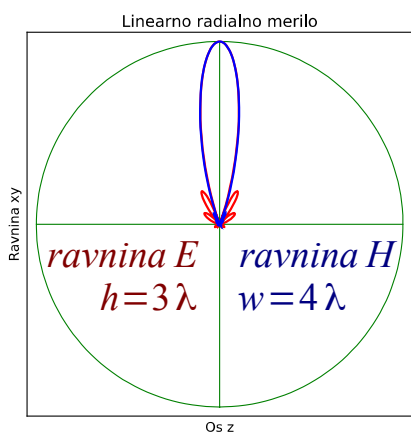
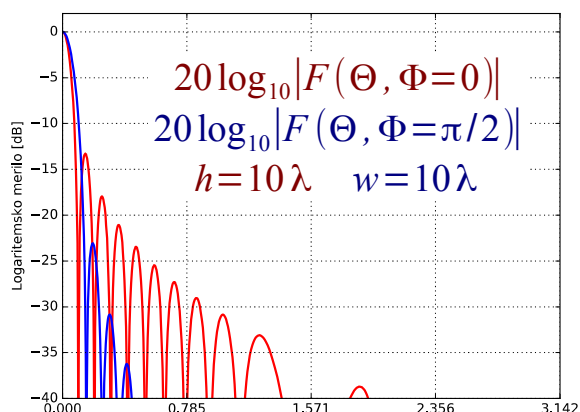
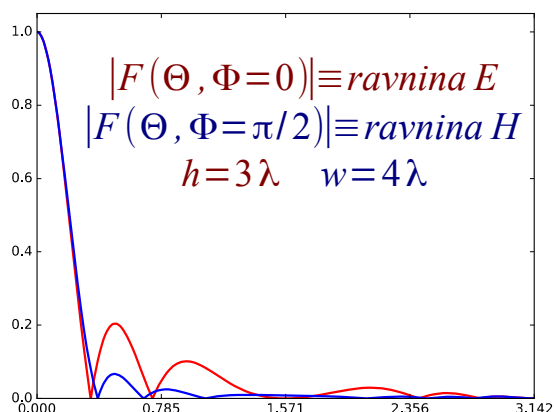
Smerni diagram in smernost piramidnega lijaka

Smernost piramidnega lijaka dobimo preko integracije gostote moči po odprtini lijaka. Izkoristek osvetlitve dolgega piramidnega lijaka s kosinusno porazdelitvijo v ravnini H in zanemarljivo napako faze dosega  $\eta_0 \approx 0.81$ . Smernost dolgega piramidnega lijaka je za približno  $-1\text{dB}$  manjša od smernosti enako velike enakomerno osvetljene odprtine. Bolj enakomerno osvetlitev odprtine in višji izkoristek osvetlitve bi omogočalo vzbujanje lijaka z osnovnim rodом TE<sub>01</sub> in višjim rodом TE<sub>03</sub> v skrbno izbranem razmerju amplitud in medsebojne faze.

Smerna diagrama lijaka TE<sub>01</sub> v ravninah E in H sta različna med sabo. Konstantna porazdelitev osvetlitve odprtine v ravnini E sicer daje močne stranske snope. Prvi stranski snop v ravnini E dosega  $-13\text{dB}$  glede na jakost glavnega snopa. Stranski snopi v ravnini H so šibkejši zaradi kosinusne porazdelitve. Prvi stranski snop v ravnini H dosega  $-23\text{dB}$  glede na jakost glavnega snopa. Jakost ostalih stranskih snopov upada dosti

hitreje v ravnini H.

Rotacijsko simetričen glavni snop sevanja dobimo v primeru, ko razmerje stranic odprtine dolgega piramidnega lijaka  $TE_{01}$  dosega približno  $w:h \approx 4:3$ . Kot zgled sta prikazana smerna diagrama dolgega piramidnega lijaka s stranicama odprtine  $h=3\lambda$  v ravnini E in  $w=4\lambda$  v ravnini H:



Jakost in širino različnih snopov smerne diagrama piramidnega lijaka sicer lažje primerjamo v logaritemski skali  $20 \log_{10}|F(\Theta, \Phi)|$  za kvadratno odprtino  $h=w=10\lambda$  dolgega lijaka z zanemarljivo napako faze.

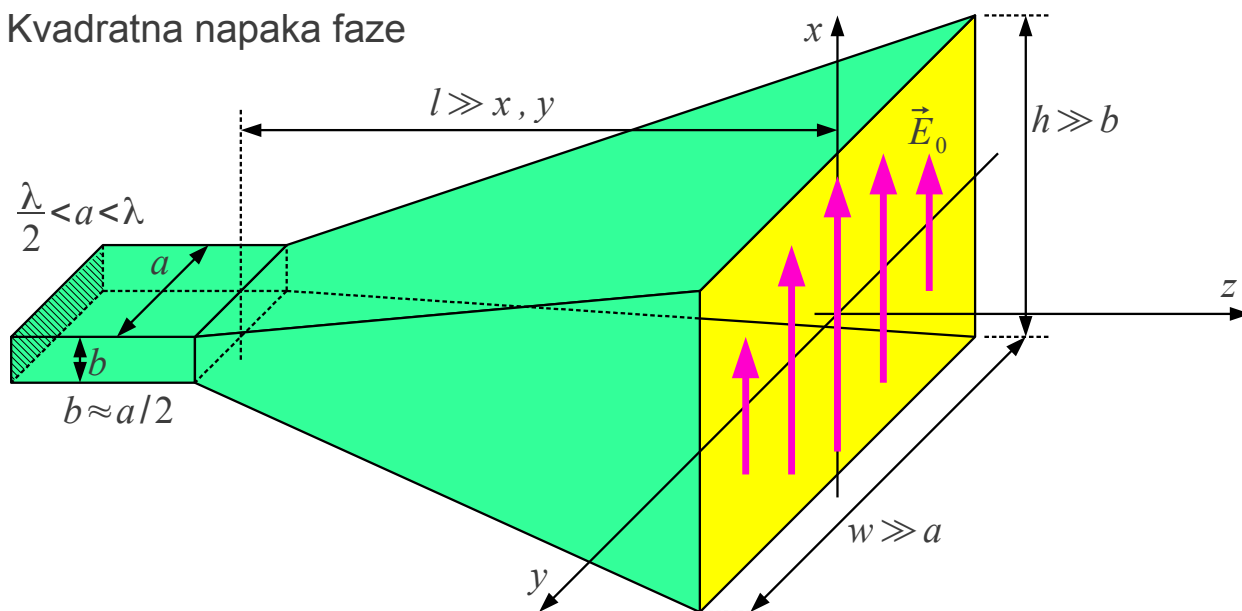
Zanemarljivo majhna napaka faze sicer zahteva zelo dolge lijake. Primer pravokotne odprtine  $h=3\lambda$  in  $w=4\lambda$  zahteva lijak dolžine  $l \approx 2(w^2 + h^2)/\lambda = 50\lambda$ . Primer kvadratne odprtine  $h=w=10\lambda$  zahteva lijak dolžine kar  $l \approx 2(w^2 + h^2)/\lambda = 400\lambda$ ! Opisani anteni sta nepraktično dolgi  $l \gg w, h, \sqrt{A}$ .

Isto smernost oziroma dobiček je zagotovo možno doseči s krajšimi in cenejšimi antenami. V primeru piramidnega lijaka  $TE_{01}$  je smiselno dopustiti

določeno napako faze na odprtini. Napaka faze znižuje izkoristek osvetlitve odprtine. Za doseganje enake smernosti krajši lijak zahteva večjo odprtino.

Napaka faze osvetlitve odprtine narašča sorazmerno s kvadratom razdalje  $\rho^2 = x^2 + y^2$  od osi lijaka, zato jo imenujemo kvadratna napaka faze:

Kvadratna napaka faze



$$\Delta\phi = k[\sqrt{l^2 + x^2 + y^2} - l] \approx \frac{k(x^2 + y^2)}{2l} = \frac{\pi(x^2 + y^2)}{\lambda l}$$

$$\vec{E}_0(x, y, z=0) \approx \vec{1}_x C \cos\left(\frac{\pi}{w} y\right) e^{-j\Delta\phi(x, y)}$$

*Optimalni lijak*

$$\Delta\phi_E \leq \pi/2 \rightarrow h \approx \sqrt{2\lambda l}$$

$$\Delta\phi_H \leq 3\pi/4 \rightarrow w \approx \sqrt{3\lambda l}$$

$$\eta_0 \approx 0.5$$

$$\text{Zelo dolgi lijak } \Delta\phi \leq \pi/8 \rightarrow l \approx 2(w^2 + h^2)/\lambda \rightarrow \eta_0 \approx 0.81$$

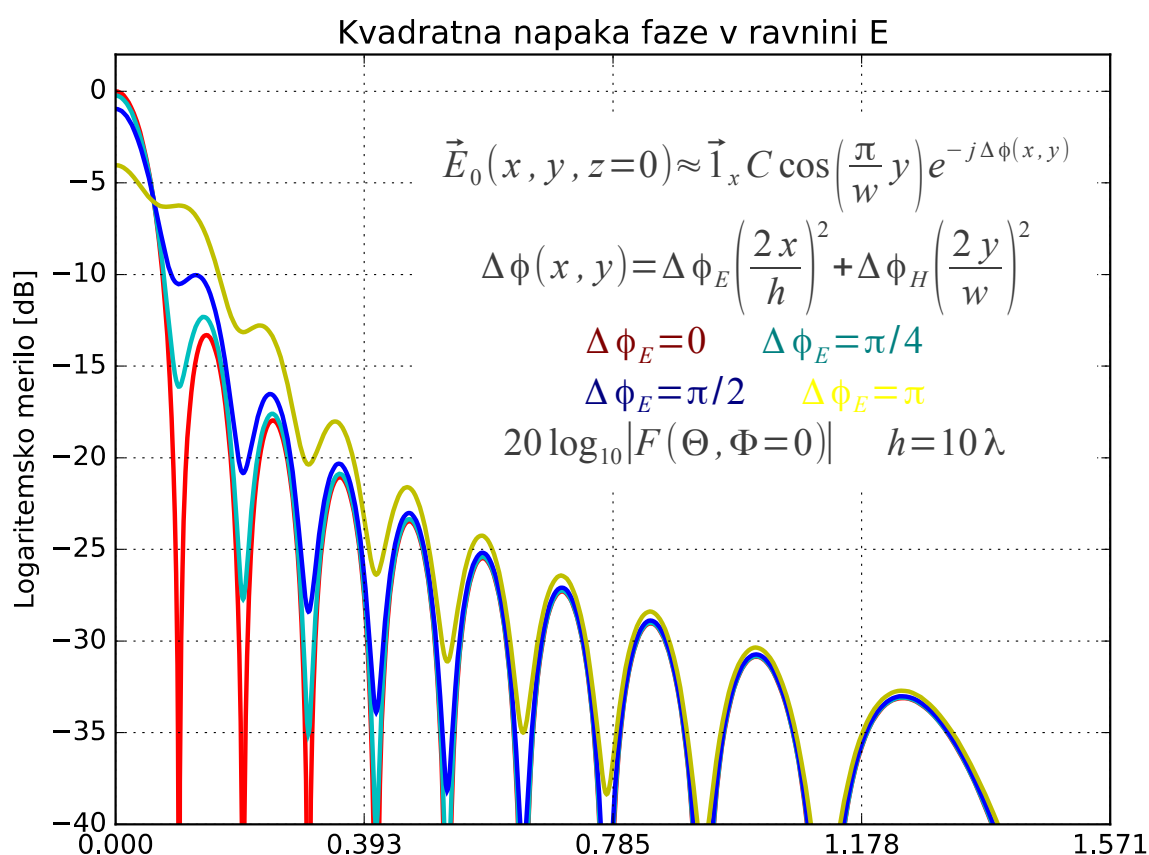
Optimalni piramidni lijak  $TE_{01}$  naj bi pri izbrani dolžini  $l$  dosegel največjo smernost. Ljak doseže slednjo, ko kvadratna napaka faze doseže  $\Delta\phi_E = \pi/2$  na robu lijaka v ravnini E oziroma  $\Delta\phi_H = 3\pi/4$  na robu lijaka v ravnini H. Pripadajoči stranici odprtine sta višina  $h \approx \sqrt{2\lambda l}$  in širina  $w \approx \sqrt{3\lambda l}$ . Poleg neenakomerne kosinusne porazdelitve, izkoristek osvetlitve odprtine dodatno zmanjšuje kvadratna napaka faze, v primeru optimalnega lijaka na približno  $\eta_0 \approx 0.5$ .

Stranici odprtine optimalnega piramidnega lijaka  $TE_{01}$  sta v približnem razmerju  $w:h \approx \sqrt{3}:\sqrt{2} \approx 5:4$ . Izraza za optimalni lijak sicer računata obe stranici odprtine iz dolžine lijaka  $l$ , to je iz višine piramide. Piramidni lijak je odsekana piramida v grlu, kjer se pravokotni valovod začne širiti v lijak. Resnični lijak je torej nekoliko krajši  $l' = l(1 - b/h)$  oziroma

$l' = l(1 - a/w)$  od višine piramide ob upoštevanju razmerja med stranicama odprtine in pripadajočima stranicama pravokotnega valovoda.

Izračun sevanega polja piramidnega lijaka s kvadratno napako faze žal privede do integralov, ki niso analitsko rešljivi. Učinek kvadratne napake faze je zato smiselno prikazati na nekaj skrbno izbranih zgledih. Številске rešitve integralov so prikazane v obliki izračunanih smernih diagramov za različno velike kvadratne napake faze. Rešitve so prikazane v logaritemski skali v območju polarne razdalje  $0 \leq \Theta \leq \pi/2$ , saj vzvratno sevanje lijaka ni zanimivo.

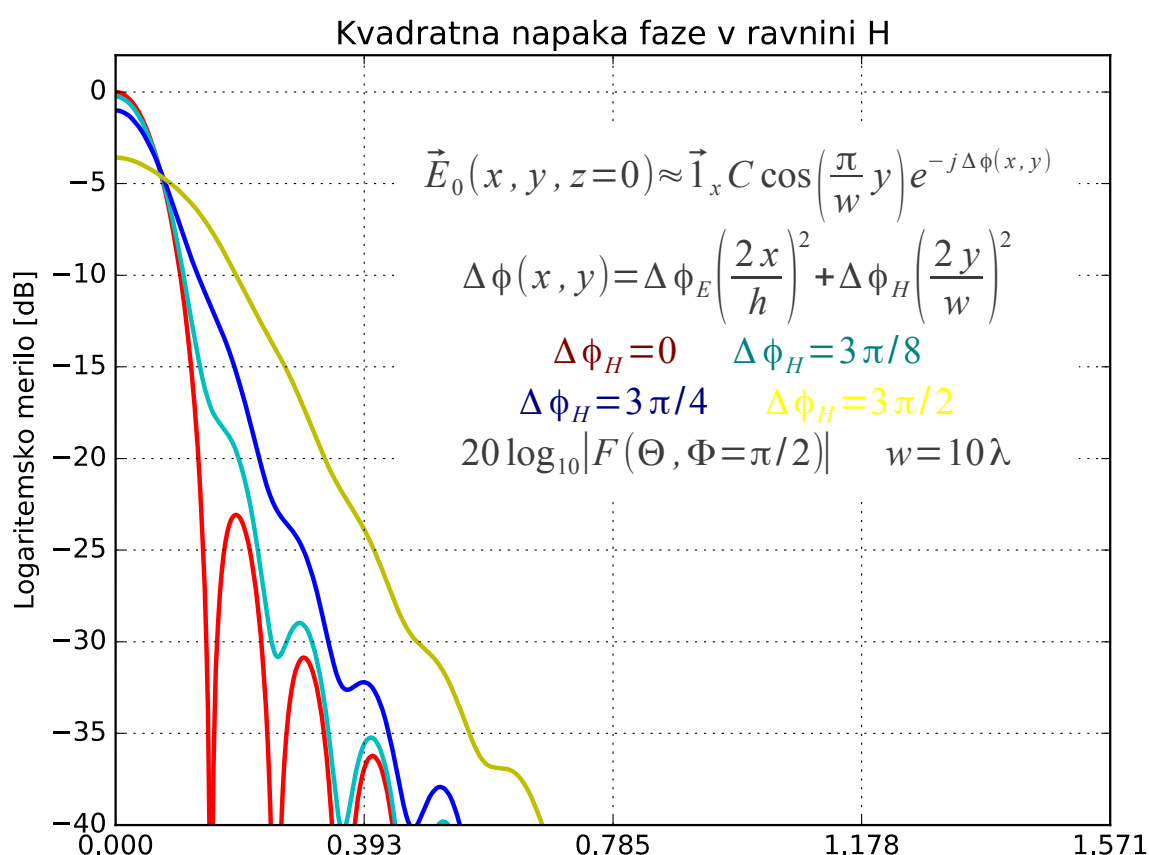
Učinek kvadratne napake faze na prerez smernega diagrama piramidnega lijaka  $TE_{01}$  v ravnini E je prikazan za napako na robu odprtine  $\phi_E = \pi/4$  (zelena krivulja),  $\phi_E = \pi/2$  (modra krivulja) in  $\phi_E = \pi$  (rumena krivulja). Za primerjavo je izrisan tudi smerni diagram brez kvadratne napake faze (rdeča krivulja) za pravokotno odprtino višine  $h = 10\lambda$ :



Kvadratna napaka faze ima v ravnini E dva dobro vidna učinka: minimumi med posameznimi snopi smernega diagrama postajajo plitvejši in glavni vrh smernega diagrama se znižuje. Plitvejši minimumi se pojavijo dosti

prej kot pa znižanje glavnega vrha. Kvadratna napaka faze  $\phi_E = \pi/2$  optimalnega lijaka zniža glavni vrh za približno  $-1\text{dB}$  in hkrati postane minimum med glavnim snopom in prvim stranskim listom smerne diagrama komaj viden.

Učinek kvadratne napake faze na prerez smerne diagrama piramidnega lijaka  $\text{TE}_{01}$  v ravnini H je prikazan za napako na robu odprtine  $\phi_H = 3\pi/8$  (zelena krivulja),  $\phi_H = 3\pi/4$  (modra krivulja) in  $\phi_H = 3\pi/2$  (rumena krivulja). Za primerjavo je izrisan tudi smerni diagram brez kvadratne napake faze (rdeča krivulja) za pravokotno odprtino širine  $w = 10\lambda$  :



Kvadratna napaka faze ima v ravnini H dva dobro vidna učinka: posamezni snopi smerne diagrama se zlepijo v en sam snop in glavni vrh smerne diagrama se znižuje. Zlepljenje snopov smerne diagrama se zgodi dosti prej kot pa znižanje glavnega vrha. Kvadratna napaka faze  $\phi_H = 3\pi/4$  optimalnega lijaka zniža glavni vrh za približno  $-1\text{dB}$  in hkrati se vsi snopi smerne diagrama zlepijo v en sam snop sevanja.

Pri lijakih praktičnih dolžin, ki niso nujno optimalne, stranske snope vidimo samo v ravnini E. V ravnini H stranski snopi praktičnih lijakov niso

vidni. Na splošno imajo valovodni lijaki od velike večine anten najčistejši smerni diagram z najnižjimi stranskimi snopi.

Optimalni piramidni lijaki  $TE_{01}$  v primerjavi z enakomerno osvetljeno odprtino izgubi  $-1\text{dB}$  zaradi kosinusne porazdelitve osvetlitve odprtine, potem  $-1\text{dB}$  zaradi kvadratne napake faze v ravnini E in končno še  $-1\text{dB}$  zaradi kvadratne napake faze v ravnini H. Skupna izguba smernosti znaša torej  $-3\text{dB}$ , kar ustreza izkoristku osvetlitve odprtine  $\eta_0 \approx 0.5$ .

Smernosti piramidnega lijaka je omejena z dolžino lijaka. Če omejimo dolžino lijaka  $l \approx 3d = 3\sqrt{w^2 + h^2}$  na trikratno diagonalo odprtine, dobimo lijak dolžine  $l \approx 33\lambda$  z odprtino višine  $h \approx 8\lambda$  in širine  $w \approx 10\lambda$ . Glede na izbrano omejitev največja smernost lijaka znaša:

$$D_{MAX} = 10 \log_{10} \left[ \frac{4\pi}{\lambda^2} \eta_0 wh \right] \approx 27\text{dBi}$$

Preprosti piramidni lijaki  $TE_{01}$  običajno dosegajo smernost v razponu  $D \approx 10\text{dBi} \dots 25\text{dBi}$ . Višje smernosti bi zahtevale izredno dolge lijake. Seveda lahko dosežemo višjo smernost tudi s krajšim lijakom, če kvadratno napako faze popravimo z zbiralno lečo oziroma zbiralnim zrcalom, kar je snov naslednjih dveh poglavij.

Podobne lastnosti kot piramidni lijaki pravokotnega prereza imajo tudi valovodni lijaki drugačnih prerezov. Krožni valovod razširimo v stožčasti lijak. Eliptični valovod lahko razširimo v lijak eliptičnega prereza. Grebenasti valovod običajno razširimo v piramidni lijak s pravokotno odprtino. Fizikalne osnove delovanja vseh valovodnih lijakov so enake, razlika je edino v oštevilčenju rodov v različnih koordinatnih sistemih.

Ne glede na prečni presek valovoda oziroma lijaka daje osnovni valovodni rod največje sevanje v smeri osi lijaka. Višji valovodni rodovi lihih redov lahko popravijo izkoristek osvetlitve odprtine, če jih znamo vzbuditi s primerno amplitudo in skrbno izbrano fazo glede na osnovni rod.

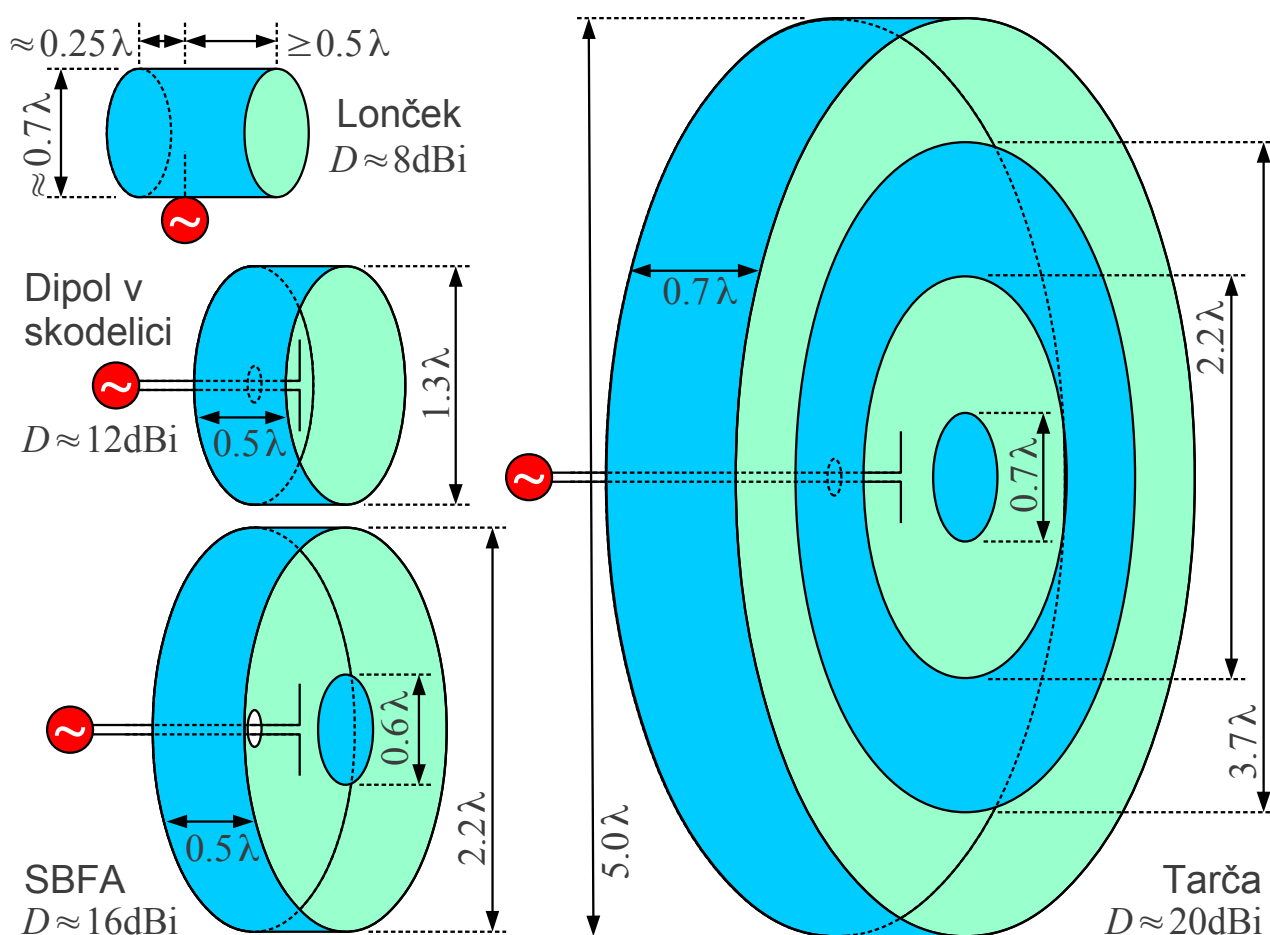
Višji rodovi sodih redov dajejo smerni diagram z ničlo v smeri osi lijaka. Ostro ničlo smernega diagrama lahko izrabimo za natančno določanje smeri oddajnika. Snop sevanja lijaka lahko odklonimo v izbrano smer, ki jo določata razmerje amplitud in medsebojna faza med osnovni rodом in višjim rodом sodega reda.

Končno, smernost oziroma dobiček nista edina načrtovalska cilja valovodnega lijaka. Pogosto potrebujemo anteno z nižjo smernostjo, ampak

čim manjših izmer s smernim diagramom natančno predpisane oblike. Kratke valovodne lijake pogosto imenujemo rezonatorske oziroma votlinske antene (angleško: cavity antennas).

Na frekvencah pod  $f < 3\text{GHz}$  oziroma pri valovnih dolžinah nad  $\lambda > 10\text{cm}$  običajno ne uporabljamo nerodno velikih kovinskih valovodov, pač pa TEM prenosne vode manjšega prereza: koaksialni kabel ali simetrični dvovod. Votlinske antene zato največkrat vsebujejo tudi prehod iz koaksialnega kabla ali drugačnega TEM voda na kovinski valovod.

Električno majhne votline podpirajo razmeroma nizko število različnih rodov. Votlinske antene zato nimajo poljubnih izmer kot večji lijaki, pač pa so omejene na nekaj učinkovitih tehničnih rešitev. Slednje so lahko zelo učinkovite, izkoristek osvetlitve odprtine dipola v skodelici oziroma SBFA lahko gre proti  $\eta_0 \rightarrow 1$  :



Najpreprostejša votlinska antena je prehod iz koaksialnega kabla na valovod. V primeru valovoda krožnega prereza je to lonček. Premer lončka mora presegati  $d > d_{TE11} \approx 0.5861\lambda$  najmanjši premer, ki še omogoča širjenje osnovnega valovodnega rodu  $TE_{11}$ .

Osnovni rod  $TE_{11}$  vzbuja s paličasto antenico, ki je priključena na žilo koaksialnega kabla, oklop slednjega pa na steno valovoda. Krožni valovod med antenico in odprtino naj bo dolg vsaj polovico valovne dolžine, da valovod popravi polje palčke. Kratkosklenjeni odsek valovoda na drugi strani palčke mora biti krajši od četrte valovne dolžine  $\lambda_g/4 > \lambda/4$  v valovodu,. Kratkosklenjeni odsek tedaj predstavlja induktivnost, ki skupaj s kapacitivnostjo palčke preslika karakteristično impedanco koaksialnega kabla v desetkrat višjo impedanco valovoda.

Premer lončka znaša običajno okoli  $d \approx 0.7\lambda$ . Če premer preseže  $d > d_{TM01} \approx 0.7655\lambda$ , palčka vzbuja poleg osnovnega rodu  $TE_{11}$  tudi naslednji višji (sodi) rod  $TM_{01}$ . Prisotnost višjega sodega rodu povzroči odklon snopa sevanja lončka. Lonček je sicer uporaben kot samostojna antena s smernostjo okoli  $D \approx 8\text{dBi}$  oziroma kot žarilec za osvetljevanje globokih paraboličnih zrcal z razmerjem  $f/d \approx 0.3 \dots 0.4$ .

Vzbujanje večje valjne votline izvedemo s simetričnim dipolom, ki zaradi simetrije ne vzbuja nadležnih rodov  $TM_{01}$  oziroma  $TE_{21}$ . Dipol sredi skodelice premera  $d \approx 1.3\lambda$  in dolžine  $l \approx 0.5\lambda$  sicer vzbuja tudi višji lihi rod  $TM_{11}$   $d_{TM11} \approx 1.2197\lambda$ , ki popravi polje osnovnega rodu  $TE_{11}$ , poveča izkoristek osvetlitve in daje lep rotacijsko-simetričen smerni diagram.

Dipol v skodelici (angleško: cup dipole) je sicer odlična samostojna antena s smernostjo okoli  $D \approx 12\text{dBi}$  oziroma je uporaben kot žarilec za osvetljevanje plitvih paraboličnih zrcal z razmerjem  $f/d \approx 0.6 \dots 0.7$ . Delovanje dipola v skodelici se poruši z vzbujanjem višjih nadležnih rodov, ko premer skodelice preseže  $d > 1.4\lambda$ .

Domiselno rešitev za učinkovito vzbujanje skodelice premera kar  $d \approx 2.2\lambda$  in dolžine  $l \approx 0.5\lambda$  je našel Hermann W. Ehrenspeck leta 1974. Pri SBFA (Short Back-Fire Antenna) polje na odprtini skodelice oblikuje dodaten kovinski disk premera približno  $d' \approx 0.6\lambda$ . SBFA ima odličen izkoristek osvetlitve odprtine  $\eta_0 \rightarrow 1$ , nizke stranske snope in visoko smernost okoli  $D \approx 16\text{dBi}$ .

Z drugimi besedami, kovinski disk SBFA nadomešča dielektrično zbiralno lečo za popravljanje kvadratne napake faze. Umetni dielektriki iz različno oblikovanih kosov kovine sicer zahtevajo samostojno poglavje o antenah.

Nadgradnja SBFA je antena z imenom "lokostrelska tarča" (angleško: archery-target antenna). Tarča ima votlino premera kar  $d \approx 5\lambda$  in dolžine približno  $l \approx 0.7\lambda$ . Votlino tarče vzbuja en sam simetrični dipol v sredini.

Polje na odprtini votline oblikujeta kovinski disk premera približno  $d' \approx 0.7\lambda$  in kovinski kolobar z notranjim premerom  $d_N \approx 2.2\lambda$  in zunanjim premerom  $d_Z \approx 3.7\lambda$ . Disk in kolobar spominjata na Fresnelovo lečo, kar ponovno zahteva svoje poglavje o razširjanju valov.

Tarča lahko presega smernost  $D \approx 20\text{dBi}$  pri izkoristku osvetlitve odprtine malo pod  $\eta_0 < 0.5$ . Podobno smernost in izkoristek osvetlitve enako velike krožne odprtine premera  $d \approx 5\lambda$  bi dosegel stožčasti lijak dolžine kar  $l \approx 8\lambda$ ! Dolžini stožčastega lijaka je treba v praksi prišteti še dolžino prehoda iz koaksialnega kabla na valovod (antena lonček).

Vzbujanje skodelice, SBFA in tarče je običajno izvedeno s simetričnim dipolom. Simetrični dipol je načeloma polvalovni dipol. Votlina ima zelo velik vpliv na impedanco dipola. Sevalna upornost dipola je nižja od sevalne upornosti polvalovnega dipola v praznem prostoru. Reaktivni del impedance dipola se zelo razlikuje med skodelico, SBFA in tarčo.

\* \* \* \* \*