

Program predavanj 2009/2

A. Polarizacija

20. Polarizacija polja in anten

21. Polarimetrija

B. Mikrovalovna vezja in načini obravnave

22. Osnove vezij s porazdeljenimi elementi

23. Valovi, odboj in prenos

24. Smithov diagram

25. Matrika S in grafi signalnega toka

26. Mikrovalovna večpolna vezja

27. Mikrovalovni vodniki

28. Impedančno prilagajanje

29. Meritve in merilni instrumenti

30. Planarni vodniki, mikrotrakaste linije

Program predavanj 2009/2

C. Mikrovalovni sestavni deli v mobilni telefoniji

31. Antene ročnega mobilnega telefona

32. Mikrovalovna vezja v mobilni telefoniji
(Druge vsebine po dogovoru)

D. Sistemi mobilne telefonije, teme:

... Raznoliki prenos (diversiti)

... OFDM

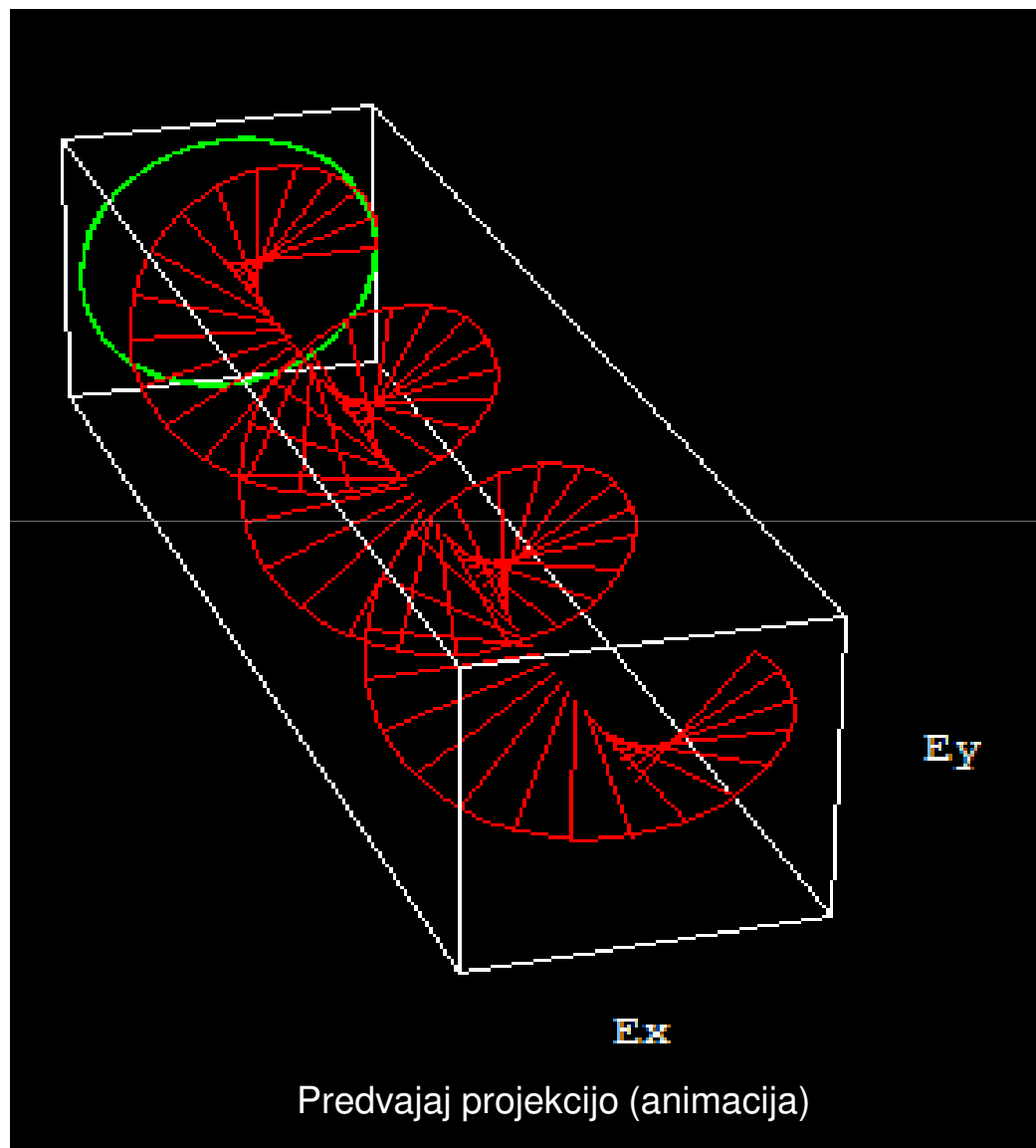
... MIMO (diversiti, prostorski in polarizacijski multipleks)

(Druge vsebine po dogovoru)

.....

.....

Polarizacija polja in anten



Mobitel d.d.,
izobraževanje

4. 9. 2009,
predavanje 19

Prof. dr. Jožko
Budin

Vsebina

1. Polarizacija elektromagnetnega polja
 - Polarizacijska elipsa in polarizacijski vzorec
 - Kompleksni vektorji, vzporednost in ortogonalnost
 - Polarizacijska baza
 - Eliptična, krožna in linearna polarizacija
 - Posebnosti krožne polarizacije
2. Analiza in sinteza polarizacije
 - Obravnava polarizacije po analogiji z linijami
 - Polarizacijska skladnost in polarizacijski izkoristek antene; pravilo največjega prenosa moči
3. Poincaréjeva krogla in Stokesovi parametri
4. Polarizacijske matrike
5. Pol-MIMO, polarizacijska ortogonalnost

Vrste polarizacije

1. Linearna polarizacija L

- polarizacijska baza: horizontalno-vertikalna (H/V, diag. A/B) (dve med seboj ortogonalni vektorski smeri)

2. Krožna polarizacija K

- polarizacijska baza: krožna desno- in levosučna (KD, KL)

3. Eliptična polarizacija E

- polarizacijska baza: eliptična desno- in levosučna (ED, EL) (dve poljubno orientirani med seboj ortogonalni elipsi enake sploščenosti in nasprotne smeri sukanja)

4. Stopnja polarizacije

- Popolnoma polarizirano (koherentno), delno polarizirano in nepolarizirano (nekoherentno) polje oz. šum.

Krajevno-časovna vrednost polja

Splošni zapis trenutne vrednosti poljubno polariziranega ravninskega vala

$$\mathbf{E}(z,t) = \text{Re} [\mathbf{e} A e^{j(\omega t - kz)}], \quad A = \text{konst.}$$

\mathbf{e} v splošnem enotski kompleksen vektor polarizacije

1. Linearna polarizacija:

\mathbf{e} realen vektor $\mathbf{e} \times \mathbf{e}^* = 0$ pogoj linearne polariziranosti

Primer: $\mathbf{e}_1 = \mathbf{1}_x$, $\mathbf{e}_2 = \mathbf{1}_y$

2. Krožna polarizacija:

\mathbf{e} kompleksen vektor $\mathbf{e} \cdot \mathbf{e} = 0$ pogoj krožne polariziranosti

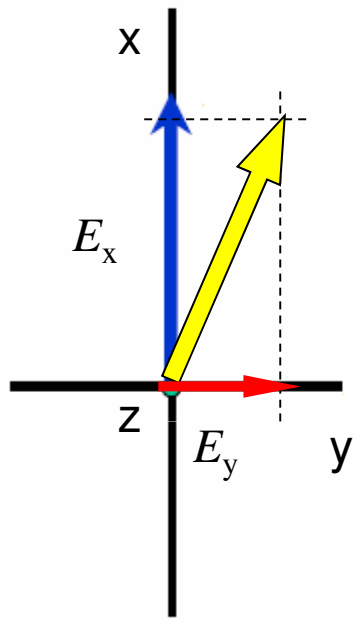
Primer: $\mathbf{e}_D = (\mathbf{1}_x - j\mathbf{1}_y)/\sqrt{2}$, $\mathbf{e}_L = (\mathbf{1}_x + j\mathbf{1}_y)/\sqrt{2}$, $\mathbf{1}_x \times \mathbf{1}_y = \mathbf{1}_z$

3. Eliptična polarizacija:

\mathbf{e} kompleksen vektor $\mathbf{e} \times \mathbf{e}^* \neq 0$, $\mathbf{e} \cdot \mathbf{e} \neq 0$ pogoj elip. pol.

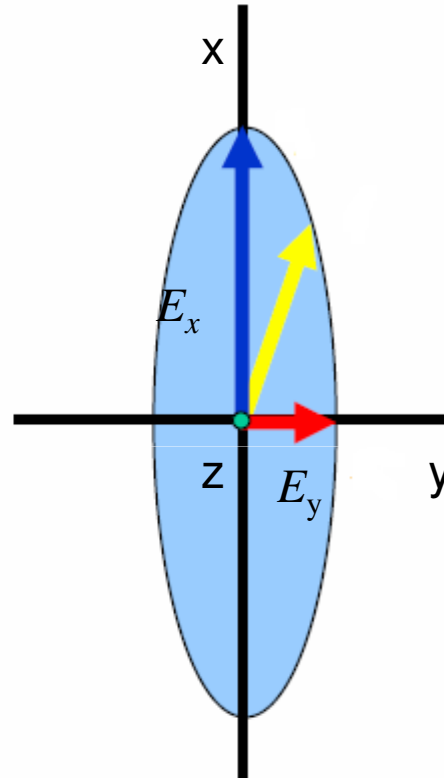
Tri vrste polarizacije

Linearna



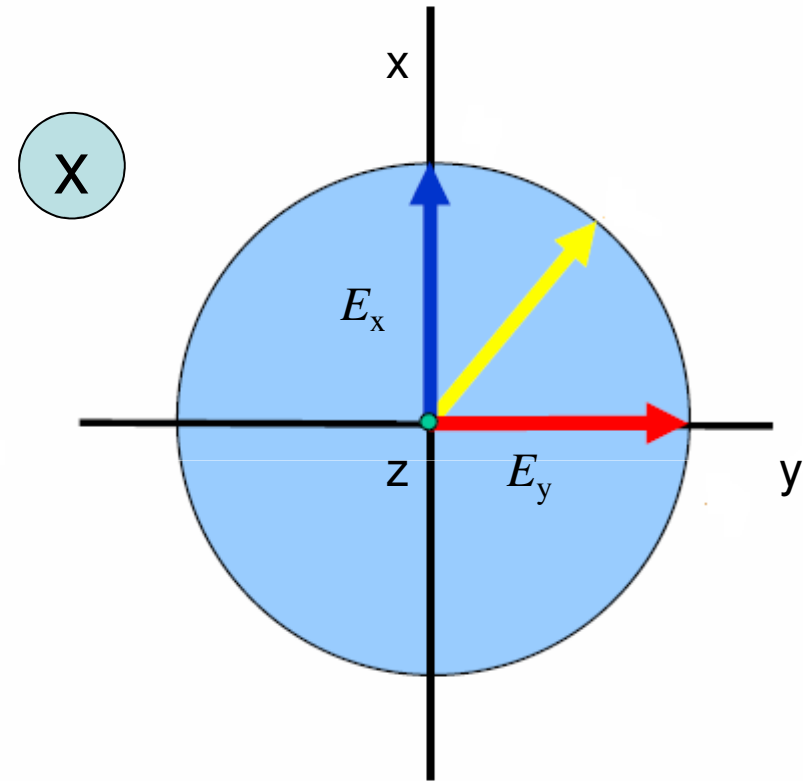
$$|E_x| = k |E_y|$$
$$\delta = 0$$

Eliptična



$$|E_x| = k |E_y|$$
$$\delta \text{ poljuben}$$

Krožna



$$|E_x| = |E_y|$$
$$\delta = \pm \pi/2$$

Linearna in krožna polarizacija sta poseben primer splošne eliptične polarizacije

Algebra kompleksnih vektorjev

Linearni smerni vektor $\mathbf{1}_\theta$ (vertikalna pol.), $\mathbf{1}_\phi$ (horizontalna pol.)

Kompleksni vektor $\mathbf{E} = \mathbf{1}_\theta E_\theta + \mathbf{1}_\phi E_\phi$; komponenti E_θ in E_ϕ kompleksni števili
smerna vektorja $\mathbf{1}_\theta \times \mathbf{1}_\phi = \mathbf{1}_r$

Konjugiran vektor $\mathbf{E}^* = \mathbf{1}_\theta E_\theta^* + \mathbf{1}_\phi E_\phi^*$

Skalarni produkt $\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^* = E_{1\theta} E_{2\theta}^* + E_{1\phi} E_{2\phi}^*$

Vektorski produkt $\mathbf{E}_1 \times \mathbf{E}_2 = \mathbf{1}_r (E_{\theta 1} E_{\phi 2} - E_{\theta 2} E_{\phi 1})$

Vzporednost $\mathbf{E}_1 \times \mathbf{E}_2 = 0$ ali $\mathbf{E}_1 = k \mathbf{E}_2$

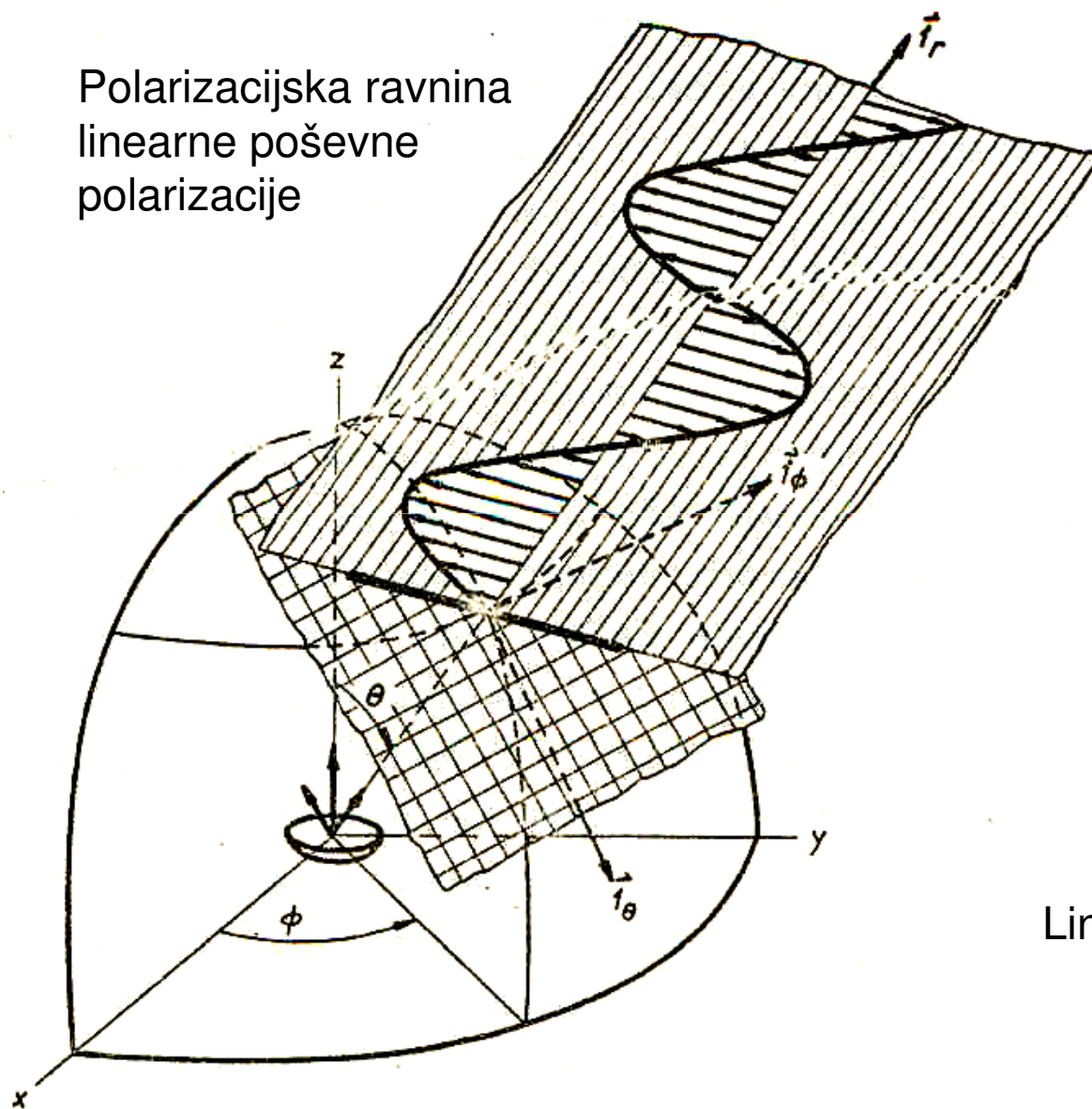
Ortogonalnost $\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^* = 0$ ali $\mathbf{E}_1 = k \mathbf{E}_2^* \times \mathbf{1}_r$

Krožni smerni $\mathbf{1}_D = (\mathbf{1}_\theta - j\mathbf{1}_\phi)/\sqrt{2}$ desni; $\mathbf{1}_L = (\mathbf{1}_\theta + j\mathbf{1}_\phi)/\sqrt{2}$ levi

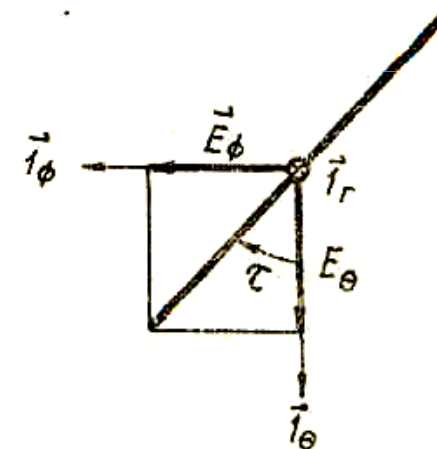
Krožeči vektor $\text{Re}(\mathbf{1}_D e^{j\omega t})$ v desno; $\text{Re}(\mathbf{1}_L e^{j\omega t})$ v levo.

Linearna polarizacija – polar. ravnina

Polarizacijska ravnina
linearne poševne
polarizacije



Antena linearne polarizacije

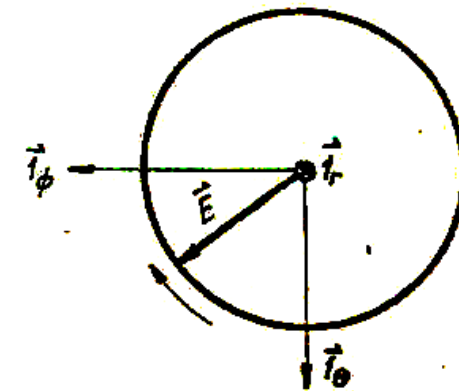
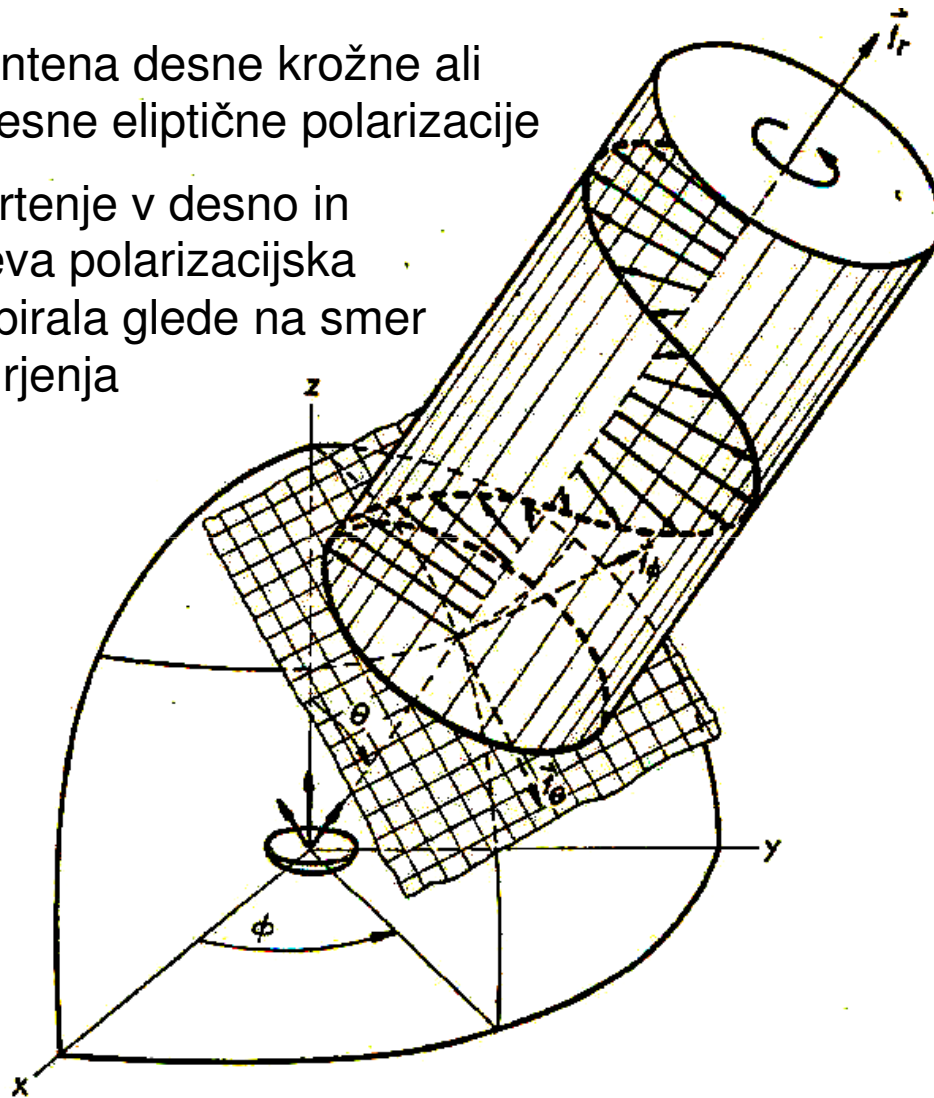


Linearna poševna polarizacija

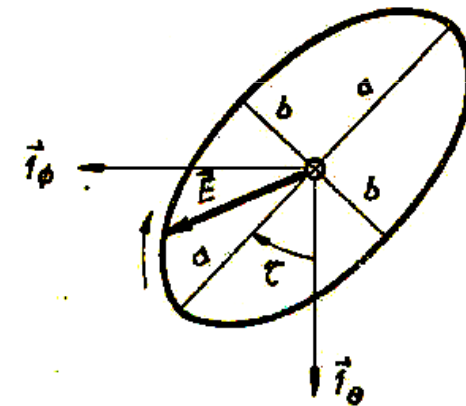
Krožna polarizacija – polar. vijačnica

Antena desne krožne ali desne eliptične polarizacije

Vrtenje v desno in leva polarizacijska spirala glede na smer širjenja



Desna krožna polarizacija

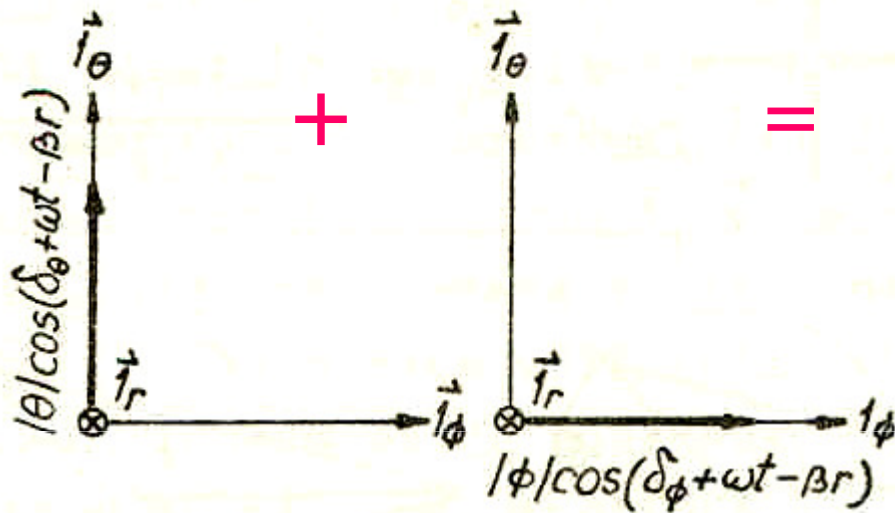


Desna elipt. polarizacija

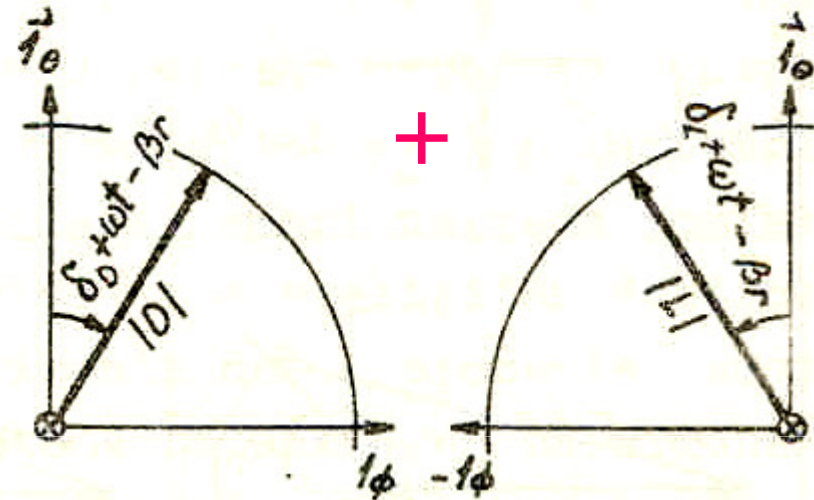
Desni krožni (eliptični) polarizaciji pripada leva prostorska spirala in obratno, levi polarizaciji pripada desna spirala.

Linearna in krožna polarizacijska baza

Linearna baza



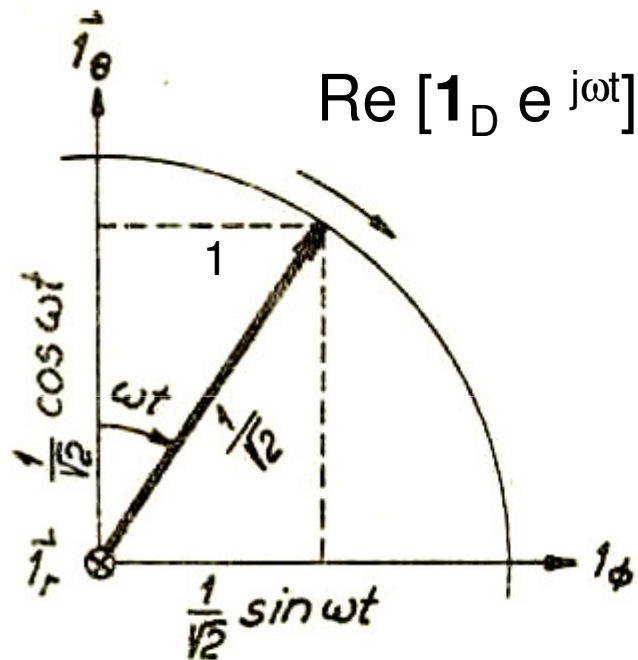
Krožna baza



- Linearna in krožna polarizacija sta skrajna primera splošne eliptične polarizacije in sta v praksi idealizacija resničnega polarizacijskega stanja elektromagnetnega polja.
- Splošno eliptično polarizacijo lahko sestavimo iz dveh linearnih ali dveh krožnih komponent
- Pri odboju in lomu se polarizacija spremeni (primer urbanega področja).

Krožna polarizacijska baza

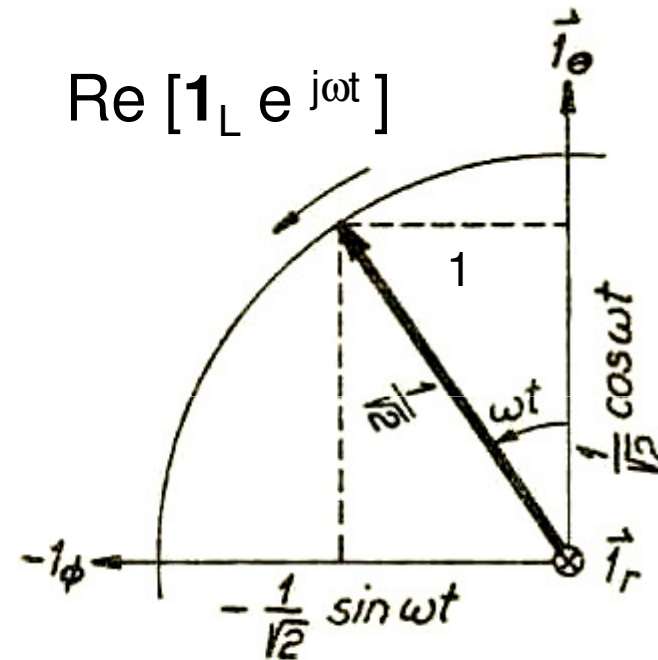
Desna krožna polarizacija:



$$\mathbf{1}_D = (\mathbf{1}_\theta - j\mathbf{1}_\phi) / \sqrt{2}$$

$$\begin{aligned} \text{Re} [\mathbf{1}_D e^{j\omega t}] &= \\ &= (\mathbf{1}_\theta \cos \omega t + \mathbf{1}_\phi \sin \omega t) / \sqrt{2} \end{aligned}$$

Leva krožna polarizacija:



$$\mathbf{1}_L = (\mathbf{1}_\theta + j\mathbf{1}_\phi) / \sqrt{2}$$

$$\begin{aligned} \text{Re} [\mathbf{1}_L e^{j\omega t}] &= \\ &= (\mathbf{1}_\theta \cos \omega t - \mathbf{1}_\phi \sin \omega t) / \sqrt{2} \end{aligned}$$

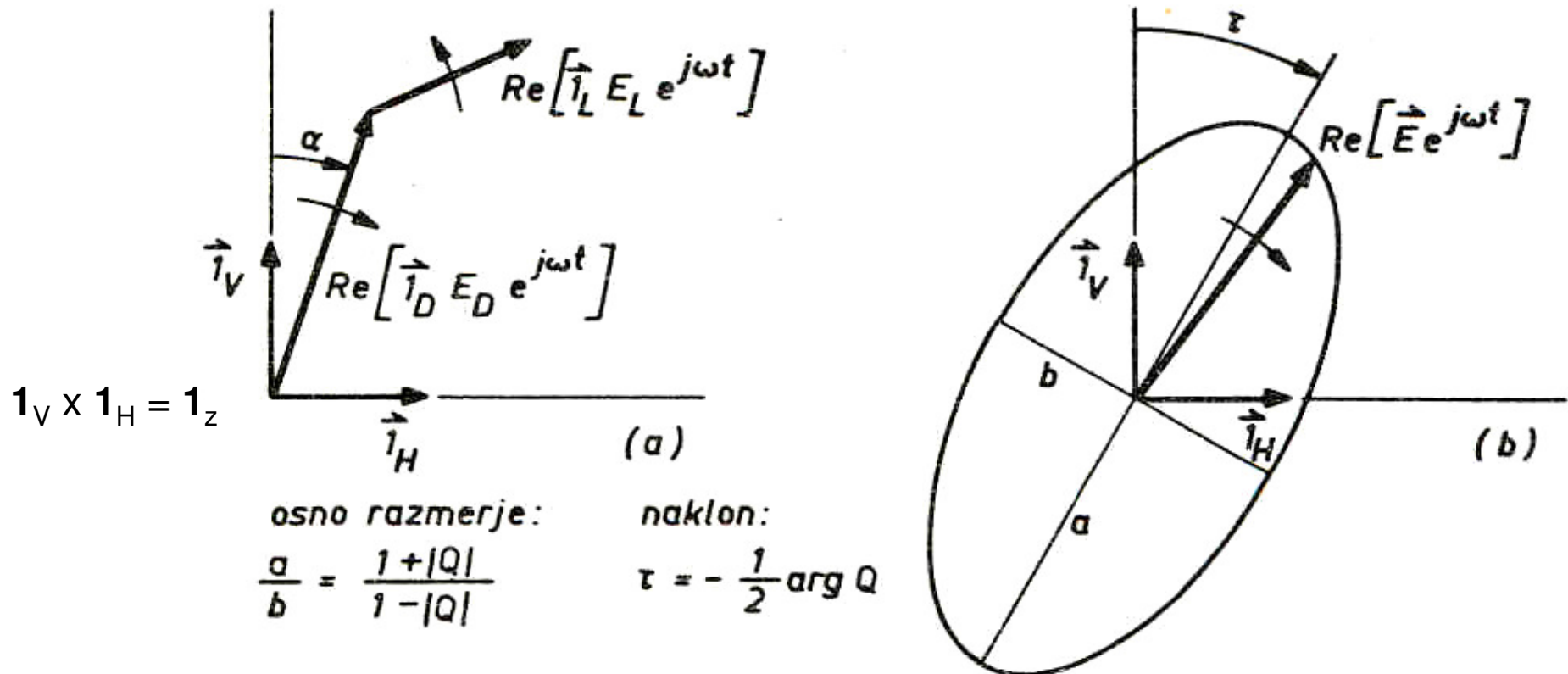
Eliptična polarizacija kot vsota krožnih

$$E_V = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_D + E_L),$$

$$E_D = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_V + j E_H),$$

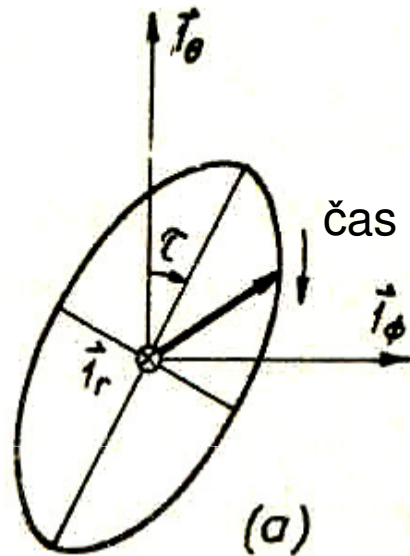
$$j E_H = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_D - E_L),$$

$$E_L = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_V - j E_H). \quad Q = E_L/E_D$$

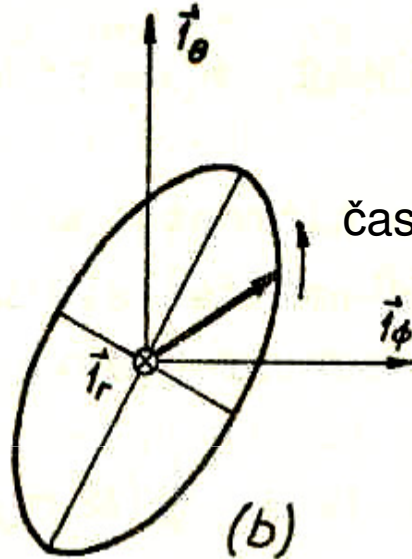


Elipse kompleksnih vektorjev

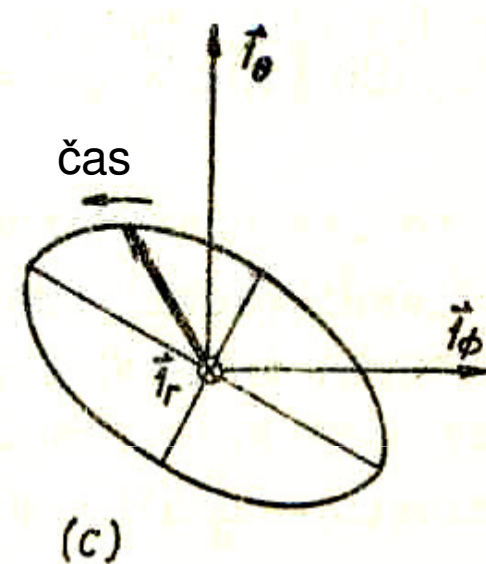
Desna eliptična polarizacija



Konjugirana eliptična polarizacija



Ortogonalna eliptična polarizacija



Kompleksni vektor polja:

$$\mathbf{E} = \mathbf{1}_\theta E_\theta + \mathbf{1}_\phi E_\phi$$

Kompleksno razmerje linearnih komponent:

$$\rho = E_\phi / E_\theta$$

Kompleksni vektor konjugiranega polja:

$$\mathbf{E}_{\text{konj}} = \mathbf{E}^* = \mathbf{1}_\theta E_\theta^* + \mathbf{1}_\phi E_\phi^*$$

Kompleksno razmerje linearnih komponent:

$$\rho_{\text{konj.}} = \rho^* = E_\phi^* / E_\theta^*$$

Kompleksni vektor ortogonalnega polja:

$$\mathbf{E}_{\text{ort}} = \mathbf{E}^* \times \mathbf{1}_r$$

Kompleksno razmerje linearnih komponent:

$$\rho_{\text{ort.}} = -E_\theta^* / E_\phi^*$$

Linearna baza

1. Vertikalno-horizontalna baza

$$\vec{e}_1 = \vec{1}_V \quad \text{in} \quad \vec{e}_2 = \vec{1}_H$$

bazna vektorja

$$\vec{E} = \vec{1}_V E_1 + \vec{1}_H E_2 = \vec{1}_V (\vec{E} \cdot \vec{1}_V) + \vec{1}_H (\vec{E} \cdot \vec{1}_H) = \vec{1}_V V + \vec{1}_H H$$

komponenti polja

$$\rho_{VH} = \frac{E_2}{E_1} = \left| \frac{H}{V} \right| e^{j(\delta_H - \delta_V)}, \quad \delta_{VH} = \delta_H - \delta_V$$

polarizacijsko razmerje

2. Diagonalna baza $-45^\circ/+45^\circ$

$$\vec{e}_1 = \vec{1}_A = (\vec{1}_V + \vec{1}_H)/\sqrt{2} \quad \text{in} \quad \vec{e}_2 = \vec{1}_B = (\vec{1}_H - \vec{1}_V)/\sqrt{2}$$

bazna vektorja

$$\vec{E} = \vec{1}_A E_1 + \vec{1}_B E_2 = \vec{1}_A (\vec{E} \cdot \vec{1}_A) + \vec{1}_B (\vec{E} \cdot \vec{1}_B) = \vec{1}_A A + \vec{1}_B B$$

komponenti polja

$$\rho_{AB} = \frac{E_2}{E_1} = \left| \frac{B}{A} \right| e^{j(\delta_B - \delta_A)}, \quad \delta_{AB} = \delta_B - \delta_A$$

polarizacijsko razmerje

Krožno-eliptična baza

3. Krožna baza

$$\hat{\mathbf{i}}_D = (\hat{\mathbf{i}}_V - j \hat{\mathbf{i}}_H) / \sqrt{2} \quad \hat{\mathbf{i}}_L = (\hat{\mathbf{i}}_V + j \hat{\mathbf{i}}_H) / \sqrt{2} \quad \text{bazna vektorja}$$

$$\vec{\mathbf{E}} = \hat{\mathbf{i}}_L E_1 + \hat{\mathbf{i}}_D E_2 = \hat{\mathbf{i}}_L (\vec{\mathbf{E}} \hat{\mathbf{i}}_L^*) + \hat{\mathbf{i}}_D (\vec{\mathbf{E}} \hat{\mathbf{i}}_D^*) = \hat{\mathbf{i}}_L L + \hat{\mathbf{i}}_D D \quad \text{komponenti polja}$$

$$\rho_{LD} = \frac{E_2}{E_1} = \left| \frac{D}{L} \right| e^{j(\delta_D - \delta_L)}, \quad \delta_{LD} = \delta_D - \delta_L \quad \text{polarizacijsko razmerje}$$

3. Eliptična baza

$$E_1 = |M| \exp(j\delta_M) \quad E_2 = |N| \exp(j\delta_N) \quad \text{komponenti polja}$$

$$\vec{\mathbf{E}} = \vec{\mathbf{e}}_1 E_1 + \vec{\mathbf{e}}_2 E_2 = \vec{\mathbf{e}}_1 (\vec{\mathbf{E}} \vec{\mathbf{e}}_1^*) + \vec{\mathbf{e}}_2 (\vec{\mathbf{E}} \vec{\mathbf{e}}_2^*) = \vec{\mathbf{e}}_1 M + \vec{\mathbf{e}}_2 N \quad \text{polje}$$

$$\rho_{MN} = \frac{E_2}{E_1} = \left| \frac{N}{M} \right| e^{j(\delta_N - \delta_M)}, \quad \delta_{MN} = \delta_N - \delta_M \quad \text{polarizacijsko razmerje}$$

Linearna in krožna polarizacijska baza

POLARIZATION	χ	ψ	{H V} basis		{45° 135°} basis		{L R} basis	
			ρ_{HV}	\mathbf{E}	$\rho_{45^\circ 135^\circ}$	\mathbf{E}	ρ_{LR}	\mathbf{E}
Linear Horizontal	0	0	0	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	-1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$	1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$
Linear Vertical	0	$\frac{\pi}{2}$	∞	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	-1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -j \\ j \end{bmatrix}$
45° Linear	0	$\frac{\pi}{4}$	1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	0	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	j	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1-j \\ 1+j \end{bmatrix}$
135° Linear	0	$-\frac{\pi}{4}$	-1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}$	∞	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$-j$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} -1-j \\ -1+j \end{bmatrix}$
Left-handed Circular	$\frac{\pi}{4}$		j	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$	j	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1+j \\ -1+j \end{bmatrix}$	0	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$
Right-handed Circular	$-\frac{\pi}{4}$		$-j$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$	$-j$	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1-j \\ -1-j \end{bmatrix}$	∞	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

Algebra kompleksnih vektorjev

Linearni smerni vektor $\mathbf{1}_\theta$ (vertikalna pol.), $\mathbf{1}_\phi$ (horizontalna pol.)

Kompleksni vektor $\mathbf{E} = \mathbf{1}_\theta E_\theta + \mathbf{1}_\phi E_\phi$; komponenti E_θ in E_ϕ kompleksni števili
smerna vektorja $\mathbf{1}_\theta \times \mathbf{1}_\phi = \mathbf{1}_r$

Konjugiran vektor $\mathbf{E}^* = \mathbf{1}_\theta E_\theta^* + \mathbf{1}_\phi E_\phi^*$

Skalarni produkt $\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^* = E_{1\theta} E_{2\theta}^* + E_{1\phi} E_{2\phi}^*$

Vektorski produkt $\mathbf{E}_1 \times \mathbf{E}_2 = \mathbf{1}_r (E_{\theta 1} E_{\phi 2} - E_{\theta 2} E_{\phi 1})$

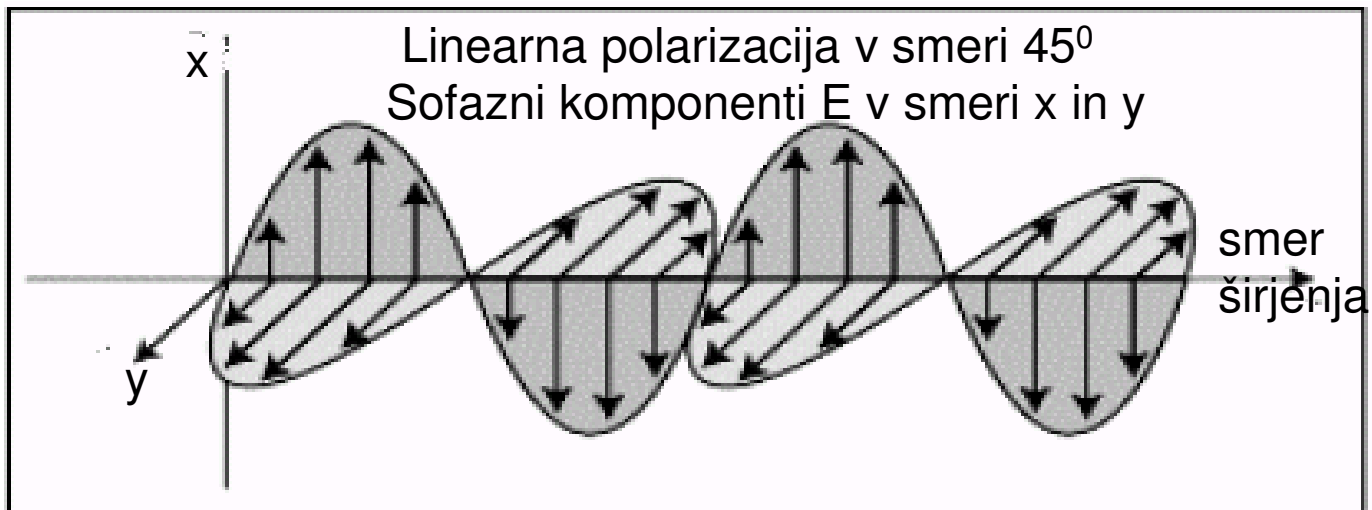
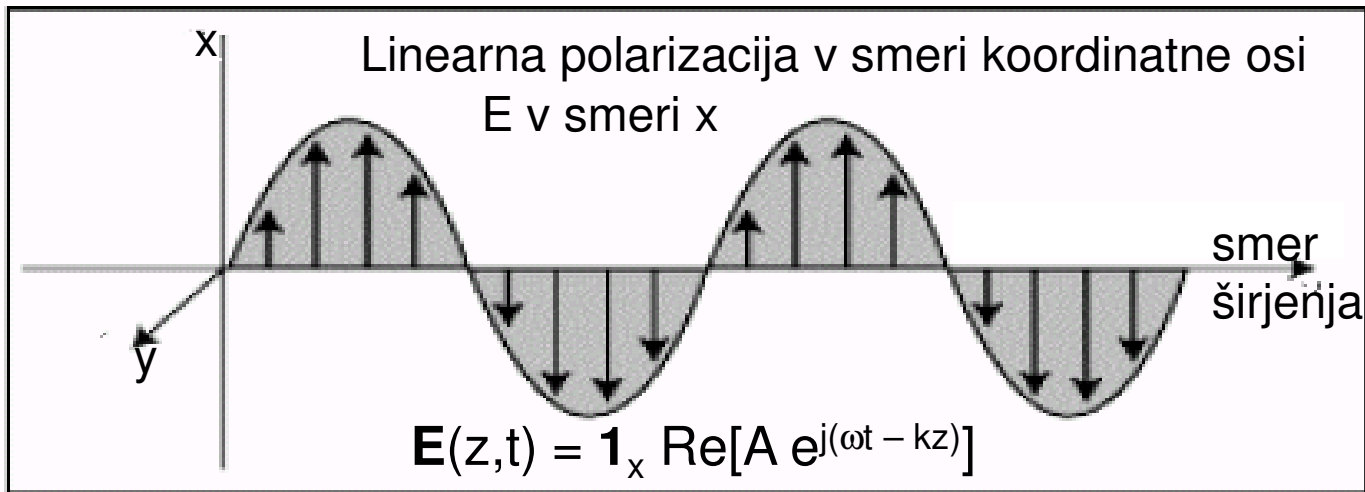
Vzporednost $\mathbf{E}_1 \times \mathbf{E}_2 = 0$ ali $\mathbf{E}_1 = k \mathbf{E}_2$

Ortogonalnost $\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^* = 0$ ali $\mathbf{E}_1 = k \mathbf{E}_2^* \times \mathbf{1}_r$

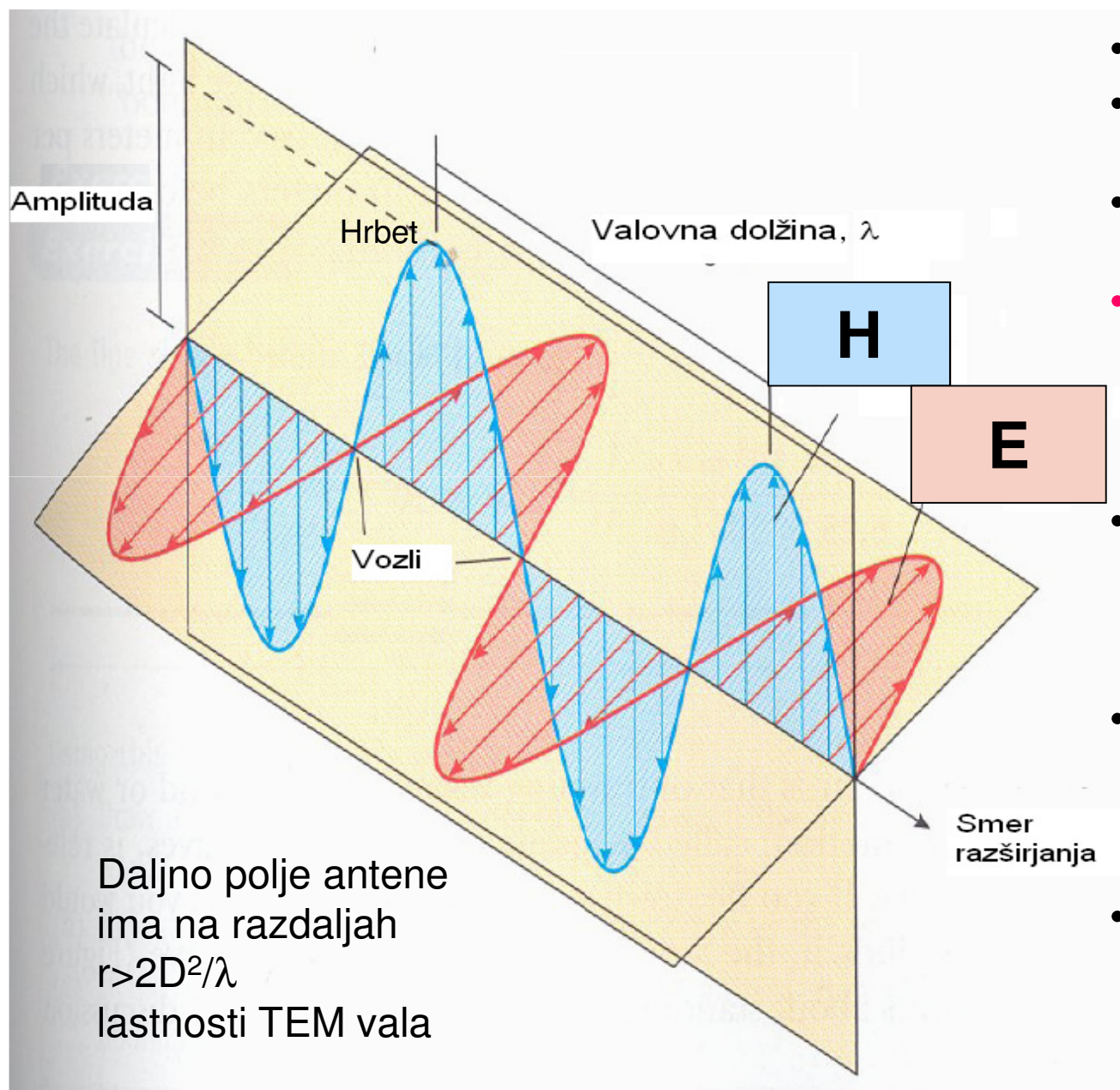
Krožni smerni $\mathbf{1}_D = (\mathbf{1}_\theta - j\mathbf{1}_\phi)/\sqrt{2}$ desni; $\mathbf{1}_L = (\mathbf{1}_\theta + j\mathbf{1}_\phi)/\sqrt{2}$ levi

Krožeči vektor $\text{Re}(\mathbf{1}_D e^{j\omega t})$ v desno; $\text{Re}(\mathbf{1}_L e^{j\omega t})$ v levo.

Primer linearne polarizacije



TEM linearno polariziran ravninski val

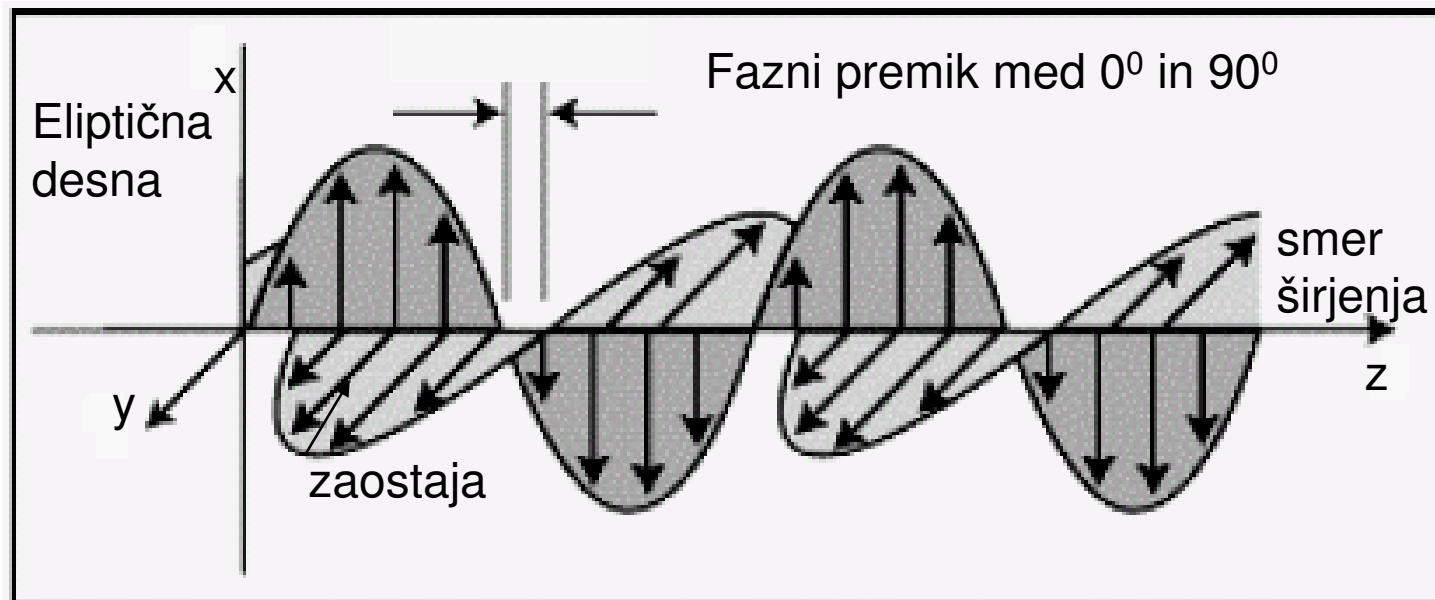
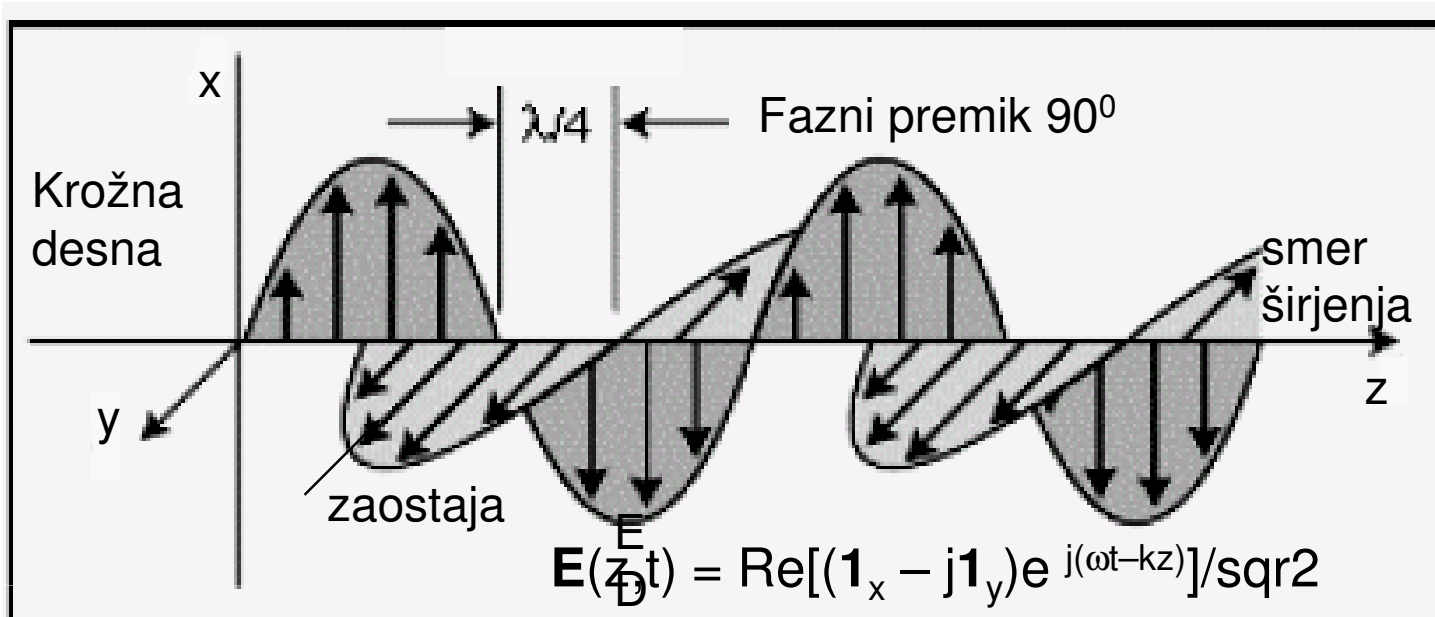


- E in H v fazi
- **E** in **H** ortogonalna med seboj
- **E** in **H** ortogonalna na smer širjenja
- **$E/H = Z_0 = 377 \Omega$**

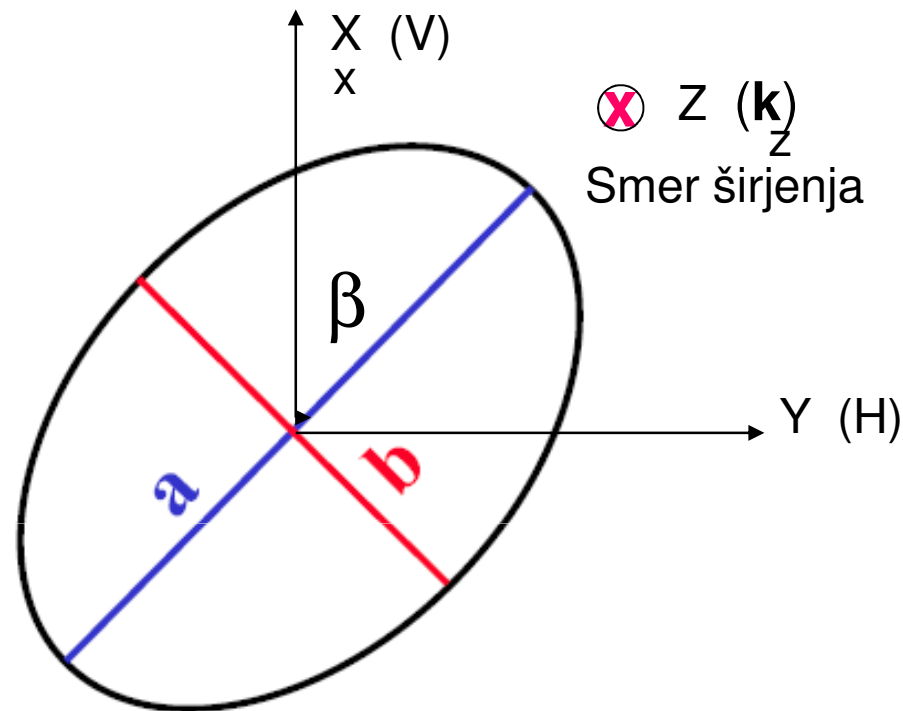
TEM (v prostoru) je:

- Osnovni način planega valovanja v kartezičnih koordinatah
- Približek valjnih valov (v valjnih koordinatah) na velikih razdaljah
- Približek krogelnih valov (v krogelnih koordinatah) na velikih razdaljah

Primer krožne in eliptične polarizacije



Osno razmerje polarizacijske elipse



Osno razmerje elipse $R = a/b$ $R_{\text{dB}} = 20 \log a/b$, dB

Kot eliptičnosti $\alpha = \arctg b/a$

Naklonski kot β velike osi (do vertikale)

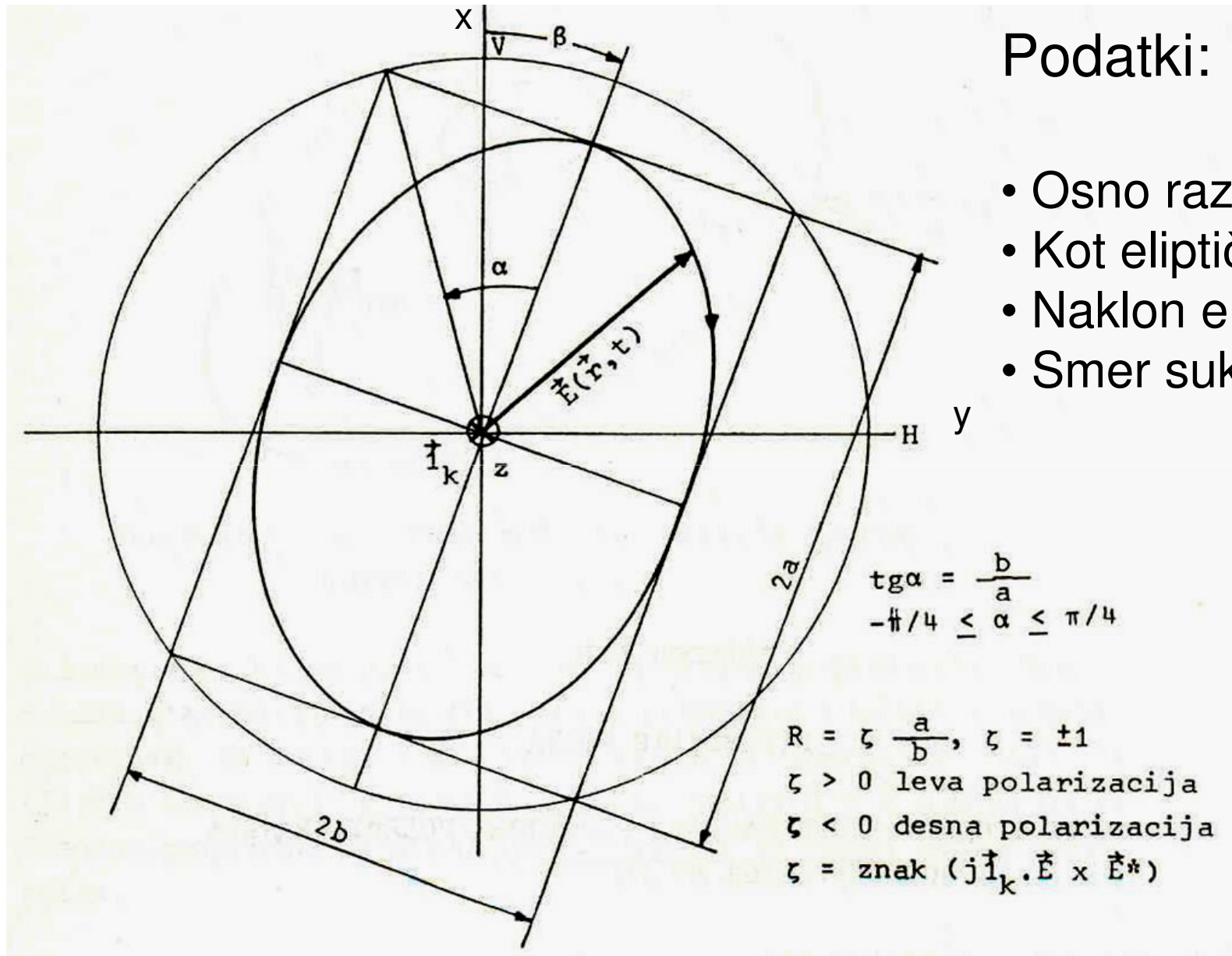
Polarizacijska stanja

Kot nagiba velike osi elipse

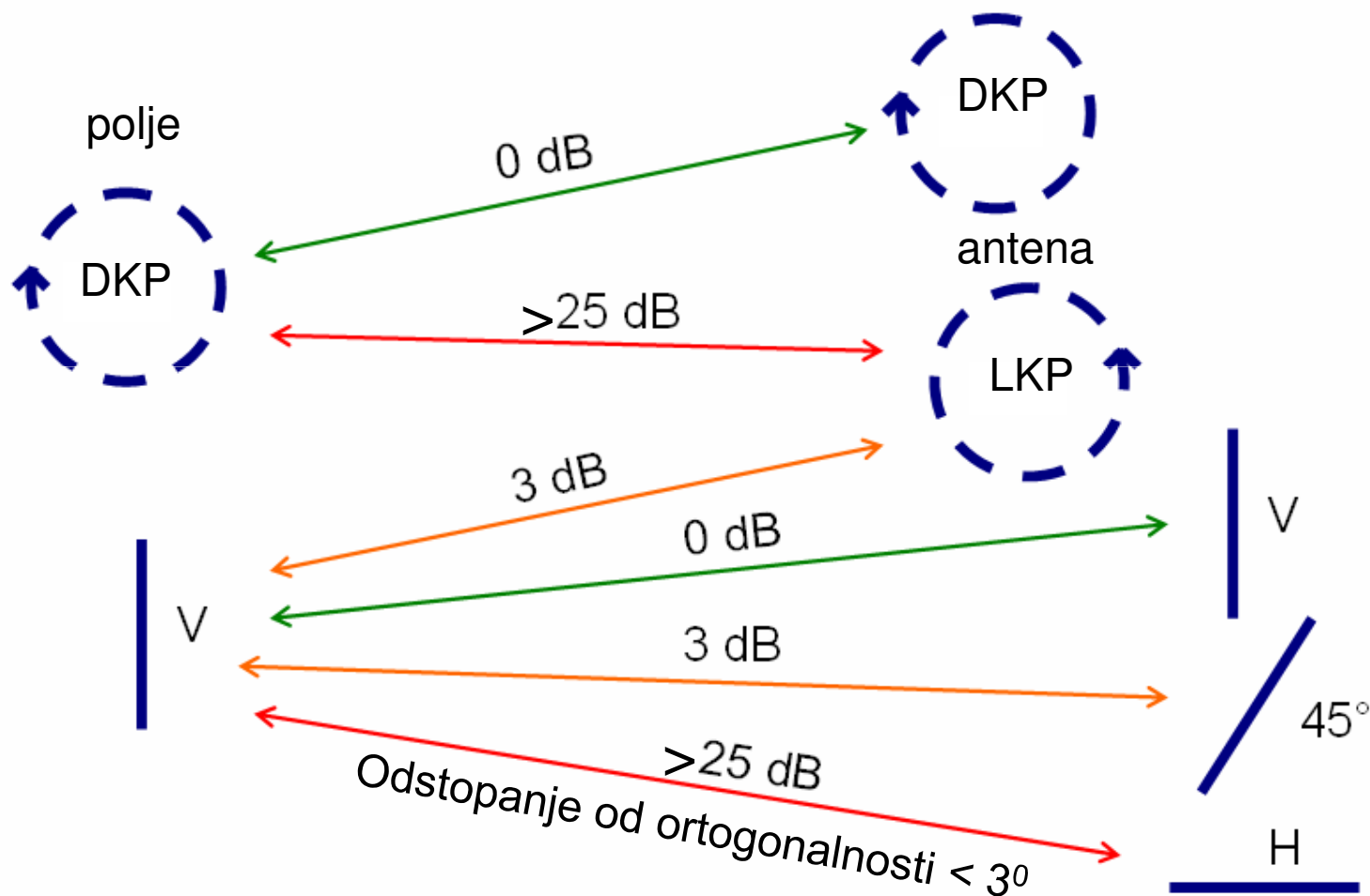


Smer širjenja gre v ravnino slike!

Polarizacijska elipsa



Preprosti primeri polarizacijske skladnosti in neskladnosti

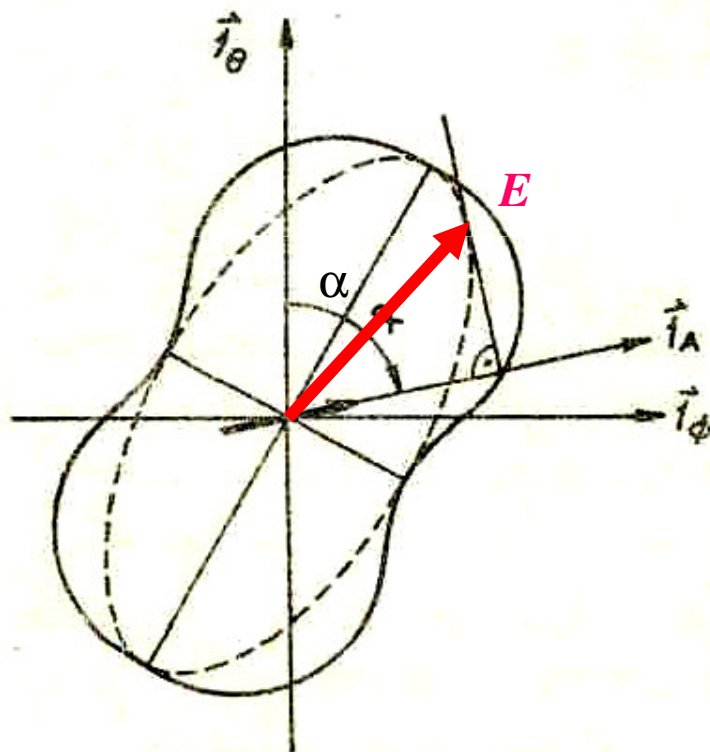


Slabljenje zaradi polarizacijske neskladnosti

Polarizacijska elipsa in polarizacijski vzorec

Eliptična polarizacija:

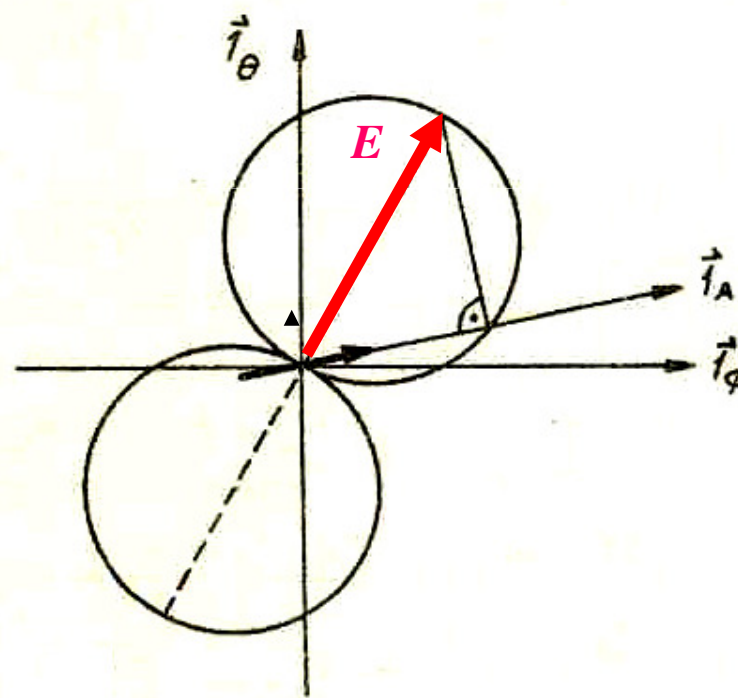
Vektor E med neenakomernim kroženjem in spreminjanjem dolžine oriše **polarizacijsko elipso**



Inducirana napetost na vrteči se linearni sondi zariše **polarizacijski vzorec**

Linearna polarizacija:

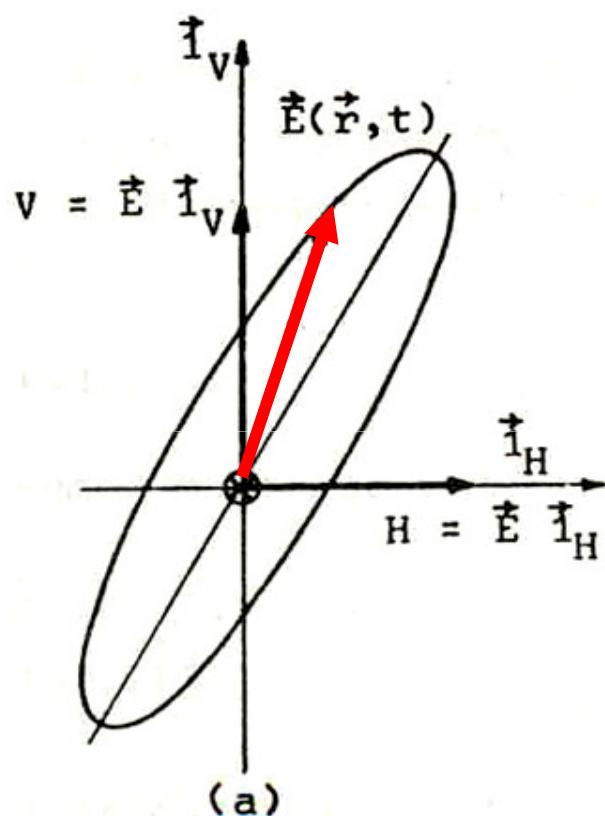
Vektor E ohranja smer in harmonično spreminja dolžino ter zariše **polarizacijsko daljico**



Inducirana napetost na vrteči se linearni sondi zariše **polarizacijski vzorec**

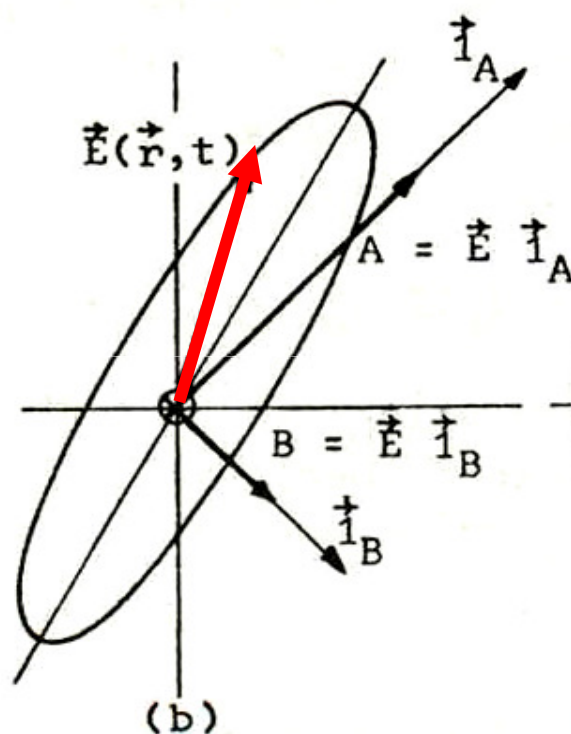
Razvoj eliptične polarizacije na komponente

Linearna baza V/H



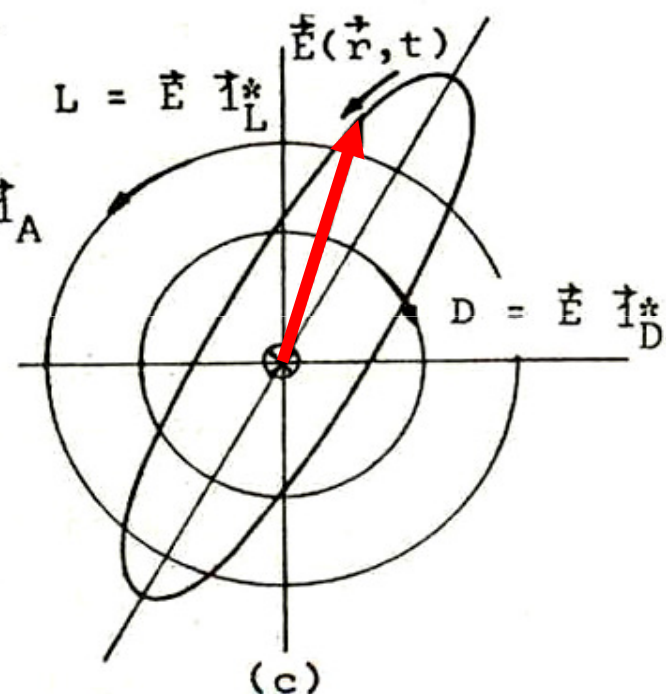
Eliptično polariziran val razvijemo na linearni komponenti V, H v smeri koordinatnih osi s fazno razliko δ

Linearna baza +/- 45°



Eliptično polariziran val razvijemo na linearni komponenti A, B (v smeri +/- 45°) s fazno razliko δ

Krožna baza L/D



Eliptično polariziran val razvijemo na krožni komponenti L, D s fazno razliko δ

Matrika polarizacijske razpršitve

Vpadni val E^t in odbiti val E^r

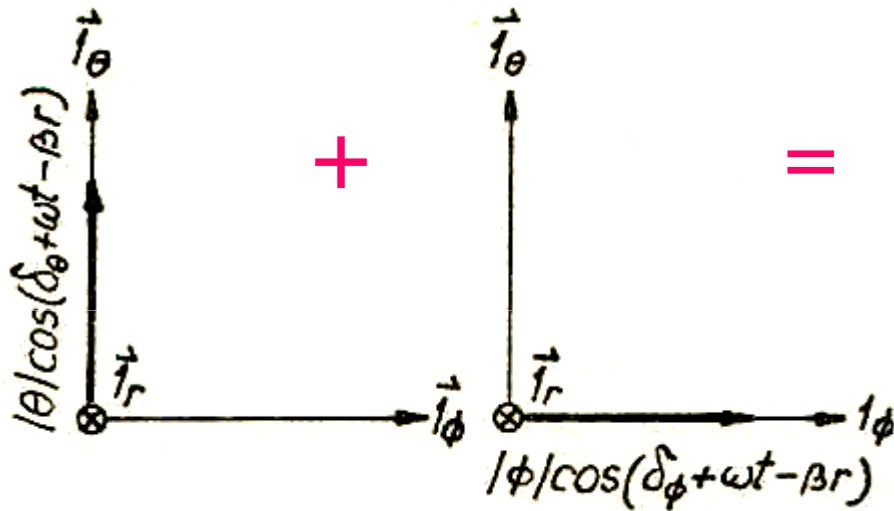
$$\begin{bmatrix} E_H^r \\ E_V^r \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} E_H^t \\ E_V^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^t \\ E_V^t \end{bmatrix}$$

Horizontalna oz. vertikalna komponenta vpadnega vala vzbudi poleg vzporedne komponente odbitega vala tudi še pravokotno komponento odbitega vala (depolarizacija),

Linearni komponenti H in V vpadnega in odbitega vala sta povezani preko matrike Razpršitve, S_{HH} do S_{VV} so parametri polarizacijske matrike. Matrika polarizacijske razpršitve je osnova za obravnavo polarimetrije.

Linearne in krožne komponente vala

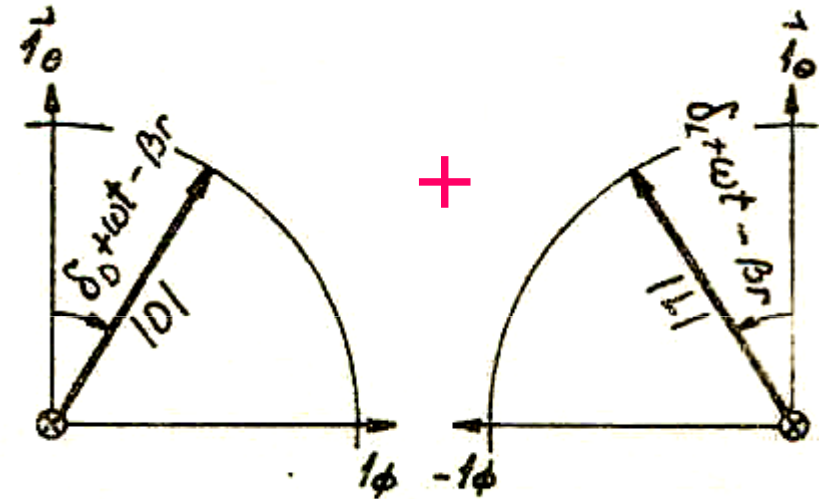
Linearne komponente:



$$\Theta = |\Theta| e^{j\delta_\theta} \quad \Phi = |\Phi| e^{j\delta_\phi}$$

$$\rho = \Phi/\Theta$$

Krožne komponente:



$$D = |D| e^{j\delta_D} \quad L = |L| e^{j\delta_L}$$

$$\rho = L/D, \quad L < D$$

Transformacija pol. baze in komponent

Baza (e_1, e_2) in baza (e_1', e_2') :

$$\begin{aligned}\vec{e}_1' &= A_{11}\vec{e}_1 + A_{12}\vec{e}_2, \\ \vec{e}_2' &= A_{21}\vec{e}_1 + A_{22}\vec{e}_2,\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \vec{e}_1' \\ \vec{e}_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{e}_1 \\ \vec{e}_2 \end{bmatrix}$$

Prehod iz baze e_1 in e_2 v novo bazo e_1' in e_2'

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11}^* & A_{21}^* \\ A_{12}^* & A_{22}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ali}$$

Transformacijska matrika $[A]$ je unitarna (ortogonalnost in normiranje)

$$[A] [A]^*{}^T = [1] \quad \text{ali} \quad [A]^* [A]^T = [1]$$

$$E_1' = A_{11}^* E_1 + A_{12}^* E_2,$$

$$E_1 = A_{11} E_1' + A_{21} E_2',$$

$$E_2' = A_{21}^* E_1 + A_{22}^* E_2,$$

$$E_2 = A_{12} E_1' + A_{22} E_2',$$

Primer: Bazni vektorji:

Primer: Komponente:

$$\begin{bmatrix} \vec{1}_L \\ \vec{1}_D \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{1}_V \\ \vec{1}_H \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} L \\ D \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ H \end{bmatrix}$$

Transformacija polarizacijskega razmerja

Komponente:

$$E_1' = A_{11}^* E_1 + A_{12}^* E_2, \quad E_2' = A_{21}^* E_1 + A_{22}^* E_2$$

Polarizacijsko razmerje:

$$\rho' = \frac{E_2'}{E_1'} = \frac{A_{21}^* E_1 + A_{22}^* E_2}{A_{11}^* E_1 + A_{12}^* E_2} = \frac{A_{21}^* + A_{22}^* \rho}{A_{11}^* + A_{12}^* \rho}$$

Polarizacijsko razmerje krožnih komponent L/D izraženo kot transformacija polarizacijskega razmerja linearnih komponent H/V:

$$\rho_{LD} = \frac{D}{L} = \frac{1 + jH/V}{1 - jH/V} = \frac{1 + j\rho_{VH}}{1 - j\rho_{VH}}$$

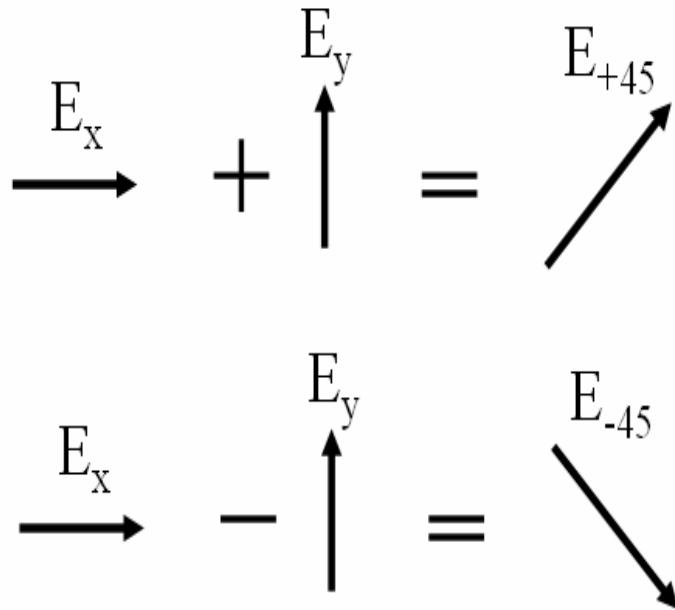
Uvedemo nov parameter $\rho_{VH} = jV/H$

$$\rho_{LD} = \frac{\rho_{VH} - 1}{\rho_{VH} + 1}, \quad (\rho_{VH} = jV/H) \quad \left(\Gamma = \frac{Z - 1}{Z + 1} \right)$$

Ugotovimo dualnost med ρ_{LD} in odbojnostjo Γ ter dualnost med ρ_{VH} in impedanco Z .
Polarzacijski problemi so analogni z impedančnimi problemi.

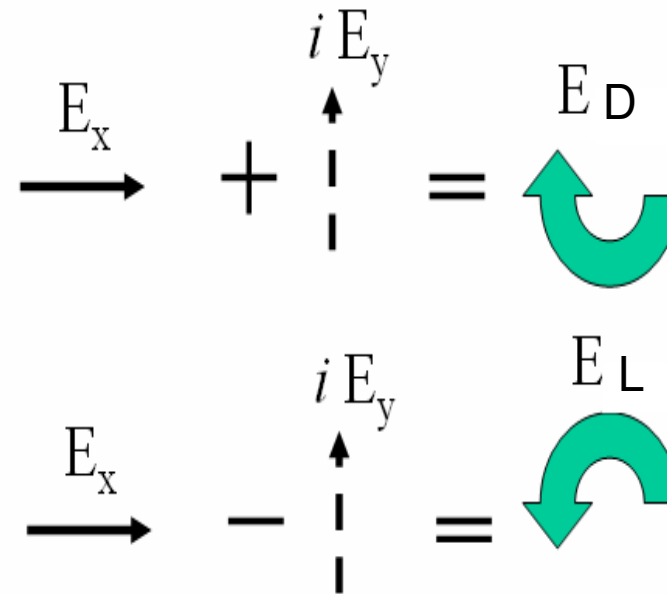
Sinteza in analiza – linearna baza

Linearni sofazni komponenti:
linearna poševna polarizacija



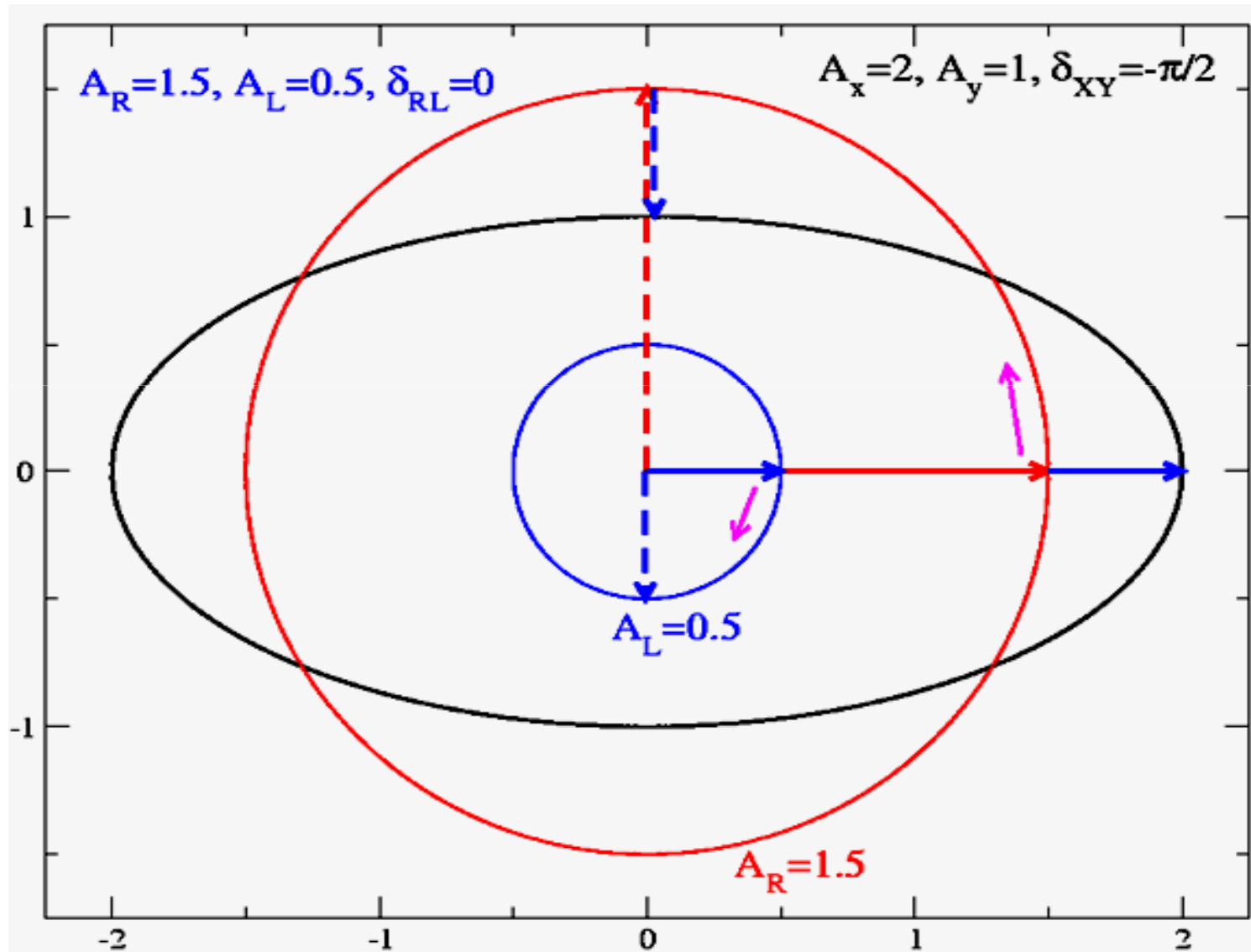
Vsota ali razlika dveh sofaznih ortogonalnih linearnih komponent daje poševno linearno polarizacijo. Kot naklona je odvisen od velikosti komponent.

Linearni kvadrturni komponenti:
leva in desna elipt. polarizacija



Vsota ali razlika dveh kvadrturnih ortogonalnih linearnih komponent daje desno ali levo krožno (eliptično) polarizacijo. Osno razmerje elipse je odvisno od velikosti komponent

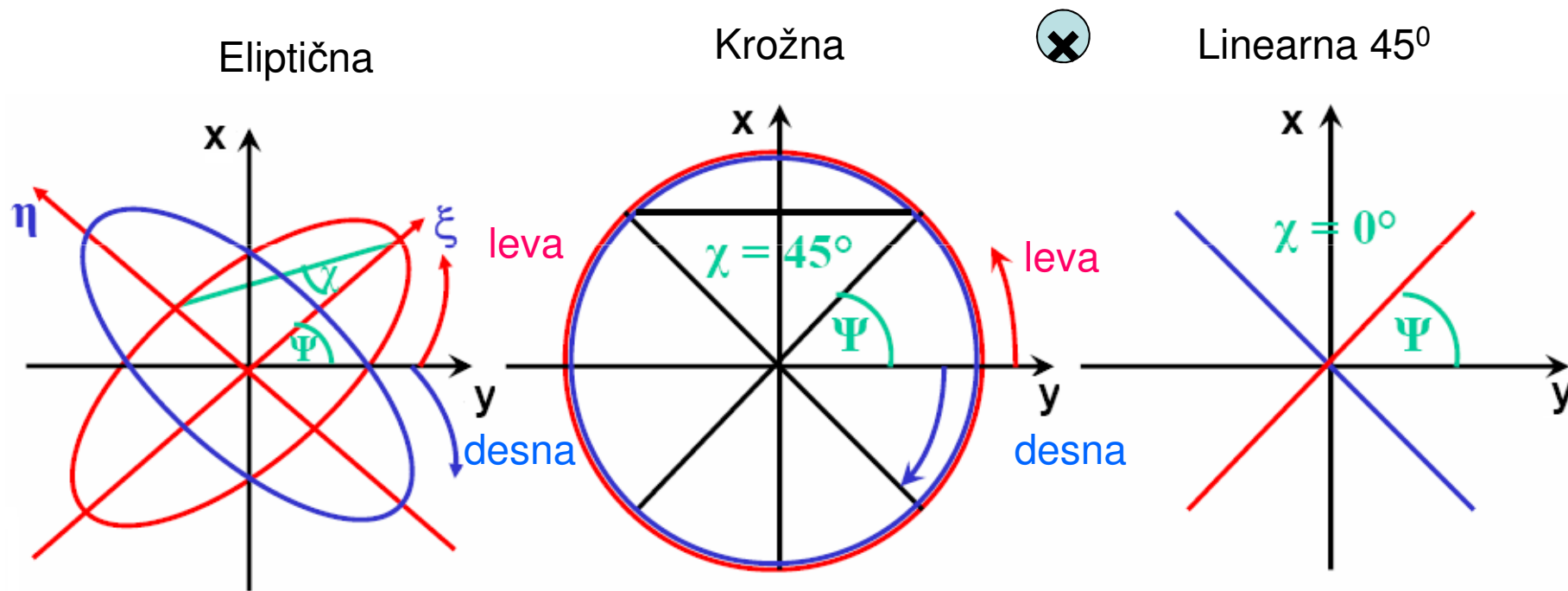
Krožne in linearne komponente



Ortogonalna polarizacija

Vsaki polarizaciji pripada ortogonalna polarizacija

Smer širjenja os z



$$\rho \rho_{\text{ort}}^* = -1$$

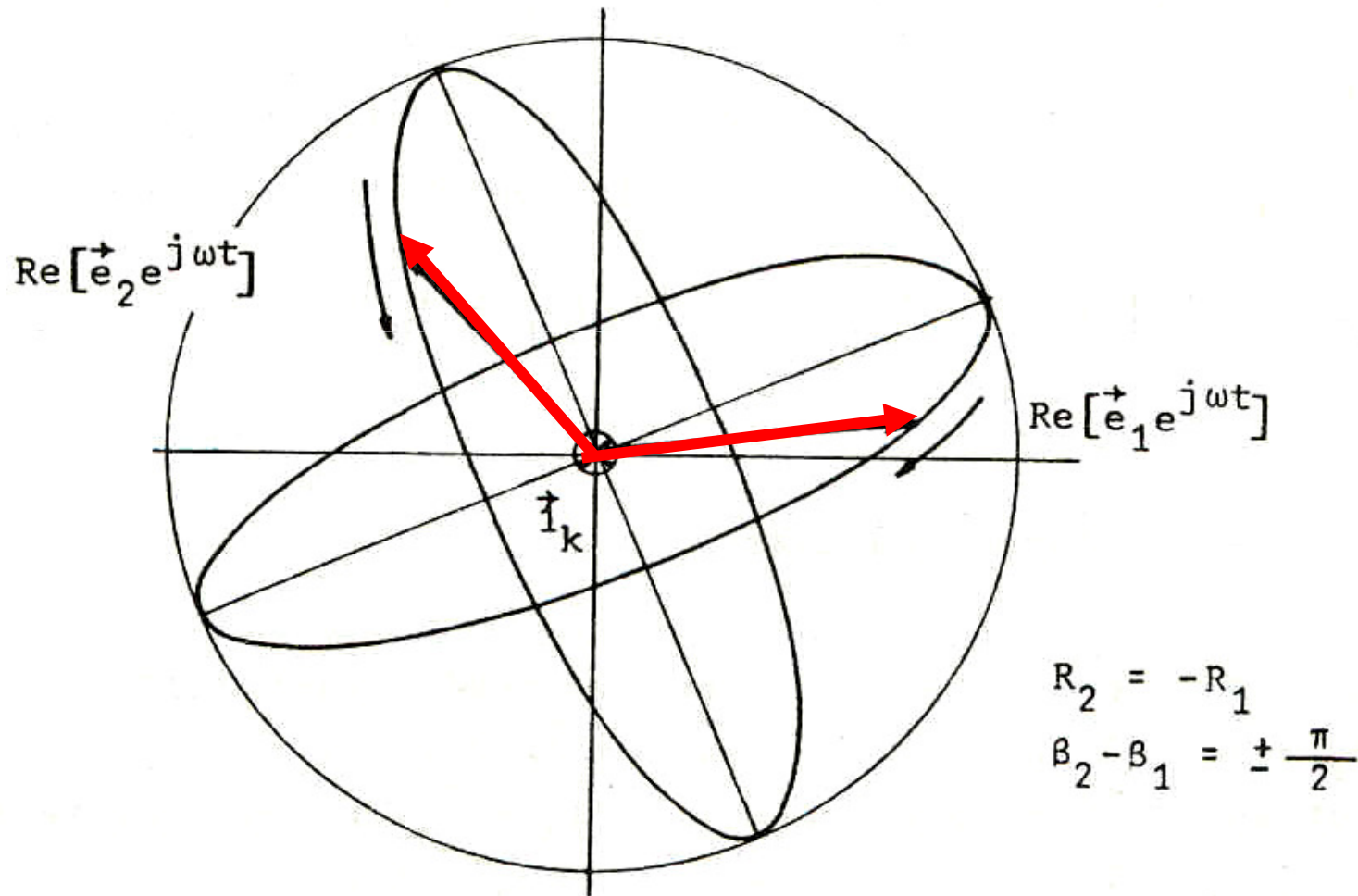
pogoj ortogonalnosti:

$$\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^* = 0 \quad \text{ali} \quad \mathbf{E}_2 = a \mathbf{1}_z \times \mathbf{E}_1$$

Ortogonalna eliptična polarizacija

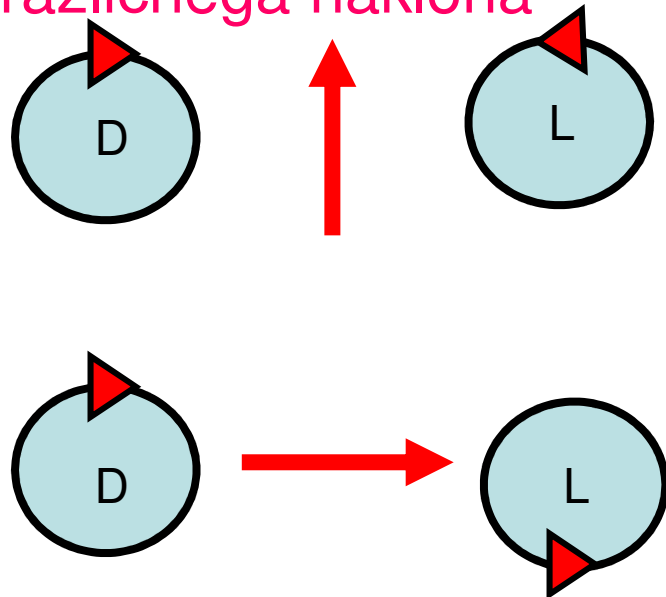
1. Elipsi enake ga osnega razmerja
3. Nasprotna smer vrtenja

2. veliki osi elips orthogonalni



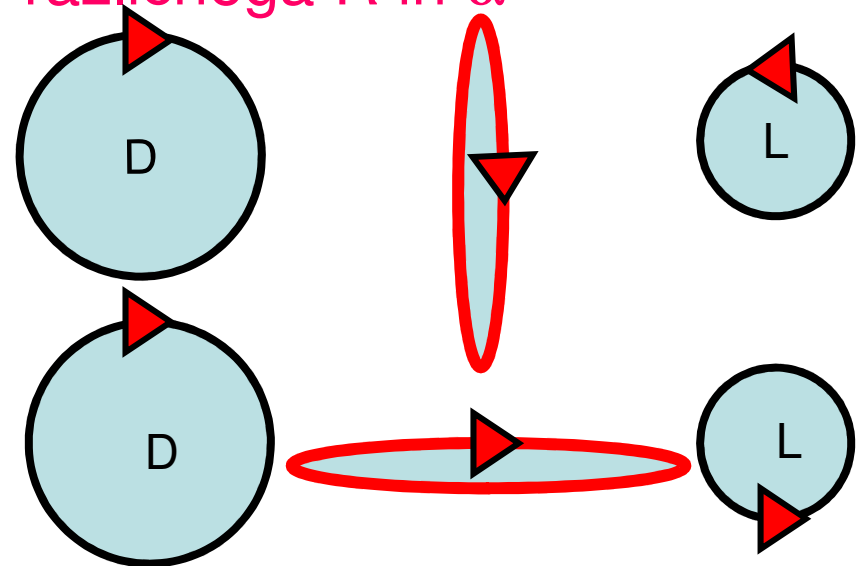
Sinteza in analiza – krožna baza

Krožni komponenti enake amplitude in različne faze:
Linearna polarizacija različnega naklona



Vsota dveh krožnih komponent enake amplitude daje linearno polarizacijo različne smeri. Sofazni krožni komponenti dajeta vertikalno polarizacijo, protifazni dajeta horizontalno polarizacijo

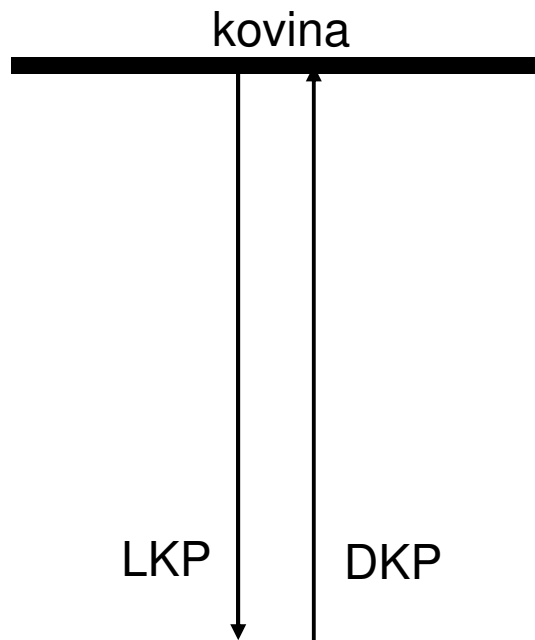
Krožni komponenti različne amplitude in faze:
Splošna eliptična polarizacija različnega R in α



Vsota dveh sofaznih krožnih komponent različne amplitude daje vertikalno elipso različnega osnega razmerja. Če sta krožni komponenti protifazni, je elipsa horizontalna

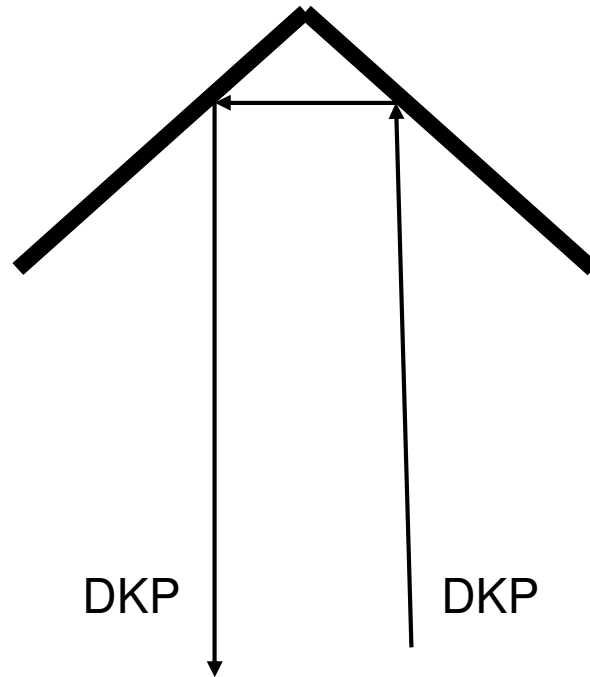
Krožna polarizacija - odboj

Odboj od ravnega reflektorja



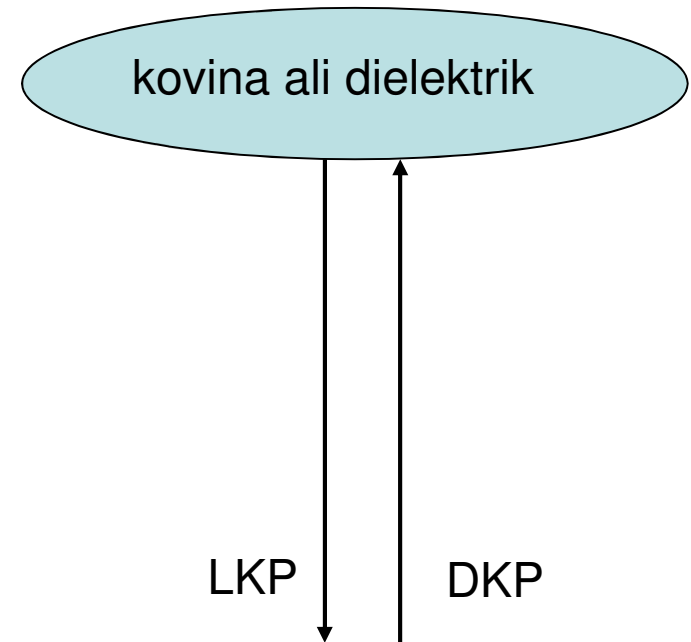
DKP vpadnega vala se odbije kot LKP. Polarizacija se sprevrže v nasprotno polarizacijo. Antena odboja ne zaznava.

Odboj od kotnega reflektorja



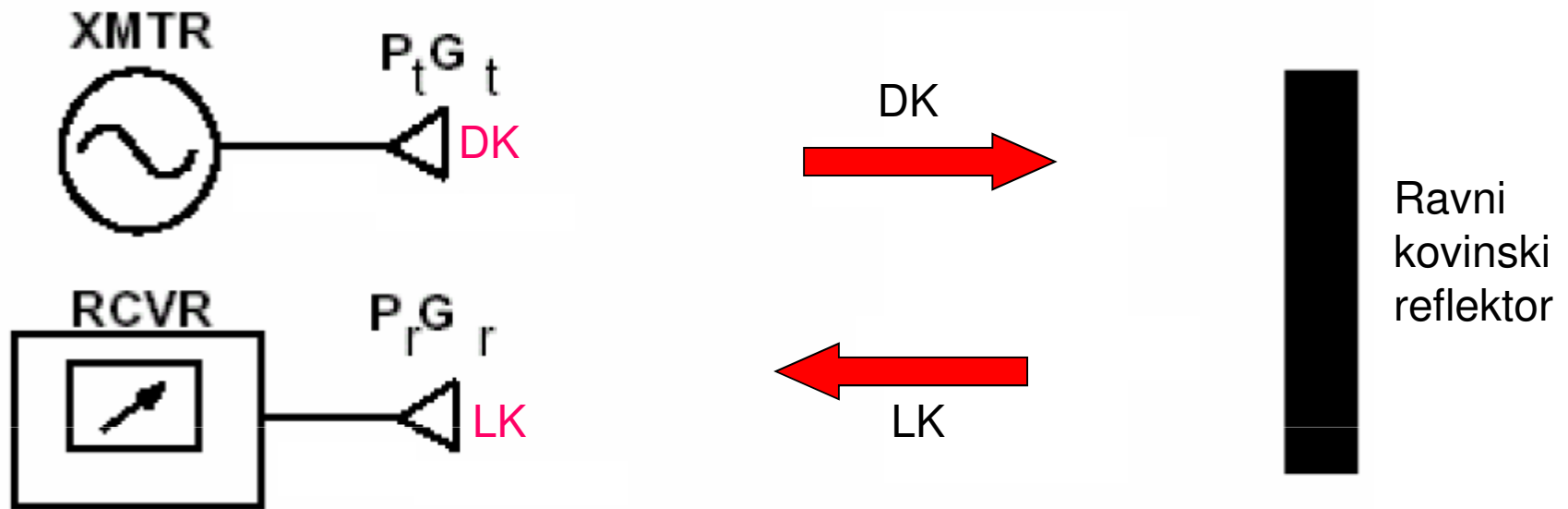
DKP vpadnega vala se po dveh odbojih odbije kot DKP. Antena odboj zaznava.

Odboj od oblega simetričnega objekta



DKP vpadnega vala se odbije kot LKP. Antena odboja ne zaznava. Velja tudi za vodne kapljice.

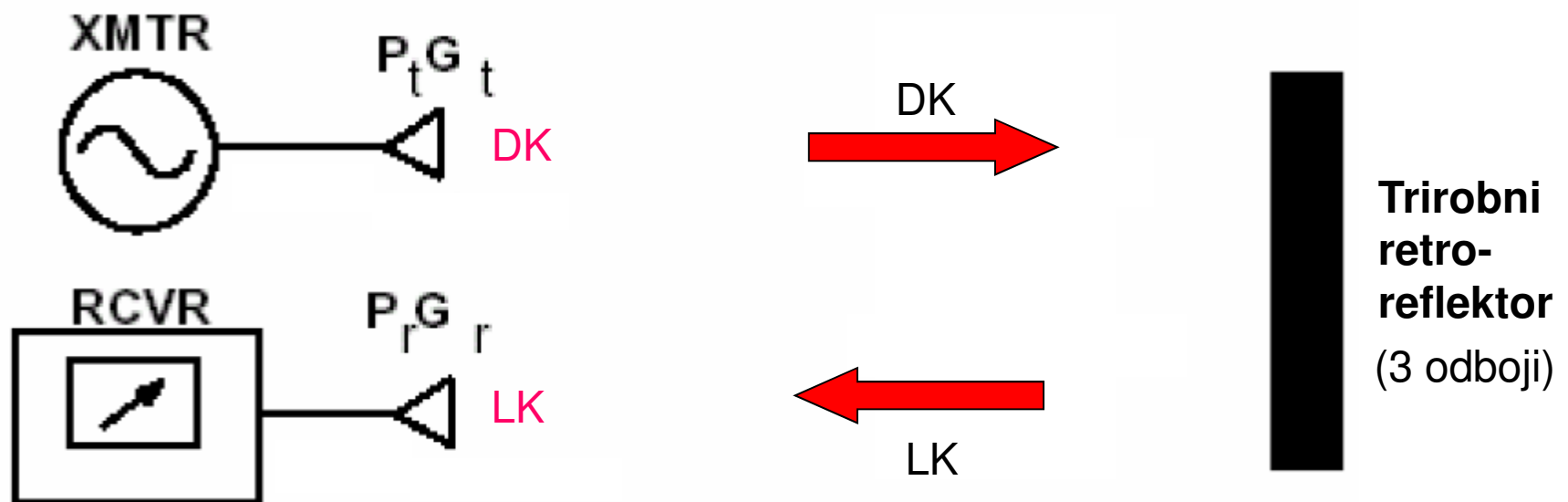
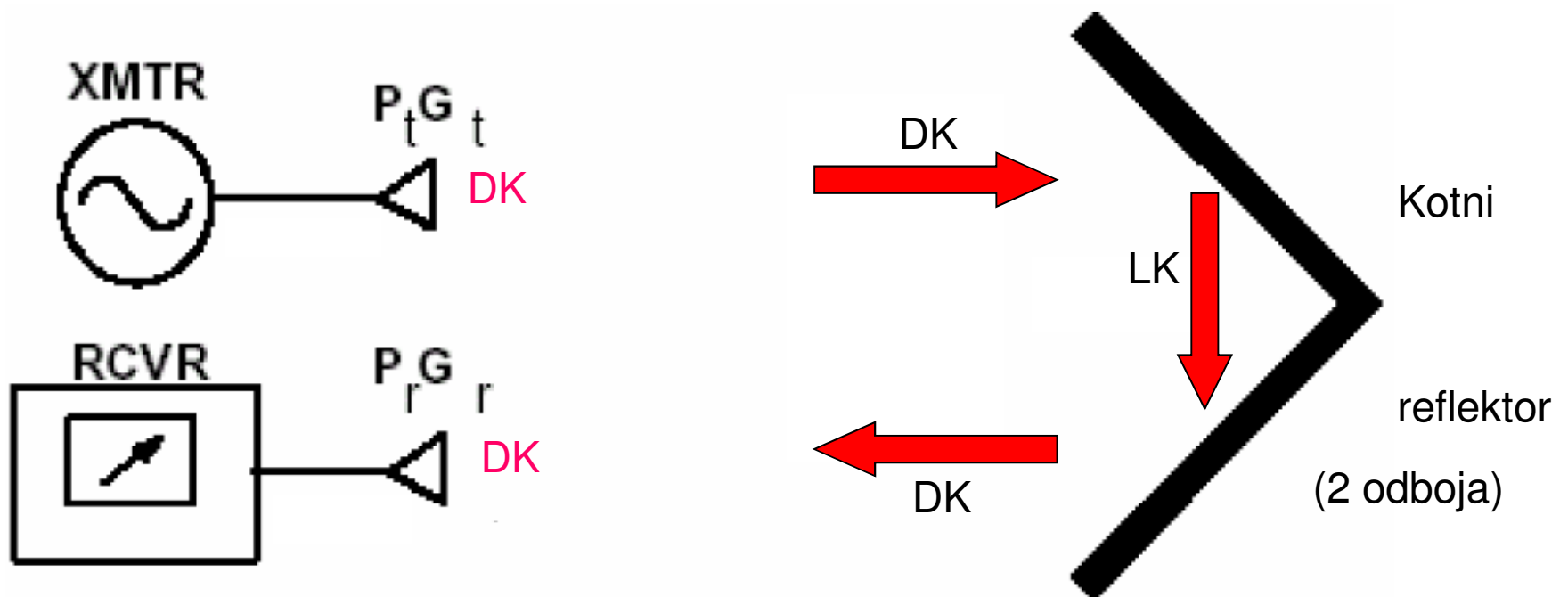
Odboj krožne polariz. od ravnega reflektorja



Primer:

Pri navpičnem vpadu na ravno zemljo poljubnih snovnih parametrov se krožno polariziran val odbije kot val nasprotne krožne polarizacije. Desna polarizacija gre v levo in obratno.

Odboj krožne polariz. od kotnega reflektorja

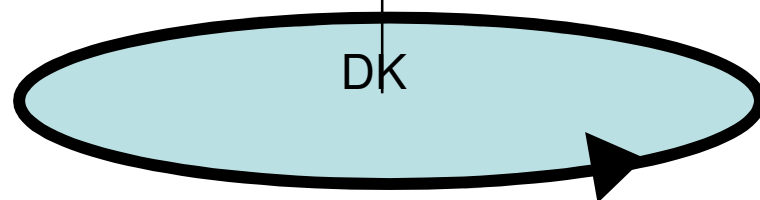


Obračanje faze s krožno polarizacijo

- Krožno polarizirana antena kot fazni obračalnik

Zasuk DK antene v desno za α stopinj povzroči na sprejemu fazno prehitevanje za α stopinj

Zasuk DK antene v levo za α stopinj povzroči na sprejemu fazno zaostajanje za α stopinj



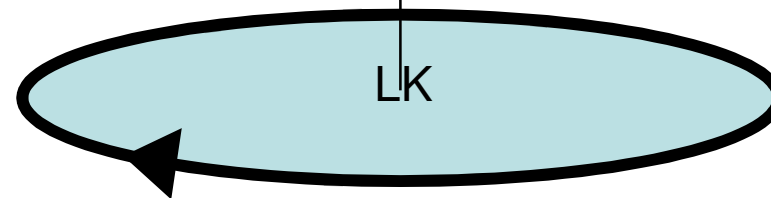
Antena DK polarizacije

Krožno polarizirana antena osnega razmerja $R = 0$ dB je idealen obračalnik faze sevanega polja.

Primer: Rendes-vous radar Gemini (projekt Appolo)

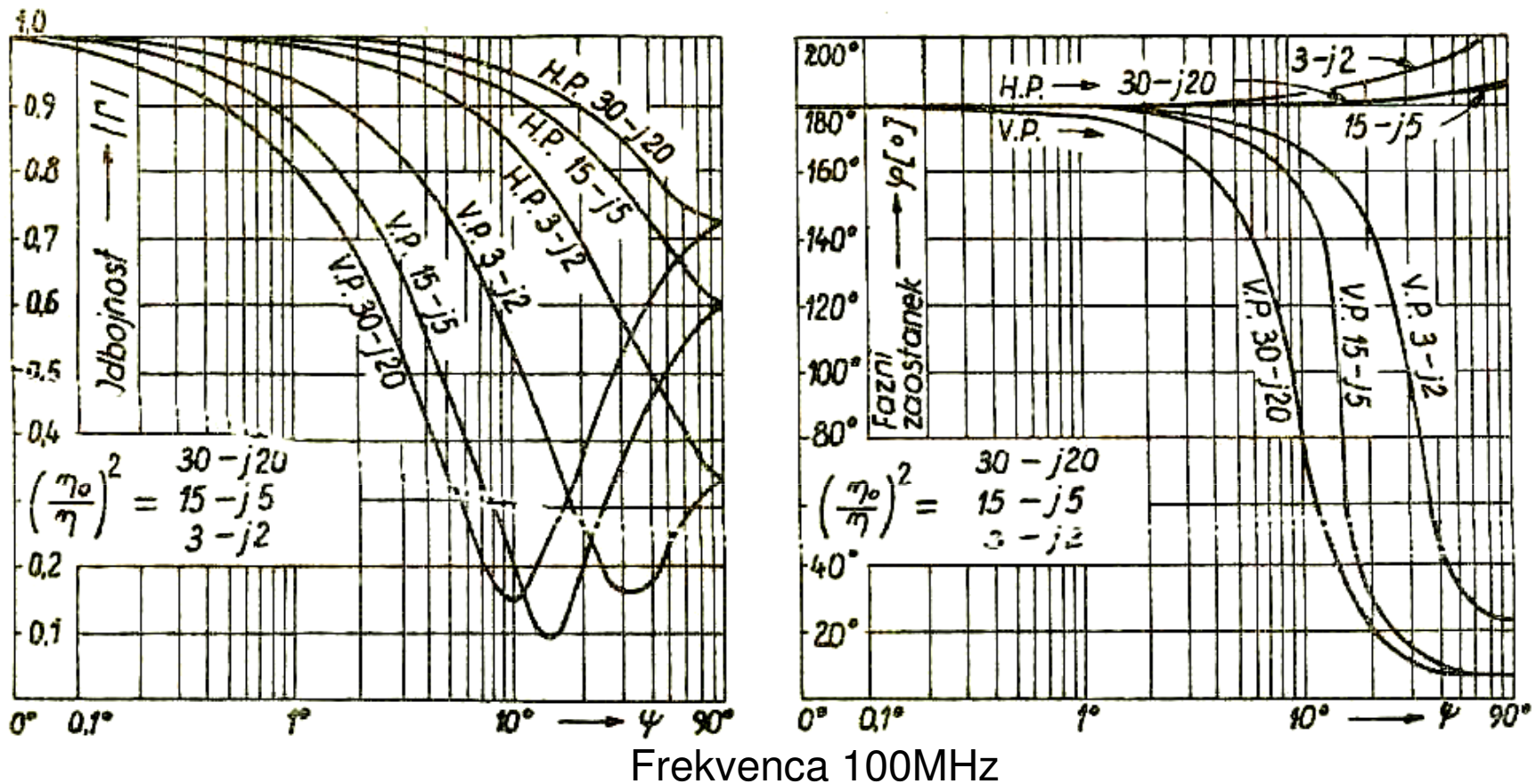
Zasuk LK antene v levo za α stopinj povzroči na sprejemu fazno prehitevanje za α stopinj

Zasuk LK antene v desno za α stopinj povzroči na sprejemu fazno zaostajanje za α stopinj



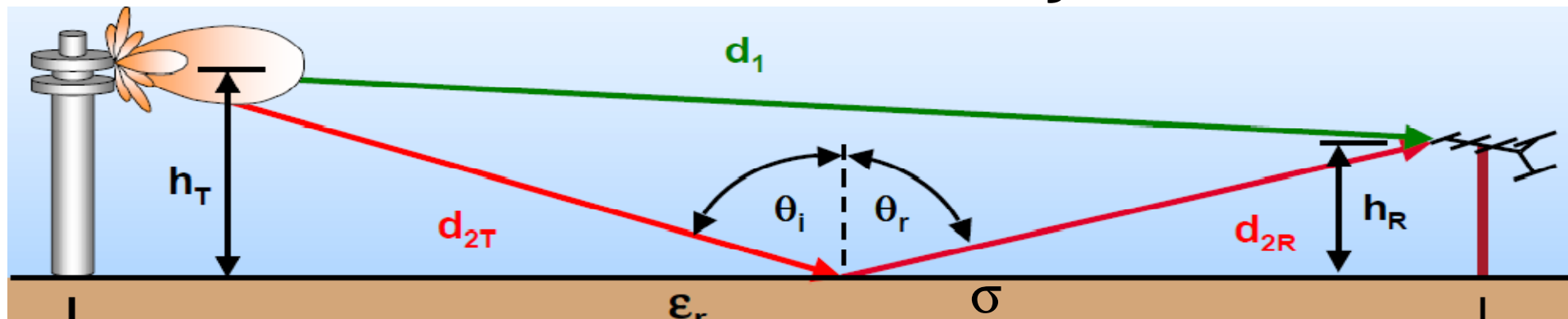
Antena LK polarizacije

Odbojnost tal pri HP in VP



1. Pri poševnem vpadu val linearne polarizacije HP in VP po odboju od ravnih tal različne prevodnosti in dielektričnosti spremeni jakost in fazo, laho tudi bistveno.
2. Pri vpadu pod majhnim kotom se linearna polarizacija LP ohranja.
3. Val krožne polarizacije DKP oz. LKP bistveno spremeni svoje karakteristike.

Fresnelova odbojnost



Odbojnost pri horizontalni polarizaciji:

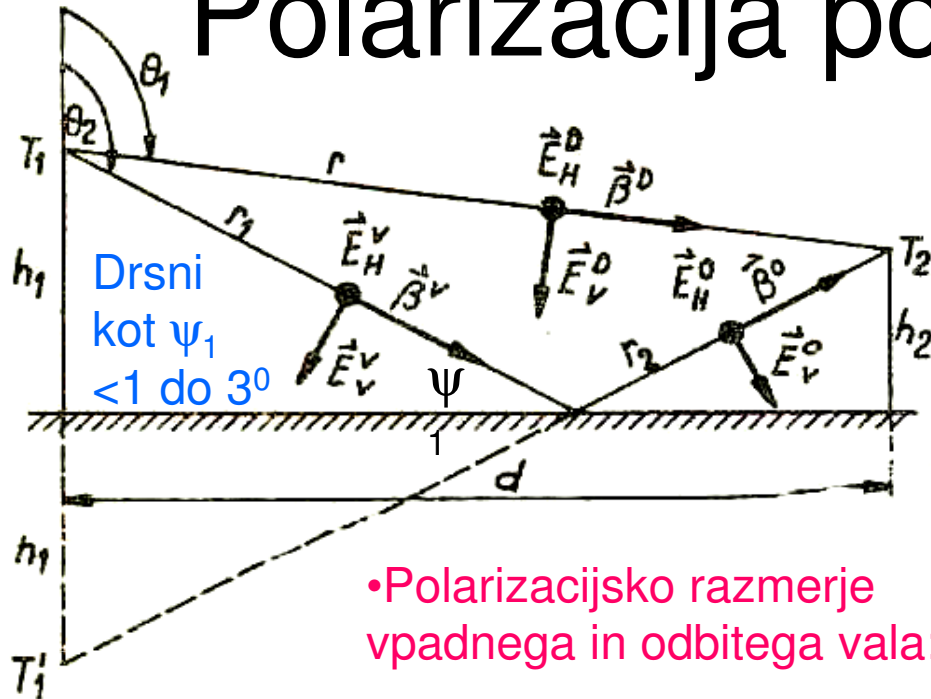
$$\Gamma = \rho \exp(j\phi)$$

$$\Gamma^{\text{TE}} = \Gamma^{\perp} = \frac{\cos \theta - \sqrt{(\epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0) - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{(\epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0) - \sin^2 \theta}}$$

Odbojnost pri vertikalni polarizaciji:

$$\Gamma^{\text{TM}} = \Gamma^{\parallel} = \frac{(\epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0) \cos \theta - \sqrt{(\epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0) - \sin^2 \theta}}{(\epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0) \cos \theta + \sqrt{(\epsilon_r - j\sigma/\omega\epsilon_0) - \sin^2 \theta}}$$

Polarizacija po odboju od tal



Drсни kot $\psi_1 < 1$ do 30°

•Polarizacijsko razmerje vpadnega in odbitega vala:

Odboj na okovinjeni ravnini pod poljubnim vpadnim kotom:

$$\Gamma_V = 1, \Gamma_H = -1$$

Drсни odboj na poljubnih ravnih tleh:

$$\Gamma_H = \Gamma_V = -1, \psi_1 \rightarrow 0$$

•Polarizacija se po odboju spremeni v razmerju Γ_V/Γ_H

$$P^V = E_V^V / E_H^V \quad P^O = \frac{E_V^O}{E_H^O} = \frac{\Gamma_V}{\Gamma_H} P^V$$

1. Vpad krožno polariziranega vala (DK, LK) na okovinjeno ravnino. Smisel se obrne.
2. Vpad poševno linearno polariziranega vala (HP + VP) na okovinjeno ravnino. Smer polja se spremeni.
3. Vpad krožno polariziranega vala na ravna tla pod drsnim kotom. Spremeni se razmerje komponent. Polarizacija postane eliptična z enakim smislom vrtenja.
4. Vpad poševno linearno polariziranega vala (HP + VP) na ravna tla pod drsnim kotom. Po odboju se smer polja spremeni oz. nastane elipsa velikega osnega razmerja.

Analogija polarizacija - valovanje

Linija:

1. Razmerje stojnega vala
 $S = U_{\max}/U_{\min} \text{ (SWR)} > 1$

2. Odbojnost bremena
 $\Gamma = U^o/U^n < 1$

3. Impedanca bremena

4. Napredujoči val

5. Odbiti val

6. Pomik proti generatorju kl^0

Polarizacija:

Oсно razmerje $R = a/b > 1$

Polariz. razmerje (krožno)
 $\rho = L/D < 1$

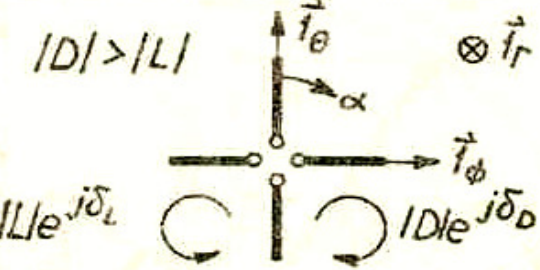
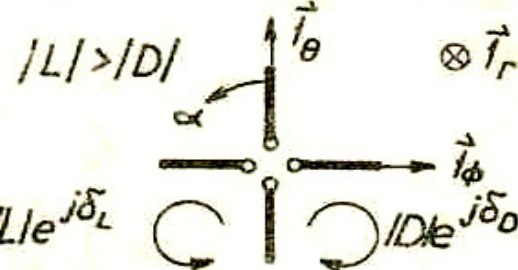
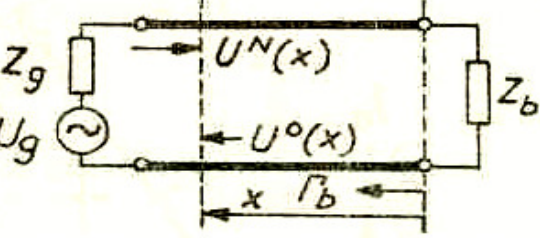
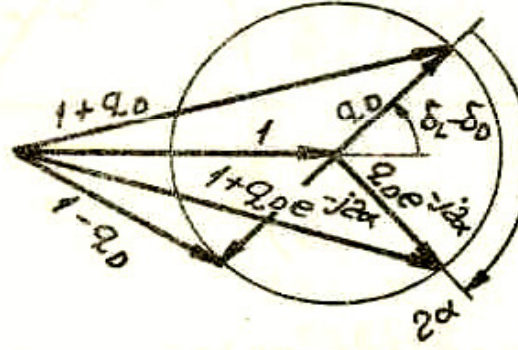
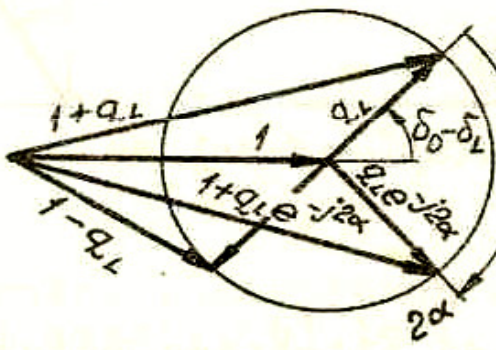
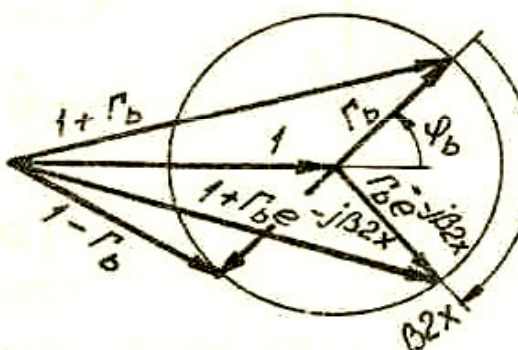
Polariz. razmerje (linearno)

Prevladujoča krožna komp.

Druga krožna komp.

Zasuk v smeri prevl. komp. τ^0

Analogija polarizacije z linijo 1/2

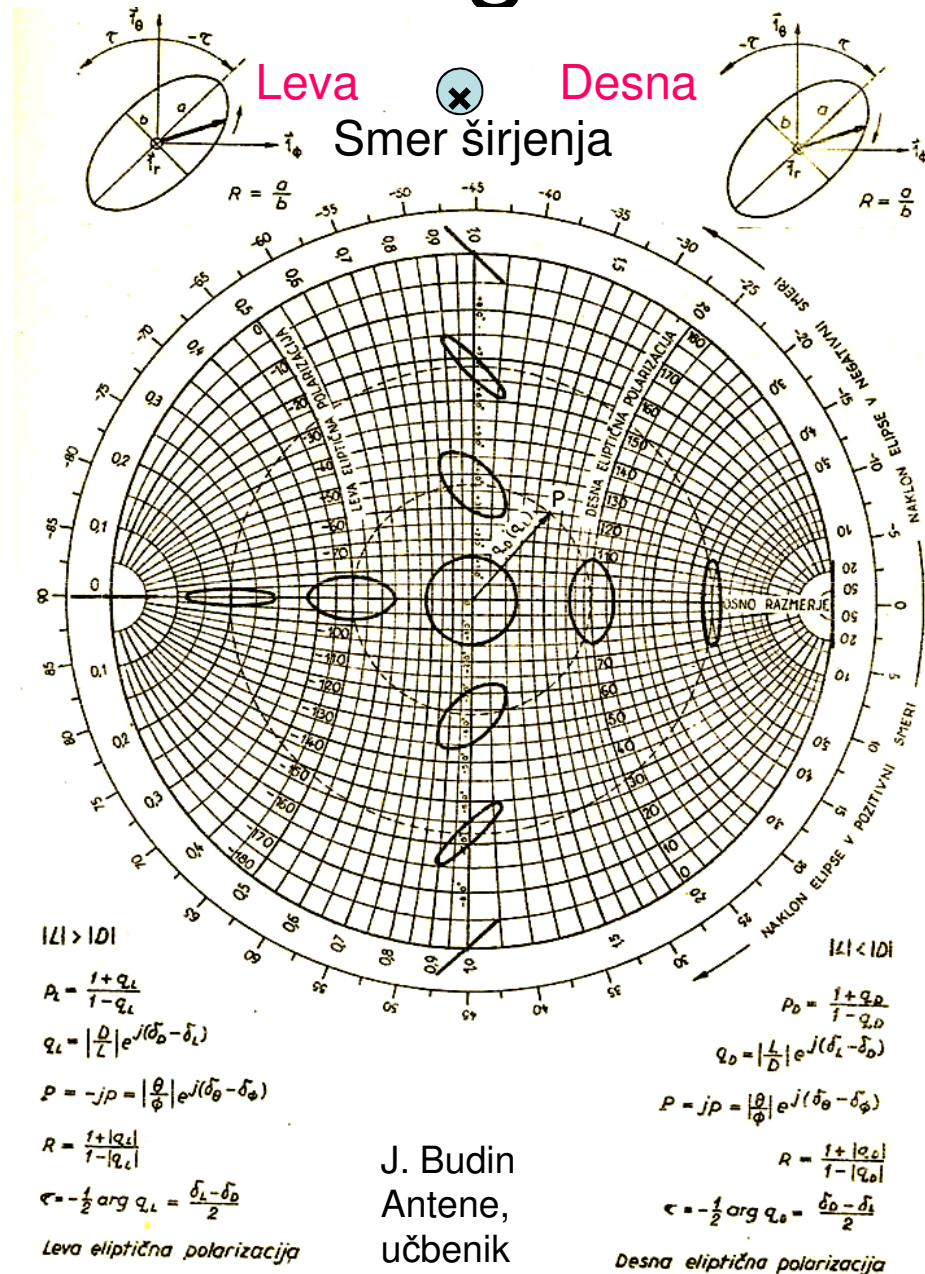
<p>$D > L$</p> 	<p>$L > D$</p> 	
		
<p>Razmerje krožnih komponent</p> $q_D = q_D e^{j(\delta_L - \delta_D)} = \frac{P_D - 1}{P_D + 1}$	<p>Razmerje krožnih komponent</p> $q_L = q_L e^{j(\delta_D - \delta_L)} = \frac{P_L - 1}{P_L + 1}$	<p>Odbojnost bremena</p> $\Gamma_b = \Gamma_b e^{j\varphi_b} = \frac{Z_b - Z_k}{Z_b + Z_k}$
<p>Razmerje linearnih komponent</p> $P_D = -j P_D e^{j(\delta_\theta - \delta_\phi)} = \frac{1 + q_D}{1 - q_D}$	<p>Razmerje linearnih komponent</p> $P_L = j P_L e^{j(\delta_\theta - \delta_\phi)} = \frac{1 + q_L}{1 - q_L}$	<p>Impedanca bremena</p> $\frac{Z_b}{Z_k} = \frac{ Z_b }{Z_k} e^{j\theta_b} = \frac{1 + \Gamma_b}{1 - \Gamma_b}$

Analogija polarizacije z linijo 2/2

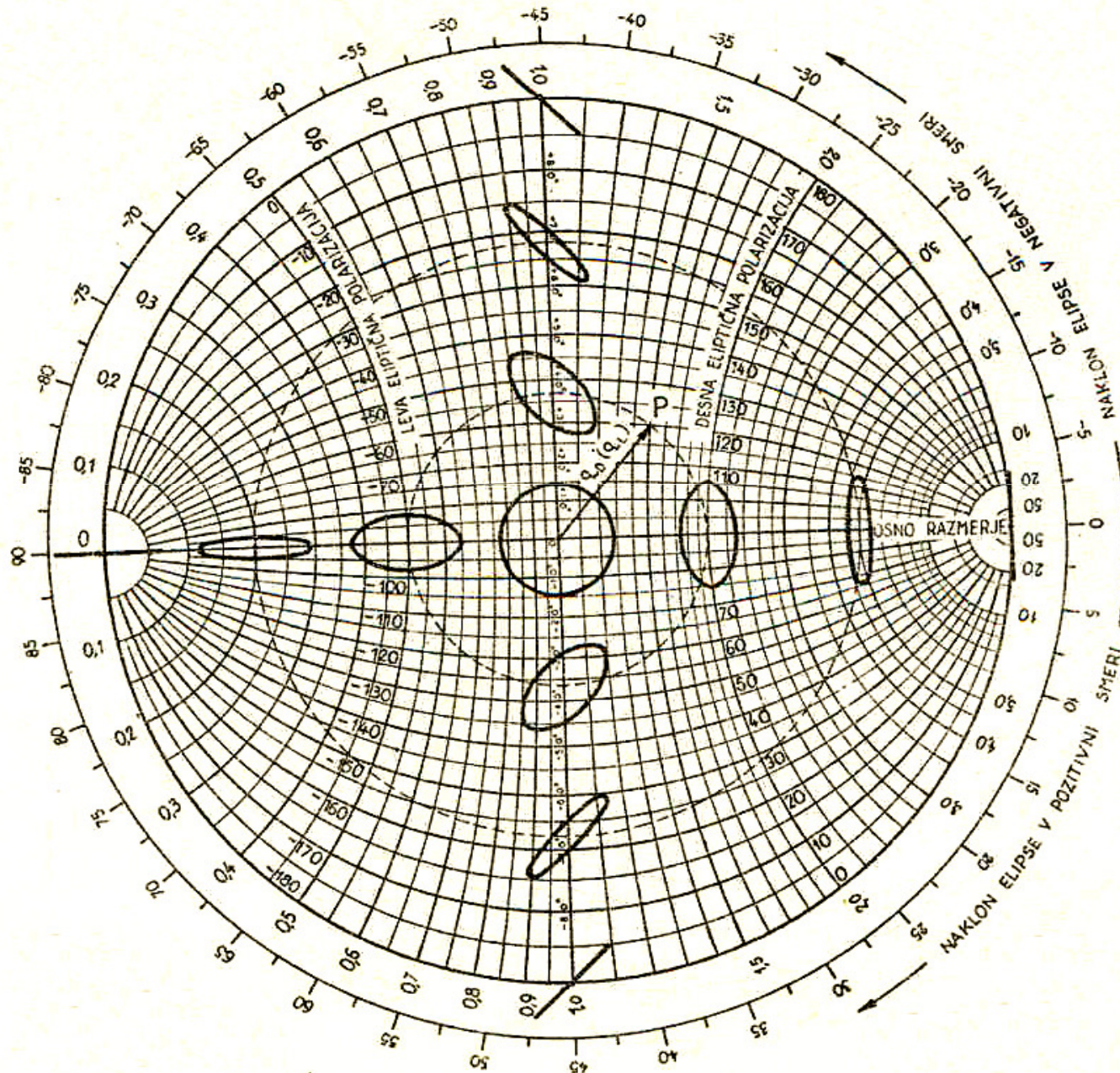
Zasuk v desno α	Zasuk v levo α	Električna dolžina βx
Desna komponenta $D(\alpha) = D(0)e^{j\alpha}$	Leva komponenta $L(\alpha) = L(0)e^{j\alpha}$	Napredujoči val $U^N(x) = U^N(0)e^{j\beta x}$
Leva komponenta $L(\alpha) = L(0)e^{-j\alpha}$	Desna komponenta $D(\alpha) = D(0)e^{-j\alpha}$	Odbiti val $U^O(x) = U^O(0)e^{-j\beta x}$
Razmerje krožnih komponent po zasuku v desno $q_D(\alpha) = q_D e^{-j2\alpha}$	Razmerje krožnih komponent po zasuku v levo $q_L(\alpha) = q_L e^{-j2\alpha}$	Odbojnost na liniji $\Gamma(x) = \Gamma_b e^{-j\beta 2x}$
Normirana vertikalna komponenta $\frac{\theta(\alpha)}{D(\alpha)} = 1 + q_D e^{-j2\alpha}$	Normirana vertikalna komponenta $\frac{\theta(\alpha)}{L(\alpha)} = 1 + q_L e^{-j2\alpha}$	Normirani stojni val napetosti $\frac{U(x)}{U^N(x)} = 1 + \Gamma_b e^{-j\beta 2x}$
Oсно razmerje $R = \frac{a}{b} = \frac{1 + q_D }{1 - q_D }$	Oсно razmerje $R = \frac{a}{b} = \frac{1 + q_L }{1 - q_L }$	Valovitost $\mathcal{G} = \left \frac{U_M}{U_m} \right = \frac{1 + \Gamma_b }{1 - \Gamma_b }$

Carterjev Z-Theta diagram

- Impedančni kalkulator
 - Polarizacijski kalkulator
- Dualnost polarizacije in valovanja na liniji:**
- pol. elipsa - stojni val
 - osno razmerje – razmerje stojnega vala
 - razmerje L/D – odbojnost
 - vrtenje elipse – konc. krogi
 - Poincaréjeva krogla
 - Elektromagnetika in optika



Polarizacijski kalkulator



Sprejem

$$\vec{E} = \vec{e}_1 E_1 + \vec{e}_2 E_2 \quad \text{polje}$$

$$\vec{L} = \vec{e}_1 L_1 + \vec{e}_2 L_2 \quad \text{antena}$$

$$\eta_p = \frac{P}{P_{\max}} = \frac{(\vec{E} \cdot \vec{L}^*)(\vec{E} \cdot \vec{L}^*)^*}{\vec{E} \cdot \vec{E}^* \vec{L} \cdot \vec{L}^*} \quad \text{polarizacijski izkoristek}$$

$$\vec{e}_i \cdot \vec{e}_i^* = 1 \quad \text{in} \quad \vec{e}_i \cdot \vec{e}_j^* = 0$$

$$\rho_E = E_2/E_1 \quad \text{in} \quad \rho_L = L_2/L_1$$

$$\eta_p = \frac{(E_1 L_1^* + E_2 L_2^*)(E_1^* L_1 + E_2^* L_2)}{(E_1 E_1^* + E_2 E_2^*)(L_1 L_1^* + L_2 L_2^*)} = \frac{(1 + \rho_E \rho_L^*)(1 + \rho_E^* \rho_L)}{(1 + \rho_E \rho_E^*)(1 + \rho_L \rho_L^*)}$$

1. Izkoristek je maksimalen: $\rho_L = \rho_E$ ali $L_2/L_1 = E_2/E_1$ VAŽNO

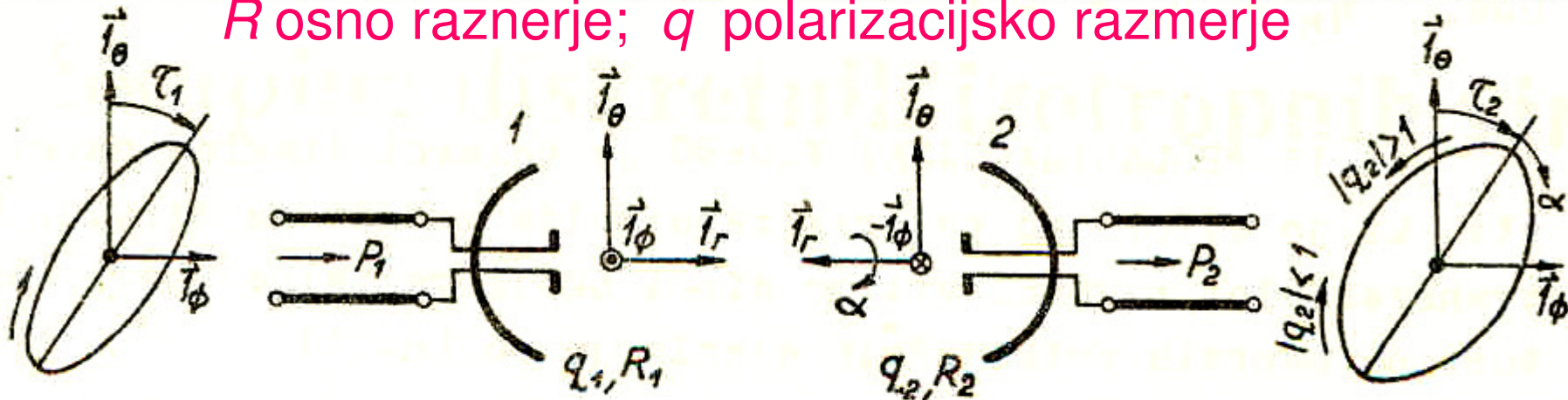
Elipsi imata enako osno razmerje, enako lego in smisel vrtenja.

2. Izkoristek je nič: $\rho_L = -1/\rho_E^*$ ali $L_1/L_2 = -(E_1/E_2)^*$

Elipsi imata enako osno razmerje, ortogonalno lego in nasproten smisel vrtenja.

Polarizacijski izkoristek v radijskem prenosu

R osno razmerje; q polarizacijsko razmerje



$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{opt.}}{P_1} \eta = \frac{G_1 A_2}{4\pi r^2} \frac{(1 + q_1 q_2 e^{-j2\alpha}) (1 + q_1^* q_2^* e^{j2\alpha})}{(1 + q_1 q_1^*) (1 + q_2 q_2^*)}$$

Dve različni
eliptično
polarizirani
anteni
 $|q_1| < 1$
 $|q_2| < 1 \dots +$
 $|q_2| > 1 \dots -$

Maksimalna vrednost:

$$\eta_M = \frac{(1 + |q_1 q_2|)^2}{(1 + |q_1|^2)(1 + |q_2|^2)} = \frac{(1 \pm |R_1 R_2|)^2}{(1 + R_1^2)(1 + R_2^2)}$$

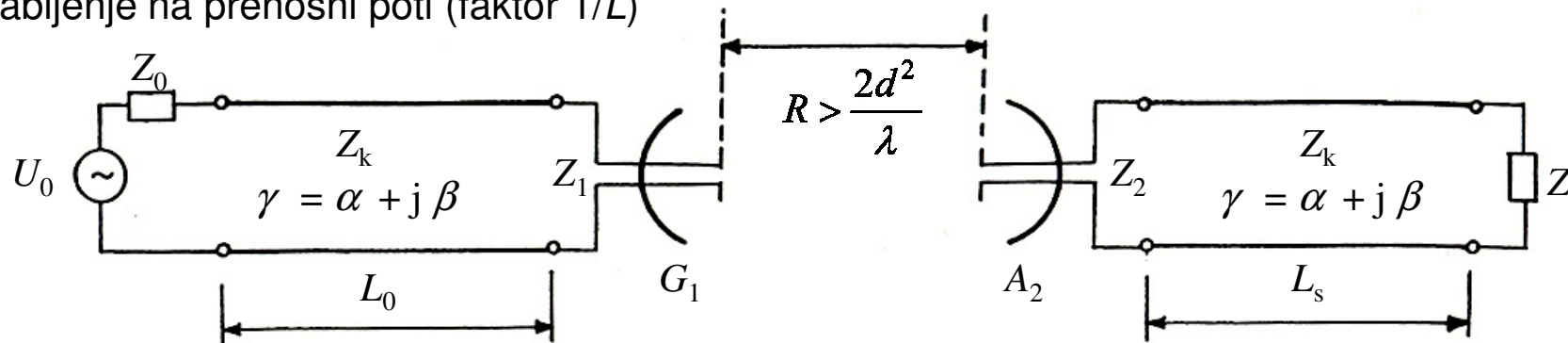
Minimalna vrednost:

$$\eta_m = \frac{(1 - |q_1 q_2|)^2}{(1 + |q_1|^2)(1 + |q_2|^2)} = \frac{(R_1 \pm R_2)^2}{(1 + R_1^2)(1 + R_2^2)}$$

RAZŠIRJENA PRENOSNA ENAČBA - neprilagojenost in neusklajenost

Upoštevamo:

- slabljenje v kablih (faktor $e^{-2\alpha L}$)
- dodatno slabljenje zaradi neprilagojenosti na oddajni in sprejemni strani (izkoristek η_0 in η_s)
- dodatno slabljenje zaradi polarizacijske neskladnosti (izkoristek η_p)
- slabljenje na prenosni poti (faktor $1/L$)



$$\Gamma_0 = \frac{Z_0 - Z_k}{Z_0 + Z_k}$$

$$Q_1 = \frac{E_{L1}}{E_{D1}}$$

$$Q_2 = \frac{E_{L2}}{E_{D2}}$$

$$\Gamma_2 = \frac{Z_2 - Z_k}{Z_2 + Z_k}$$

$$\Gamma_1 = \frac{Z_1 - Z_k}{Z_1 + Z_k}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\lambda^2 G_1 G_2 \eta_0 \eta_s \eta_p}{(4\pi R)^2 L}$$

$$\Gamma_s = \frac{Z_s - Z_k}{Z_s + Z_k}$$

$$\eta_0 = \frac{(1 - |\Gamma_0|^2)(1 - |\Gamma_1|^2)e^{-2\alpha L_0}}{|1 - \Gamma_0 \Gamma_1 e^{-2\gamma L_0}|^2}$$

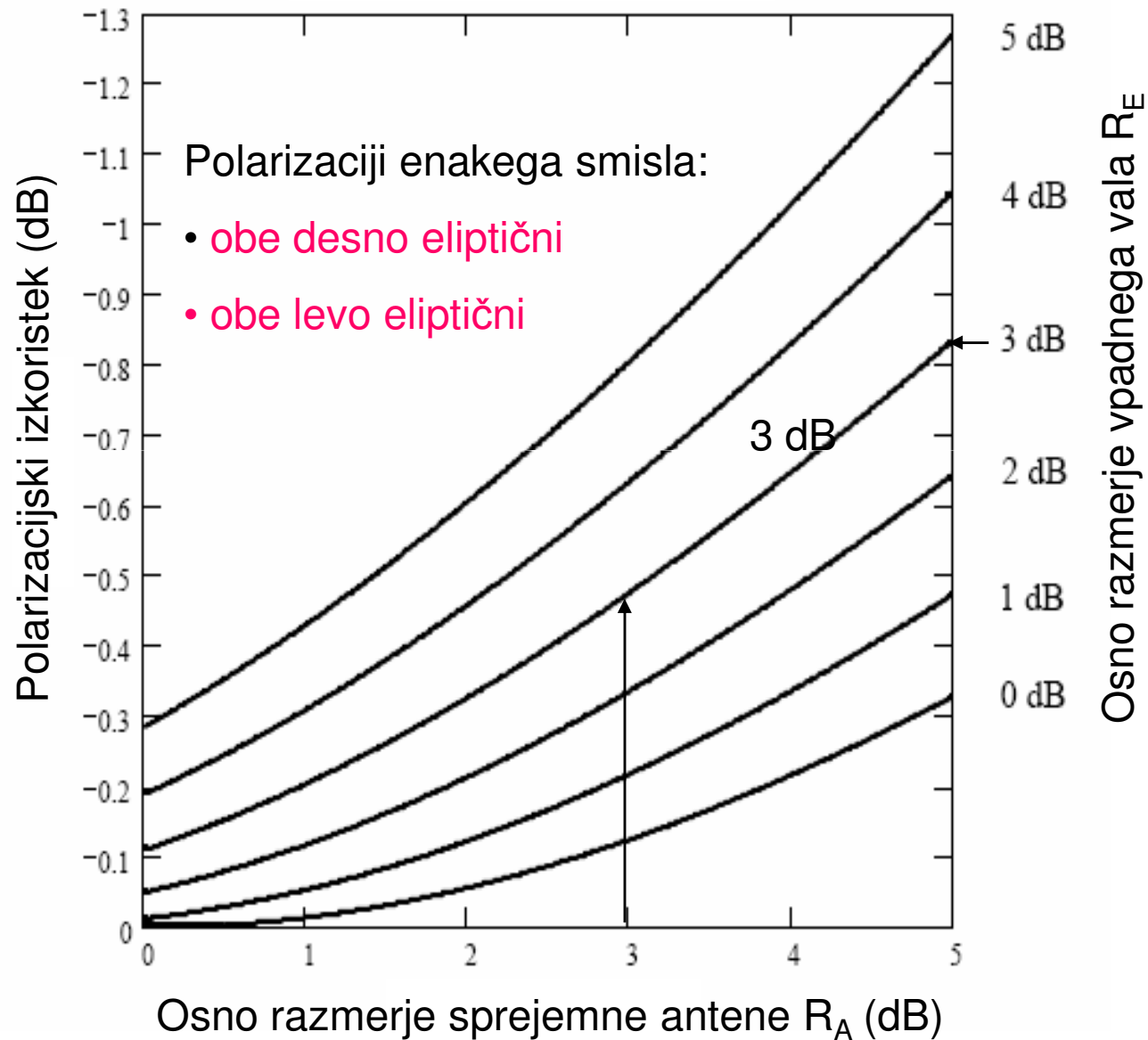
$$\eta_p = \frac{|1 + Q_0 Q_1|^2}{(1 + |Q_0|^2)(1 + |Q_1|^2)}$$

$$\eta_s = \frac{(1 - |\Gamma_2|^2)(1 - |\Gamma_s|^2)e^{-2\alpha L_s}}{|1 - \Gamma_2 \Gamma_s e^{-2\gamma L_s}|^2}$$

Min. in maks. polarizacijsko slabljenje pri sprejemu z linearno polarizacijo

Osno razmerje elipse (dB)	Minimalno slabljenje pri sprejemu z vzporedno linearno polarizacijo	Maksimalno slabljenje pri sprejemu s pravokotno linearno polarizacijo
0.00	3.01	3.01
0.25	2.89	3.14
0.50	2.77	3.27
0.75	2.65	3.40
1.00	2.54	3.54
1.50	2.33	3.83
2.00	2.12	4.12
3.00	1.77	4.77
4.00	1.46	5.46
5.00	1.19	6.19
10.00	0.41	10.41

Polarizacijski izkoristek pri sprejemu



$$R_{dB} = 20 \log (a/b)$$

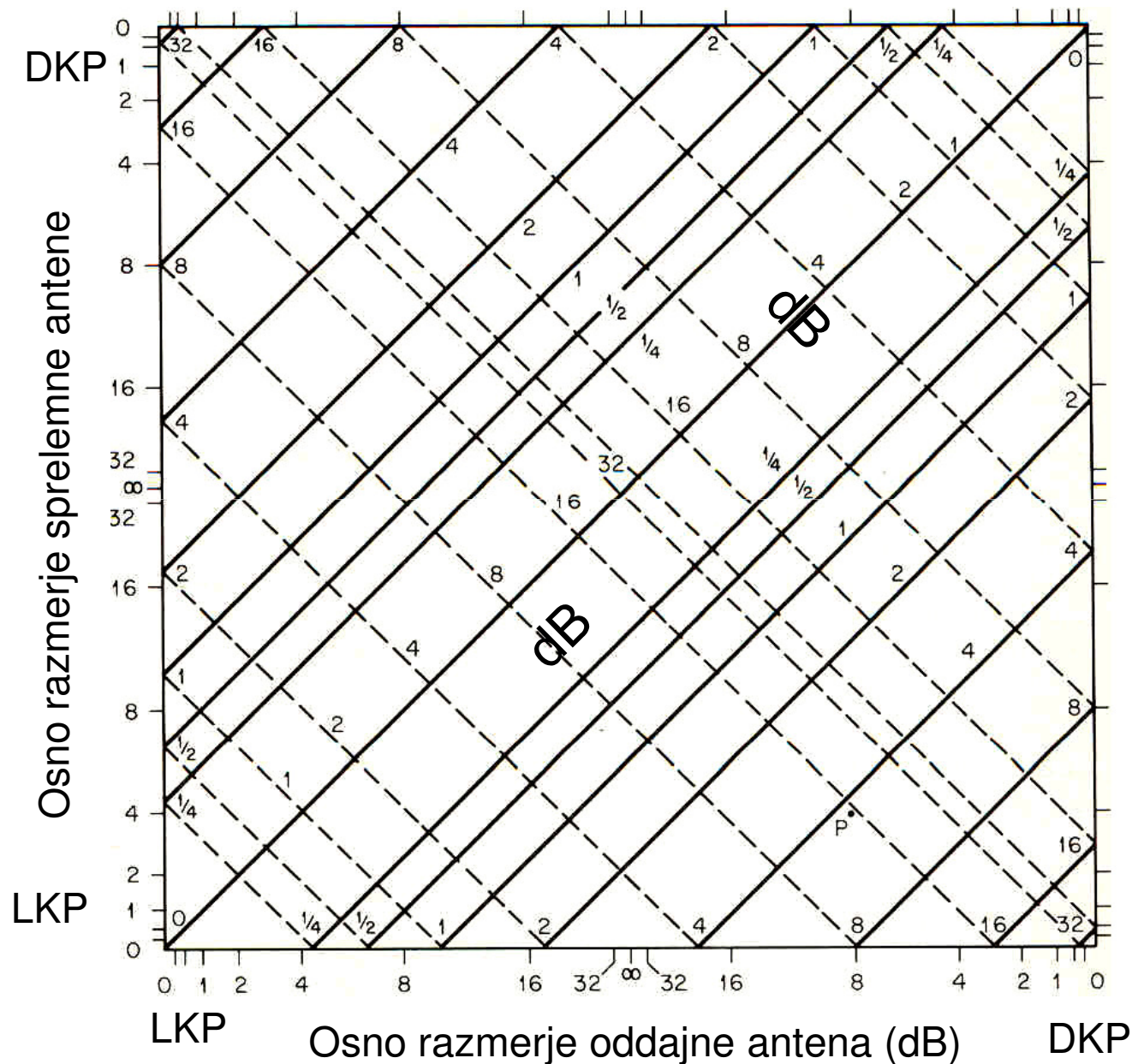
Primer:

$$R_E = 3 \text{ dB}$$

$$R_A = 3 \text{ dB}$$

$$\eta = -0,5 \text{ dB}$$

Polarizacijske izgube med dvema antenama



Max: prekinjena črta
 Min: polna črta

$$R_o = 3 \text{ dB}$$

$$R_s = 3 \text{ dB}$$

Primer 1 (LKP-LKP):

$$\eta_{\max} = 0,5 \text{ dB}$$

$$\eta_{\min} = 0,0 \text{ dB}$$

Primer 2 (LKP-DKP):

$$\eta_{\min} = 10 \text{ dB}$$

$$\eta_{\max} = \gg \text{ dB}$$

Posebni primeri polarizacijskega izkoristka

Dve enaki eliptično polarizirani anteni	$\eta_M = 1, \quad \eta_m = \frac{(1 - q ^2)^2}{(1 + q ^2)^2} = \frac{4R^2}{(1 + R^2)^2}$
Ena antena krožno polarizirana	$\eta_M = \eta_m = \frac{1}{1 + q ^2} = \frac{(R \pm 1)^2}{2(R^2 + 1)}$
Ena antena linearno polarizirana	$\eta_M = \frac{(1 + q ^2)^2}{2(1 + q ^2)} = \frac{R^2}{R^2 + 1}, \quad \eta_m = \frac{(1 - q ^2)^2}{2(1 + q ^2)} = \frac{1}{R^2 + 1}$
Obe anteni krožno polarizirani	$\eta_M = 1, \quad \eta_m = 0$
Obe anteni linearno polarizirani	$\eta = \cos^2(\tau_1 + \tau_2 + \alpha), \quad \eta_M = 1, \quad \eta_m = 0$

Transformacija pol. baze in komponent

Baza (e_1, e_2) in baza (e_1', e_2') :

$$\begin{aligned}\vec{e}_1' &= A_{11}\vec{e}_1 + A_{12}\vec{e}_2, \\ \vec{e}_2' &= A_{21}\vec{e}_1 + A_{22}\vec{e}_2,\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \vec{e}_1' \\ \vec{e}_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{e}_1 \\ \vec{e}_2 \end{bmatrix}$$

Prehod iz baze e_1 in e_2 v novo bazo e_1' in e_2'

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11}^* & A_{21}^* \\ A_{12}^* & A_{22}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ali}$$

Transformacijska matrika $[A]$ je unitarna (ortogonalnost in normiranje)

$$[A] [A]^*{}^T = [1] \quad \text{ali} \quad [A]^* [A]^T = [1]$$

$$E_1' = A_{11}^* E_1 + A_{12}^* E_2,$$

$$E_1 = A_{11} E_1' + A_{21} E_2'$$

$$E_2' = A_{21}^* E_1 + A_{22}^* E_2,$$

$$E_2 = A_{12} E_1' + A_{22} E_2'$$

Primer: Bazni vektorji:

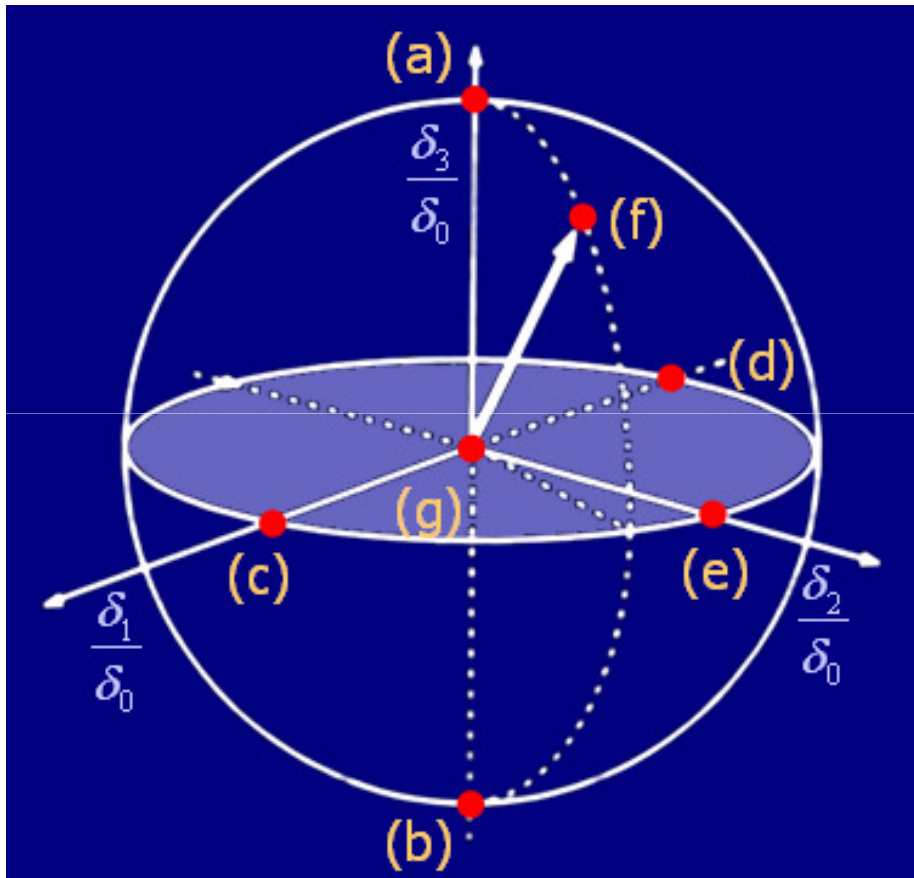
$$\begin{bmatrix} \vec{1}_L \\ \vec{1}_D \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{1}_V \\ \vec{1}_H \end{bmatrix},$$

Primer: Komponente:

$$\begin{bmatrix} L \\ D \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ H \end{bmatrix}$$

Poincaréjeva krogla in Stokesovi parametri

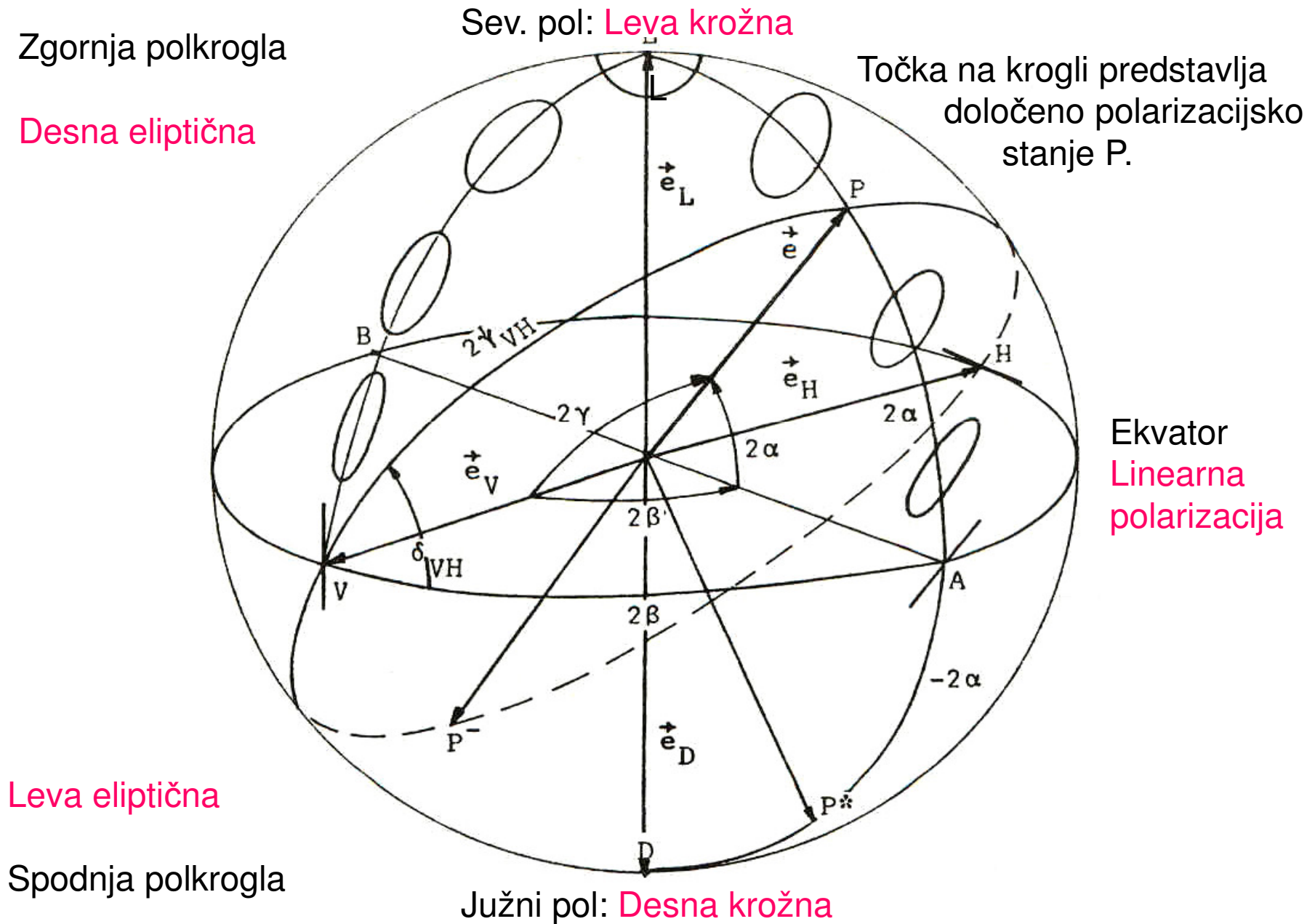
Poincaréjeva krogla:



Stokesovi parametri:

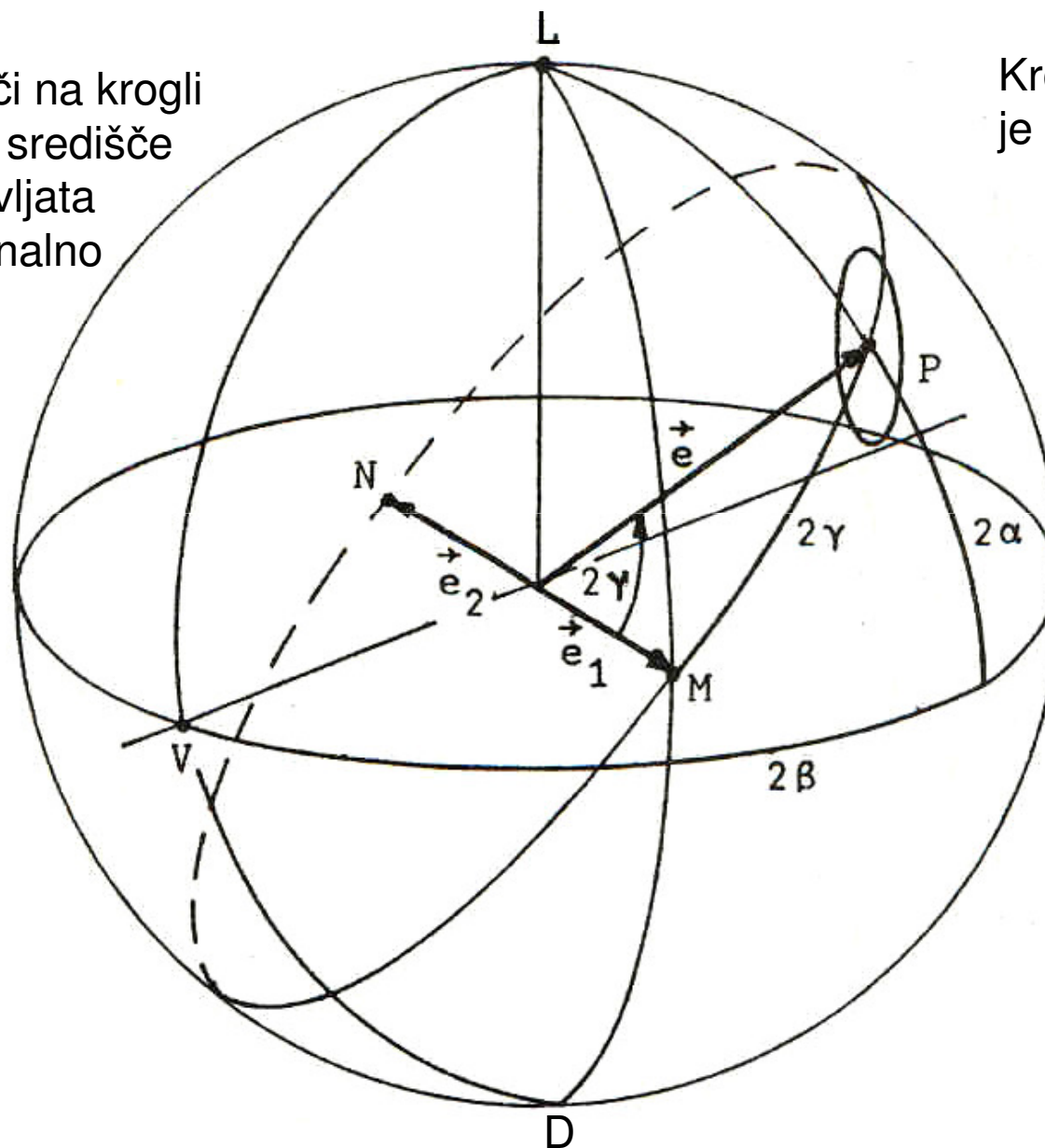
- Stokesov vektor $\frac{1}{\delta_0} [\delta_1, \delta_2, \delta_3]$
- | | |
|--------------------------|---|
| (a) DKP | $[0, 0, 1]$ |
| (b) LKP | $[0, 0, -1]$ |
| (c) HP | $[1, 0, 0]$ |
| (d) VP | $[-1, 0, 0]$ |
| (e) $+45^\circ$ | $[0, 1, 0]$ |
| (f) Eliptična splošno | $[\delta_1, \delta_2, \delta_3]/\delta_0$ |
| (g) Nepolarizirano polje | $[0, 0, 0]$ |

Polarizacijska stanja na Poincaréjevi krogli



Ortogonalna baza na Poincaréjevi krogli

Diametralni toči na krogli glede na njeno središče M in N predstavljata splošno ortogonalno eliptično bazo



Krožna baza L in D je na polih

Linearna baza je na ekvatorju

Stokesovi parametri

E_x, E_y komponente polja, δ fazna razlika

$$\delta_0 = I_1 \quad \delta_0 = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle = \langle E_x^* E_x \rangle + \langle E_y^* E_y \rangle$$

$$\delta_1 = 2I_2 - I_1 \quad \delta_1 = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle = \langle E_x^* E_x \rangle - \langle E_y^* E_y \rangle$$

$$\delta_2 = 2I_3 - I_1 \quad \delta_2 = \langle 2E_x E_y \cos \varphi \rangle = \langle E_x^* E_y \rangle + \langle E_y^* E_x \rangle$$

$$\delta_3 = 2I_4 - I_1 \quad \delta_3 = \langle 2E_x E_y \sin \varphi \rangle = i \left(\langle E_x^* E_y \rangle - \langle E_y^* E_x \rangle \right)$$

I_1 skupna moč

I_2 moč horizontalne
komponente

I_3 moč komponente 45° do
horizontale

I_4 moč desne krožne
komponente

Stokesovi parametri

E_x, E_y komponente polja, δ fazna razlika

$$\begin{aligned}\delta_0 = I_1 & \quad \delta_0 = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle = \langle E_x^* E_x \rangle + \langle E_y^* E_y \rangle \\ \delta_1 = 2I_2 - I_1 & \quad \delta_1 = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle = \langle E_x^* E_x \rangle - \langle E_y^* E_y \rangle \\ \delta_2 = 2I_3 - I_1 & \quad \delta_2 = \langle 2E_x E_y \cos \varphi \rangle = \langle E_x^* E_y \rangle + \langle E_y^* E_x \rangle \\ \delta_3 = 2I_4 - I_1 & \quad \delta_3 = \langle 2E_x E_y \sin \varphi \rangle = i \left(\langle E_x^* E_y \rangle - \langle E_y^* E_x \rangle \right)\end{aligned}$$

I_1 skupna moč

I_2 moč horizontalne
komponente

I_3 moč komponente 45° do
horizontale

I_4 moč desne krožne
komponente

Stokesovi parametri v treh bazah

Horizontalno-
vertikalna H/V

$$s_0 = VV^* + HH^* = |V|^2 + |H|^2$$

$$s_1 = s_0 \cos 2\gamma_{VH} = VV^* - HH^* = |V|^2 - |H|^2,$$

$$s_2 = VH^* + V^*H = 2|VH| \cos \delta_{VH},$$

δ_{VH} fazna razlika

$$s_3 = j(VH^* - V^*H) = 2|VH| \sin \delta_{VH},$$

Poševna
+45/-45

$$s_0 = AA^* + BB^* = |A|^2 + |B|^2,$$

$$s_1 = -(AB^* + A^*B) = -2|AB| \cos \delta_{AB},$$

δ_{AB} fazna razlika

$$s_2 = s_0 \cos 2\gamma_{AB} = AA^* - BB^* = |A|^2 - |B|^2,$$

$$s_3 = j(AB^* - A^*B) = 2|AB| \sin \delta_{AB},$$

Krožna
DK/LK

$$s_0 = LL^* + DD^* = |L|^2 + |D|^2,$$

$$s_1 = LD^* + L^*D = 2|LD| \cos \delta_{LD},$$

δ_{DL} fazna razlika

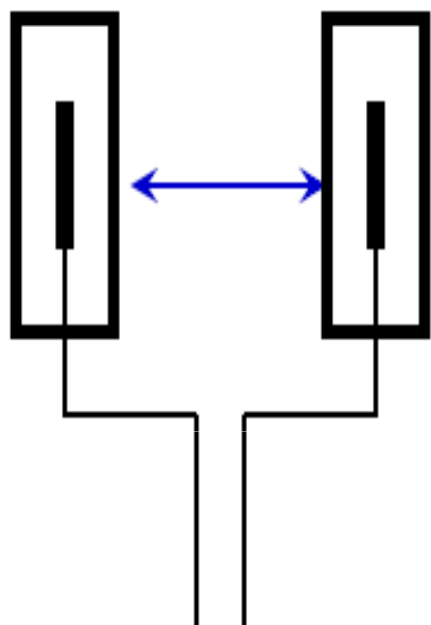
$$s_2 = j(LD^* - L^*D) = 2|LD| \sin \delta_{LD}$$

$$s_3 = s_0 \cos 2\gamma_{LD} = LL^* - DD^* = |L|^2 - |D|^2,$$

Raznoliki sprejem

Prostorska raznolikost:

Razpršitev smeri vpadnega vala



Polarizacijska raznolikost:

Nekoreliranost sprejema na dveh ortogonalnih polarizacijah



Prostorska dekorelacija signalov:

10λ razmika horiz., 30λ razmika vert.

(3 m na 900 MHz, 1,5 m na 1800 MHz)

(signal razpršen iz ozkega prostorskega kota)

Ročna naprava iz praktičnih razlogov

največ 2 anteni z razmikom okoli $\lambda/2$

(signal razpršen iz širokega prostorskega kota).

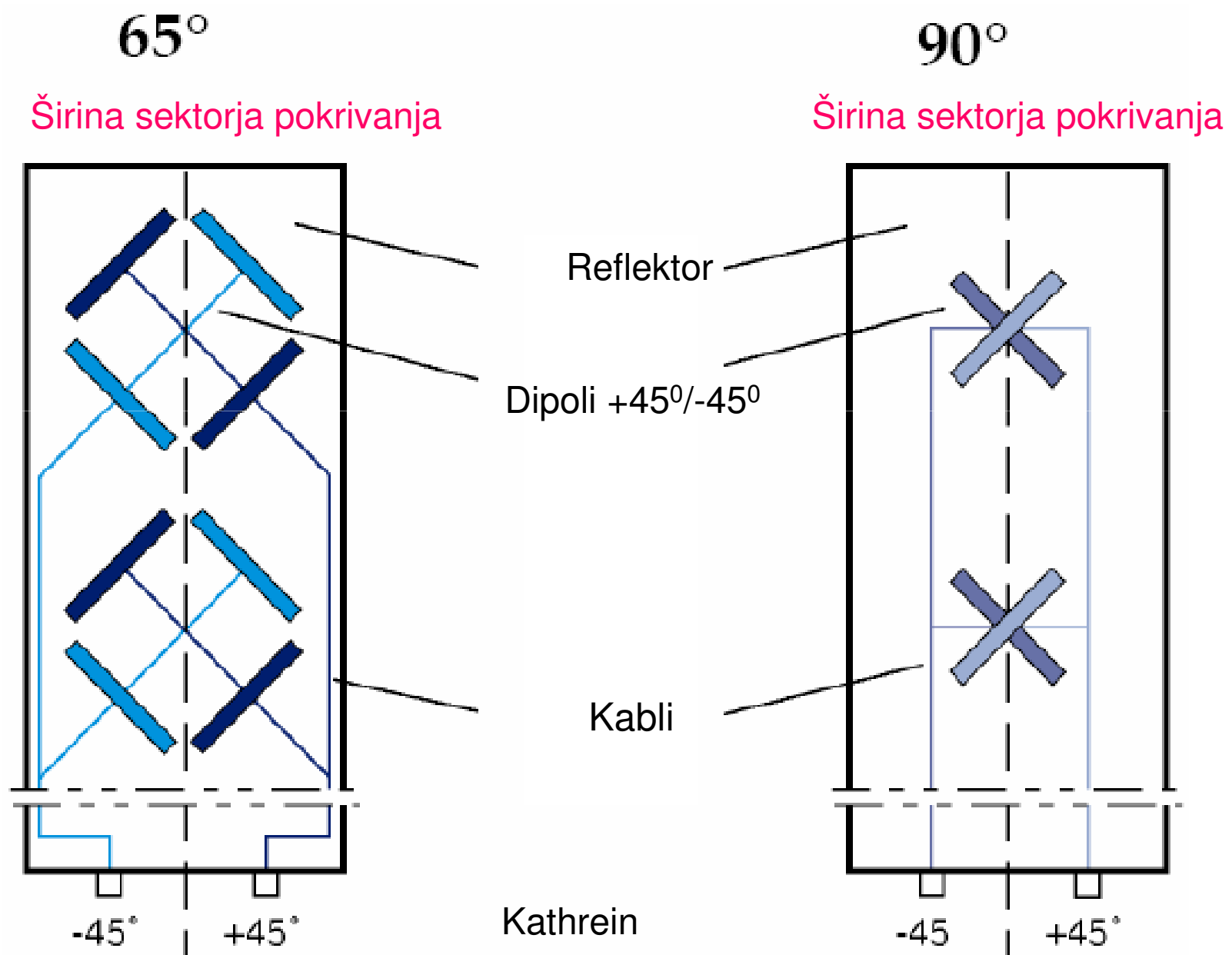
Polarizacijska dekorelacija signalov:

Zmanjšan potreben prostor

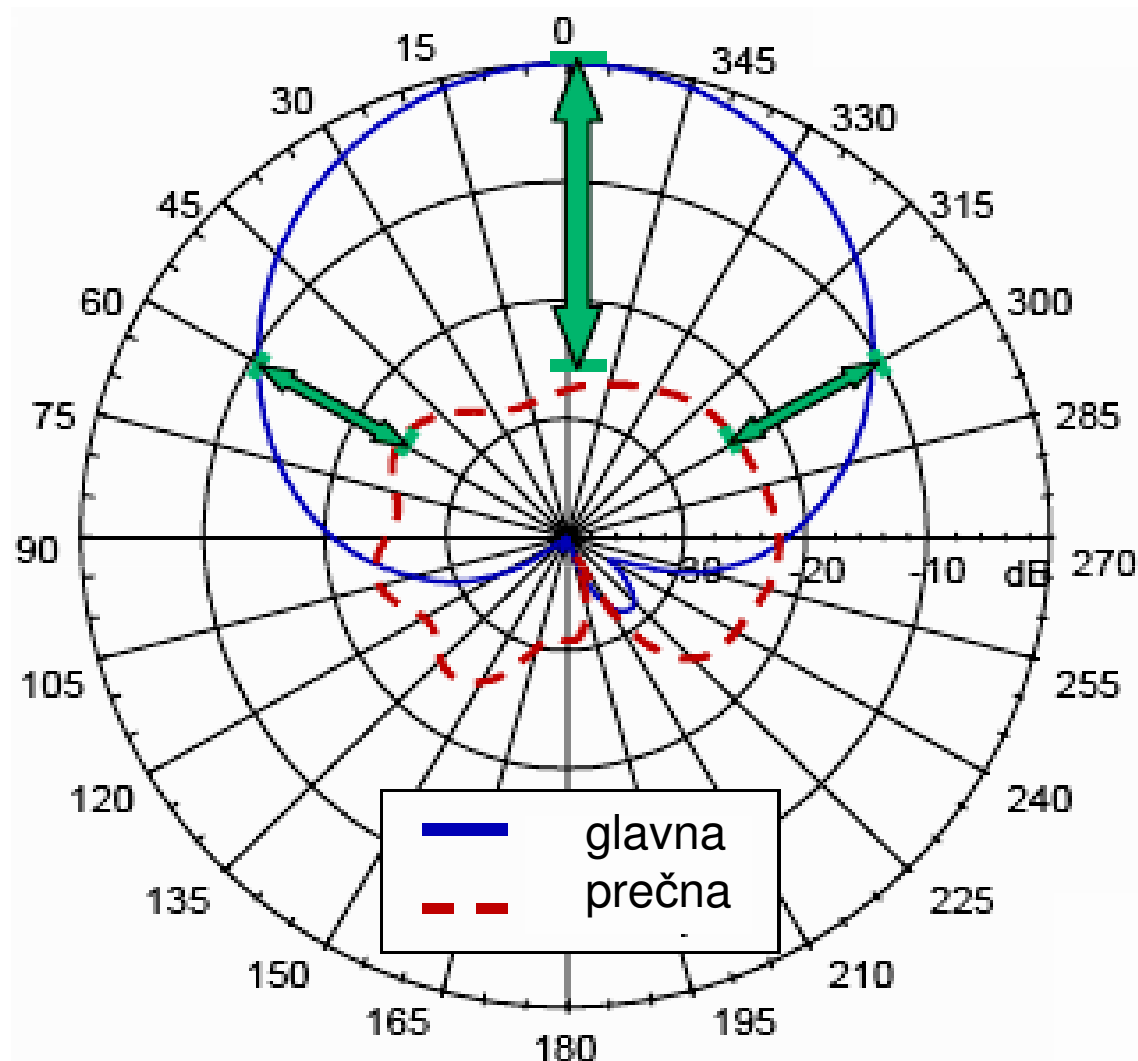
Glavni način za ročne in prenosne

naprave v omrežjih radijskega dostopa.

Dvopolarizacijske (+/-45°) antene



Glavna in prečna polarizacija

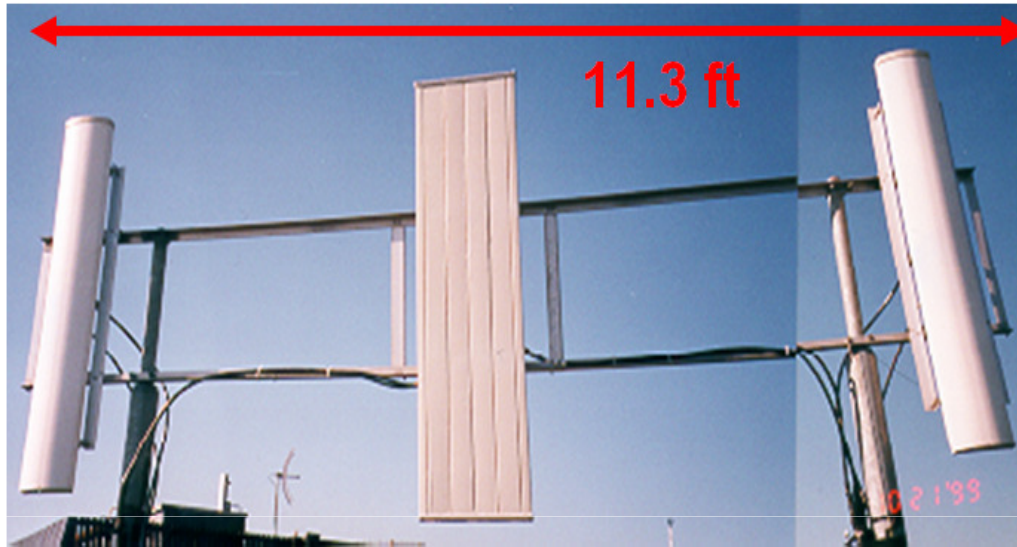


glavna > prečna:

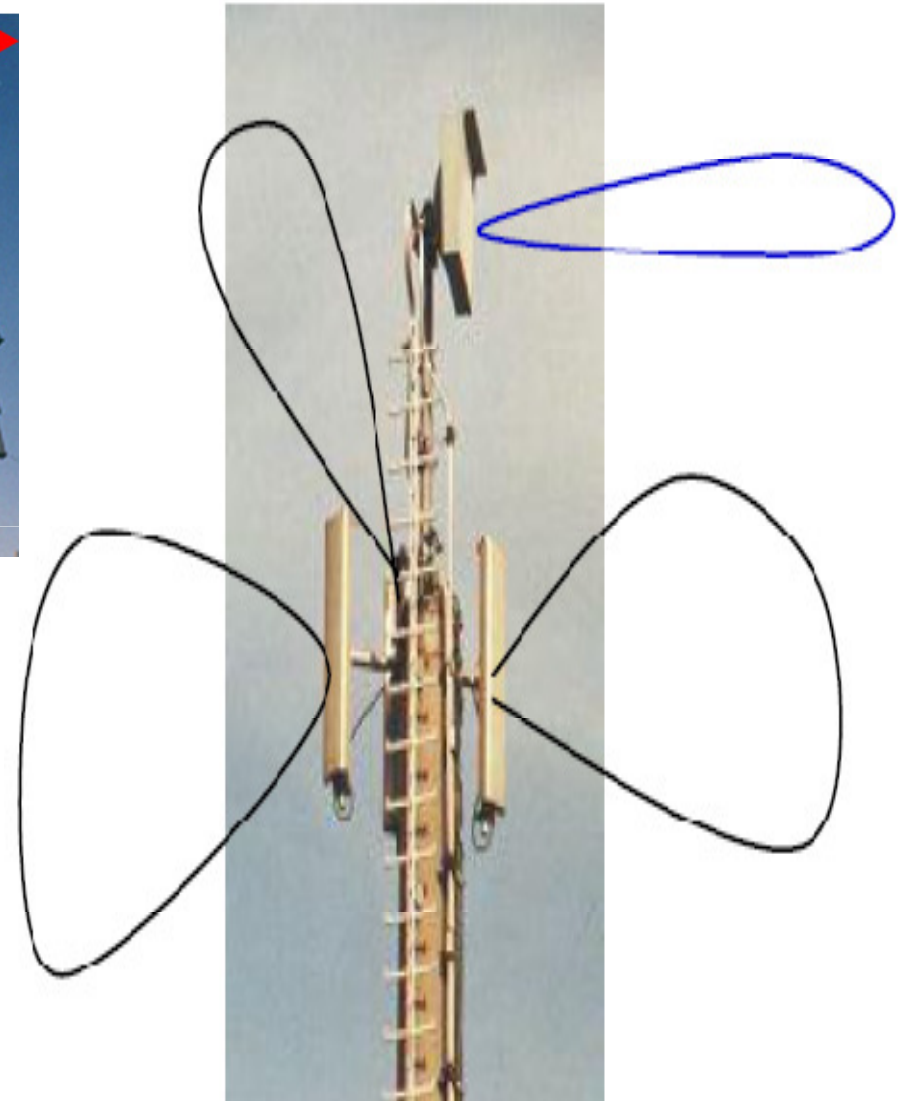
- 25 dB v smeri glavnega snopa
- 10 dB v sektorju $\pm 60^\circ$

Realna antenna seva polje glavne (želene) polarizacije, poleg nje pa tudi polje neželene prečne (ortogon.) polarizacije, ki v smeri nazaj lahko presega polje glavne polarizacije.

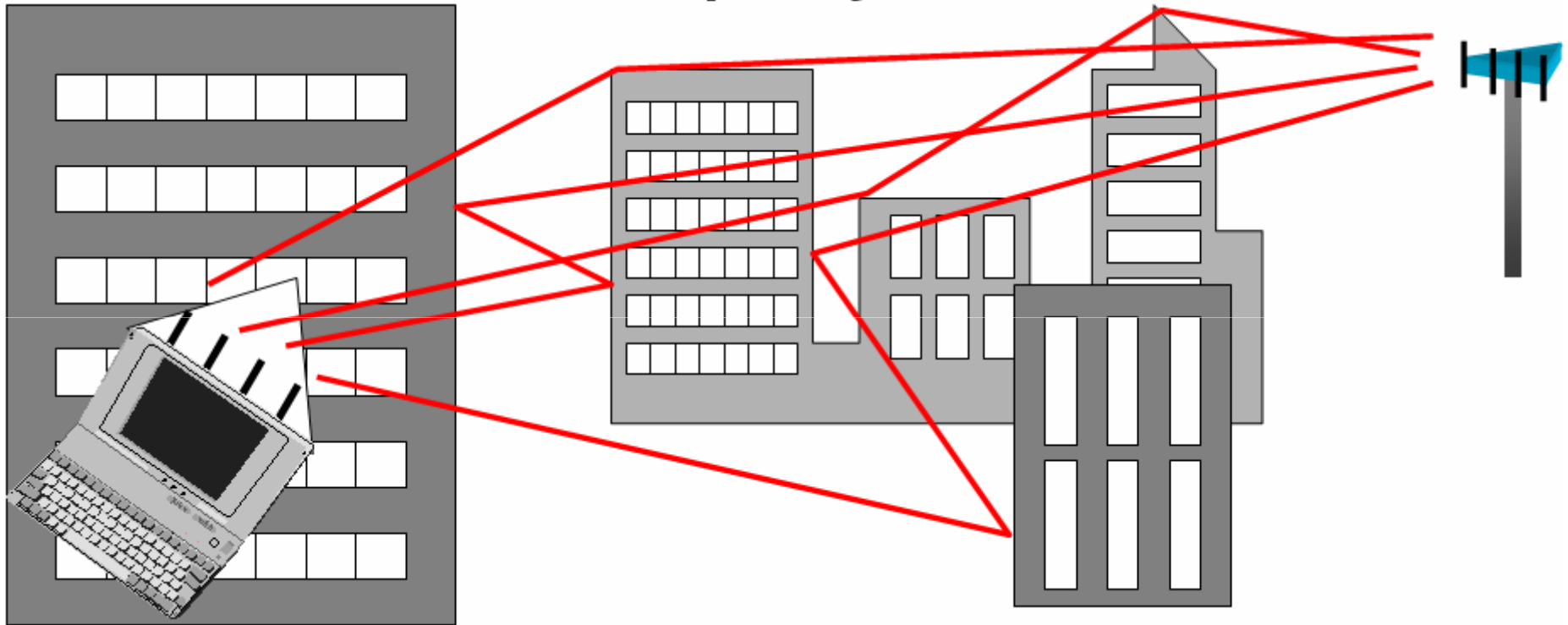
Antene za prostorsko in pol. raznolikost



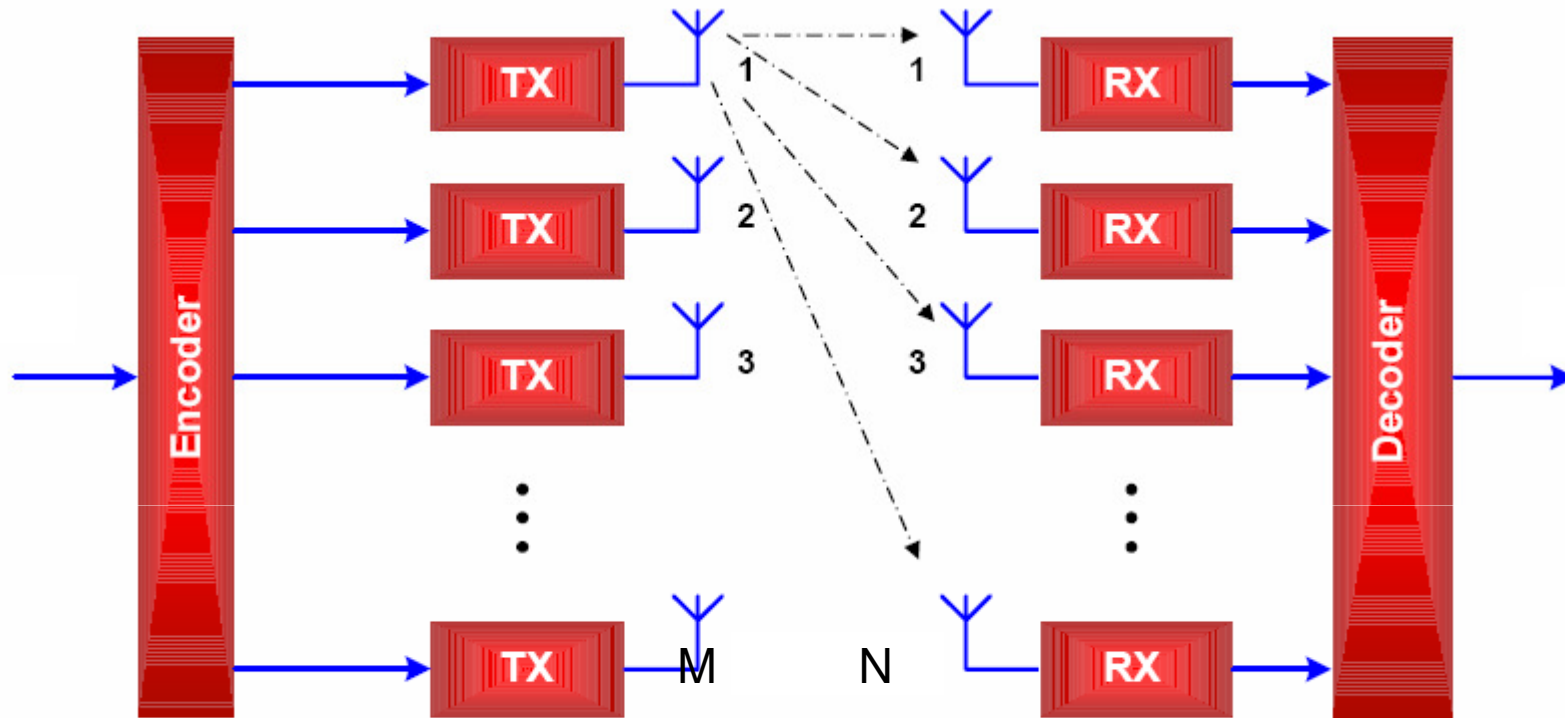
Nekdanje bazne antene



MIMO



MIMO spektralni izkoristek



Spektralni izkoristek (približek):

$$\frac{C}{B} = \min(M, N) \cdot \log_2(1 + SNR)$$

Mimo večantenski sistemi

1. Mimo - polarizacijska ortogonalnost, (1,N) ali (M,1) anten

- Enokanalni polarizacijski diverzni prenos
- Izboljšanje kakovosti, SNR, BER
- Kapaciteta kanala se ne spremeni

2. Mimo – prostorski multipleks (ortogonalnost), (M,N) anten

- Večkanalni prenos (spatial multiplexing), dekompozicija v $\text{Min}(M,N)$ neodvisnih kanalov
- Izboljšanje kakovosti
- Povečanje kapacitete prenosa

3. Mimo – prostorska in polarizacijska ortogonalnost

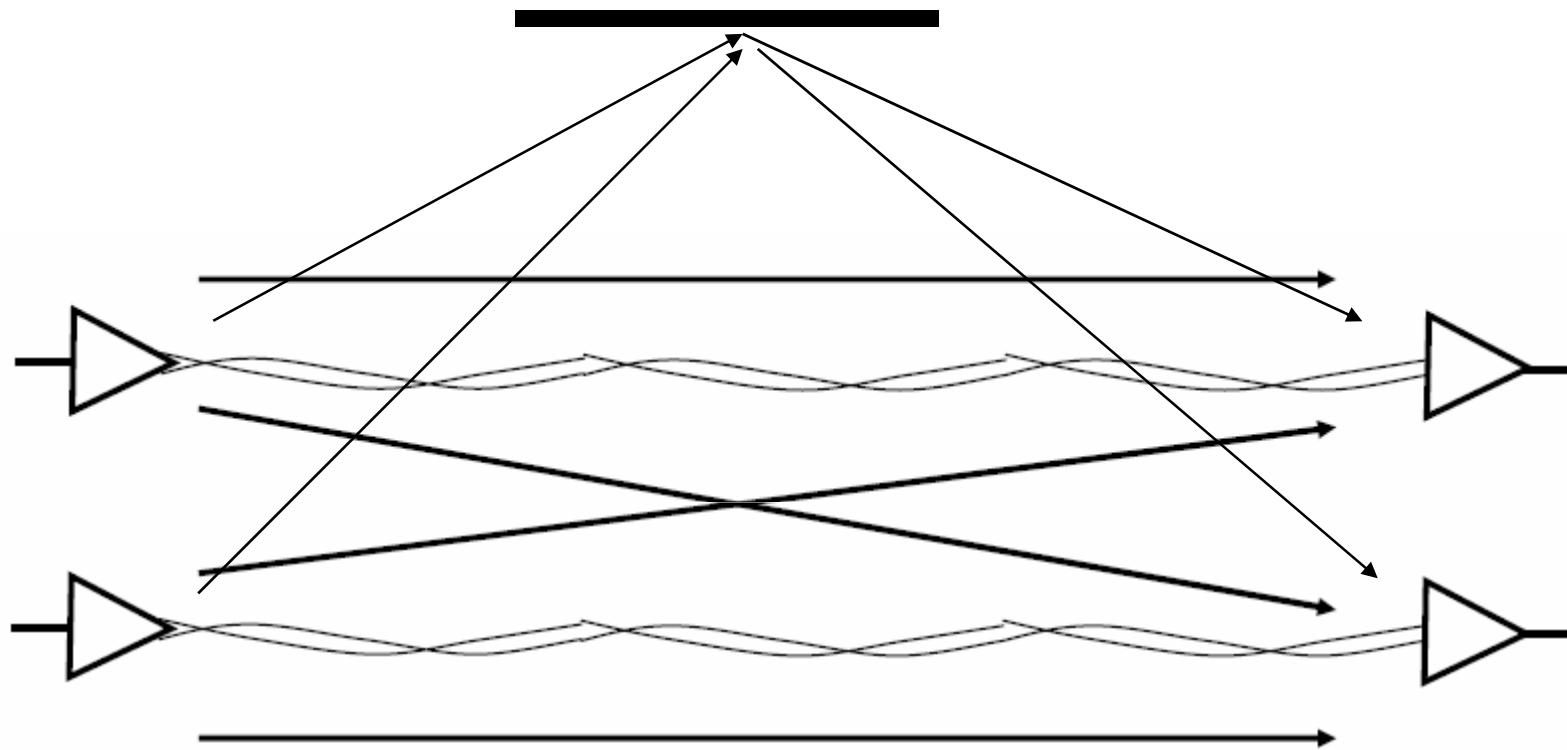
- oddaja in sprejem z ortogonalno polariziranimi in prostorsko razmeščenimi antenami
- Izboljšanje kakovosti in povečanje kapacitete prenosa

Mimo

- Prenosni sistem, ki izkorišča polarizacijsko, prostorsko ali prostorsko in polarizacijsko raznolikost
- Večantenski sistem: Oddaja in sprejem z (M,N) antenami, npr. $(2,2)$, $(4,4)$
- Pogoji: Izrazit mnogostezni kanal (NLOS, statistika Rayleigh)
- Dekompozicija mnogosteznih prenosnih poti v neodvisne kanale, spektralni izkoristek in bitni pretok se $\min(M,N)$ krat povečata
- Dovolj velika razdalja ($>l/2$) za nekoreliranost med kanali
- Sistem $(2,2)$ naj bi omogočil 2x povečanje zaradi prostorske raznolikosti in 2x povečanje zaradi polarizacijske raznolikosti.



MIMO - kanalska dekompozicija

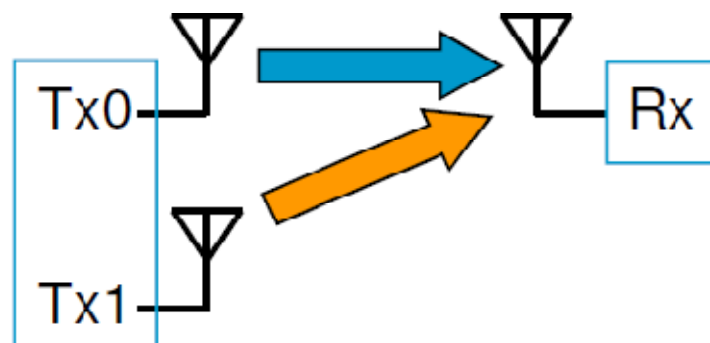


Osnovni sistemi

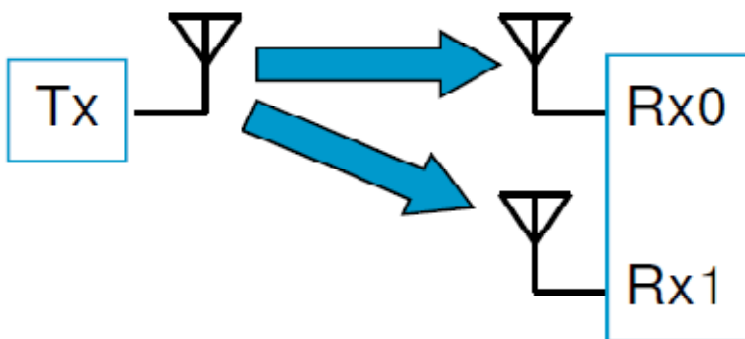
SISO



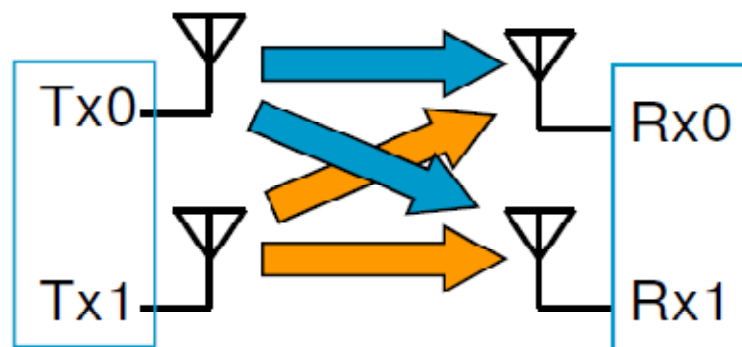
MISO



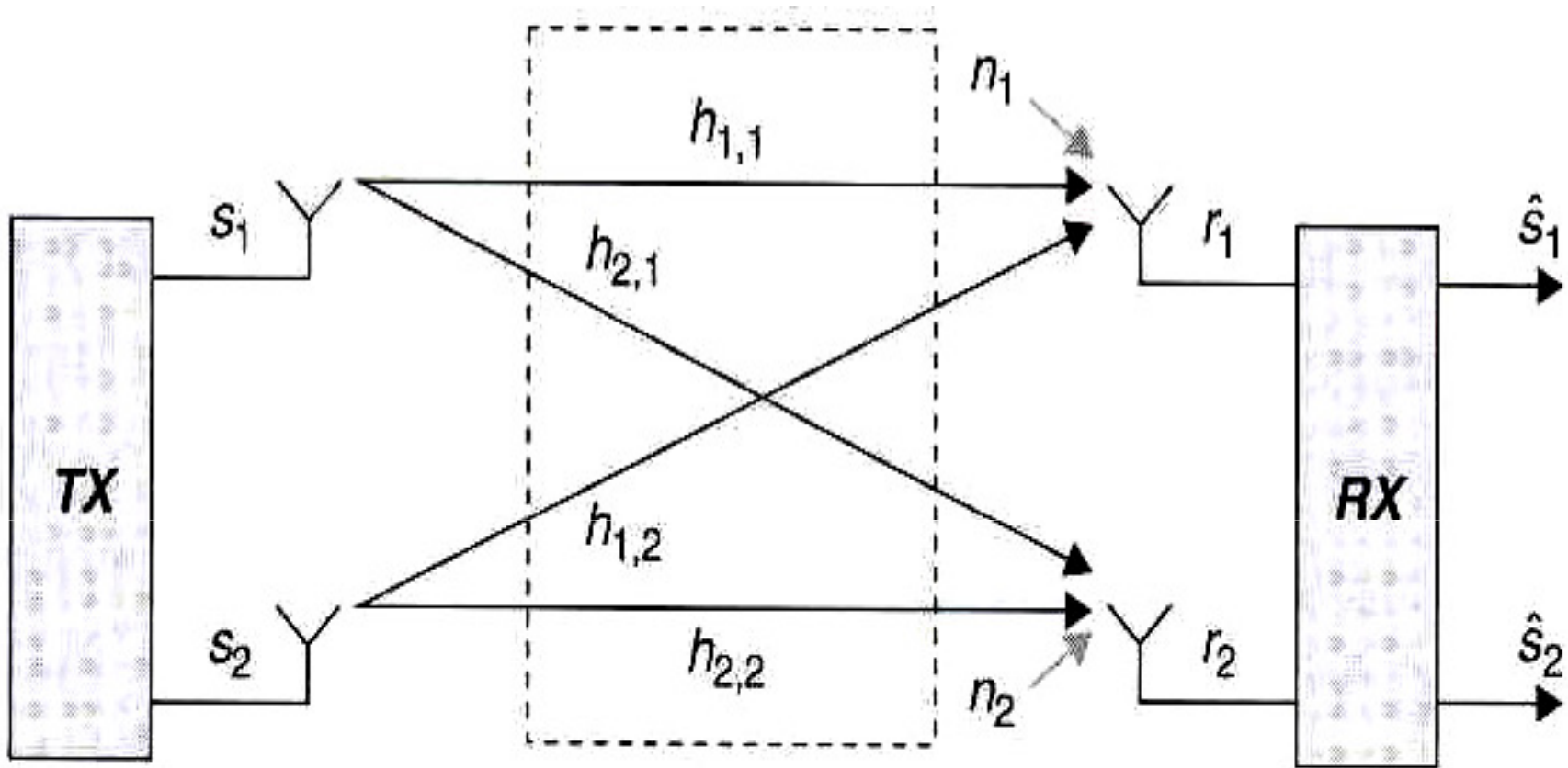
SIMO



MIMO



Model 2x2 MIMO

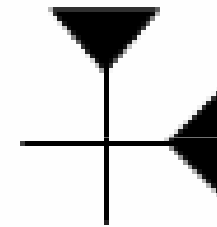
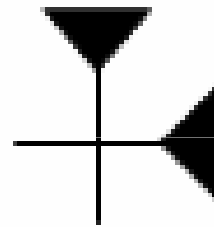


$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix}$$

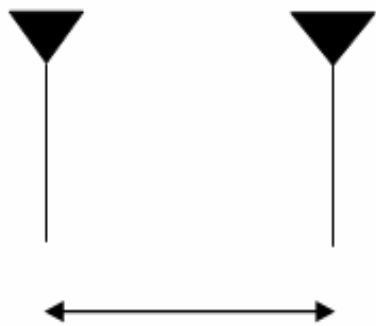
Pol. MIMO

$$\begin{bmatrix} E_x^r \\ E_y^r \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x^t \\ E_y^t \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h^{VV} & h^{VH} \\ h^{HV} & h^{HH} \end{bmatrix}$$

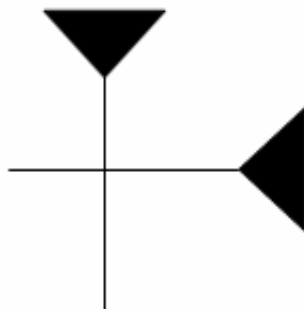


MIMO 2x2

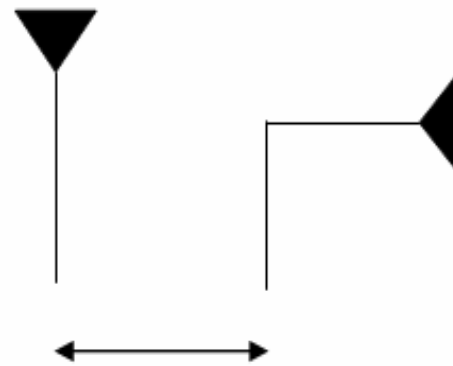


$$d \in \left\{ \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, 2\lambda \right\}$$

Dvomestni



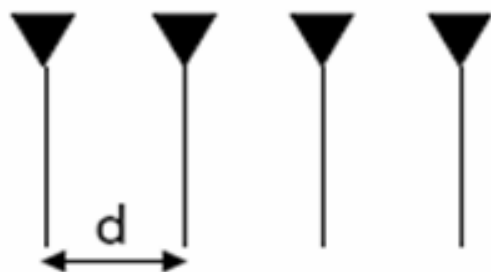
Dvopolarizacijski



$$d \in \left\{ \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, 2\lambda \right\}$$

Hibridni

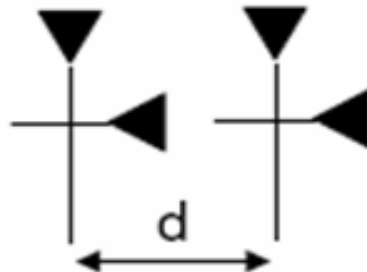
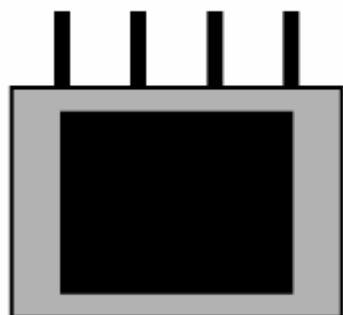
MIMO 4x4



(a)

$$d = \frac{\lambda}{2}$$

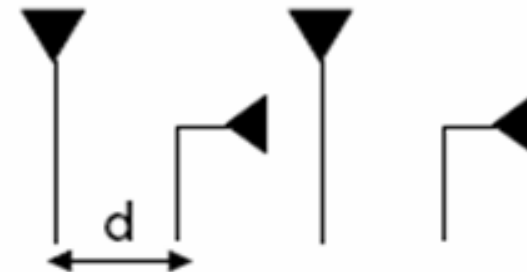
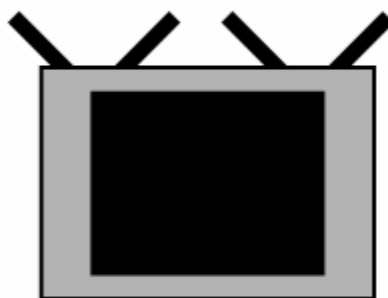
Štirimestni



(b)

$$d \in \left\{ \frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, 2\lambda \right\}$$

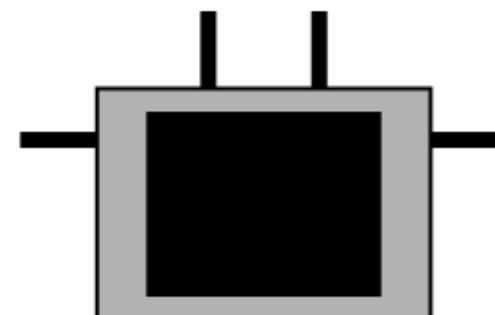
Dvomestni-dvopolarizacijski



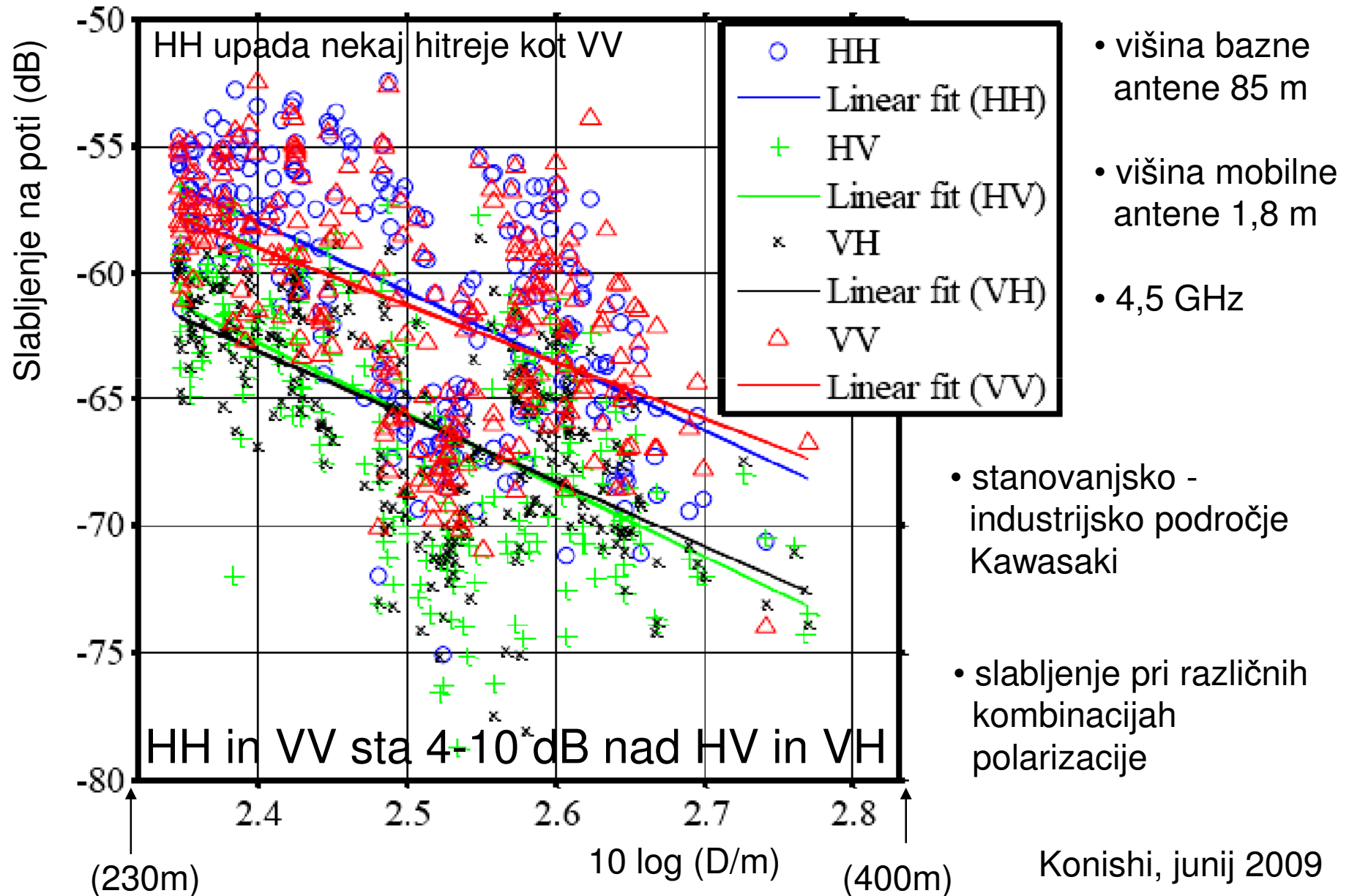
(c)

$$d = \frac{\lambda}{2}$$

Štirimestni-dvopolarizacijski

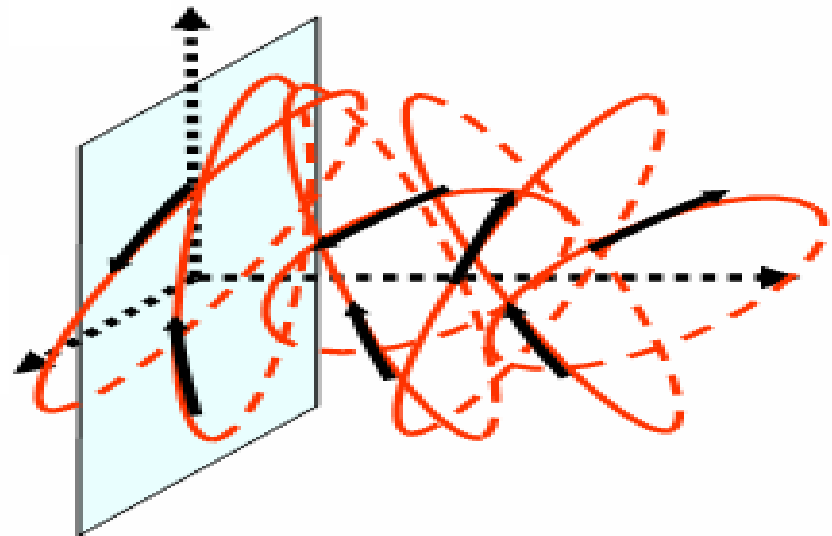


Prenos HH, HV, VH, VV

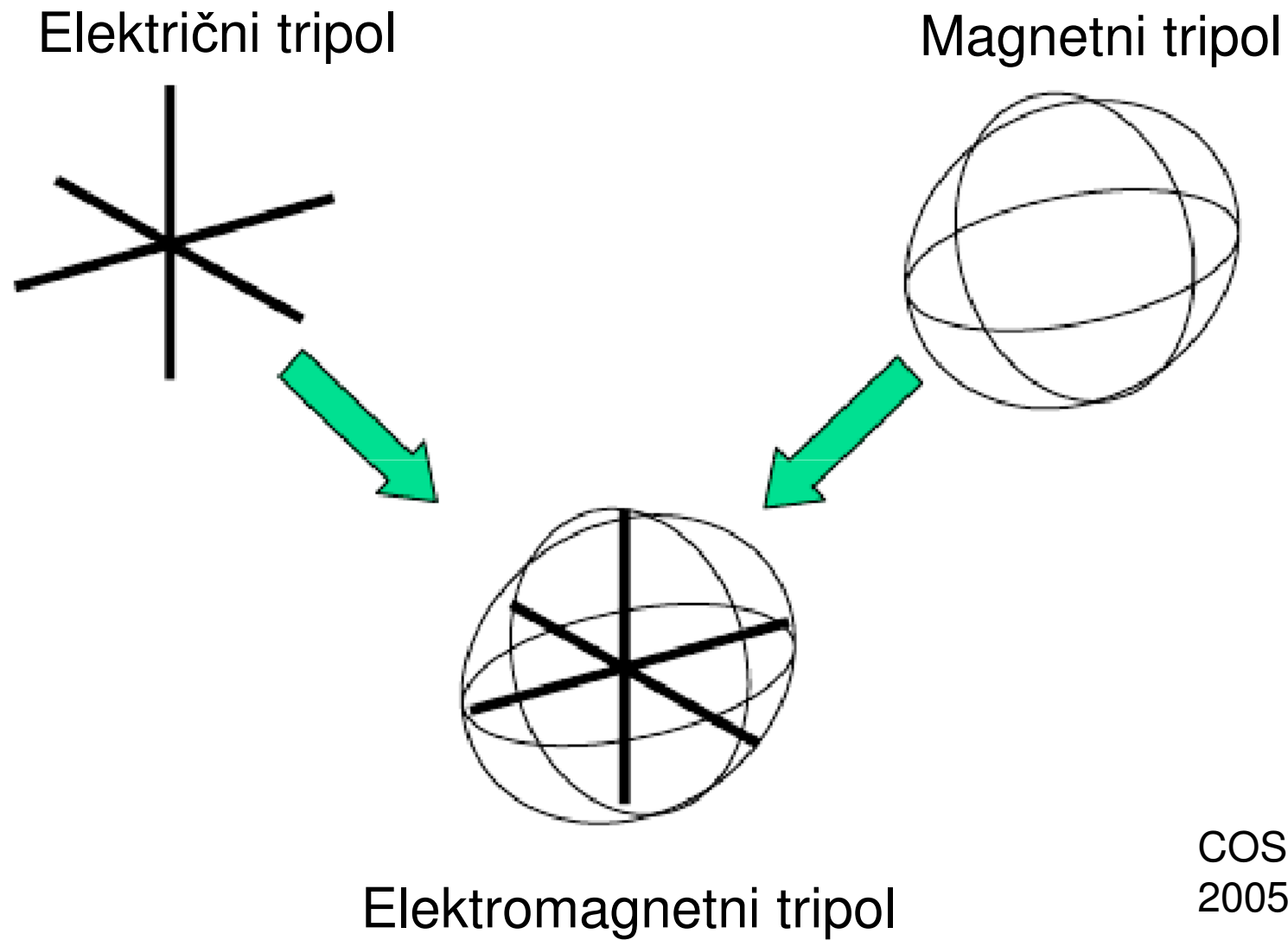


Depolarizacija v propagaciji

- Depolarizacija – naključno sprevrženje polarizacije, ki nastane zaradi naključnih propagacijskih pogojev
- Sklop med ortogonalnima polarizacijama HV, VH.
- Fizikalni pogoji razširjanja v mediju so različni za dve ortogonalni polarizaciji.
- Primeri: odboj od tal in **odboj od objektov** pri HP in VP, odboj od kapljic vode in iglic ledu.
- Odboj v urbanem okolju na fiksnih in mobilnih objektih.
- Propagacijski pogoji NLOS.



Tripolna električna in magnetna antena

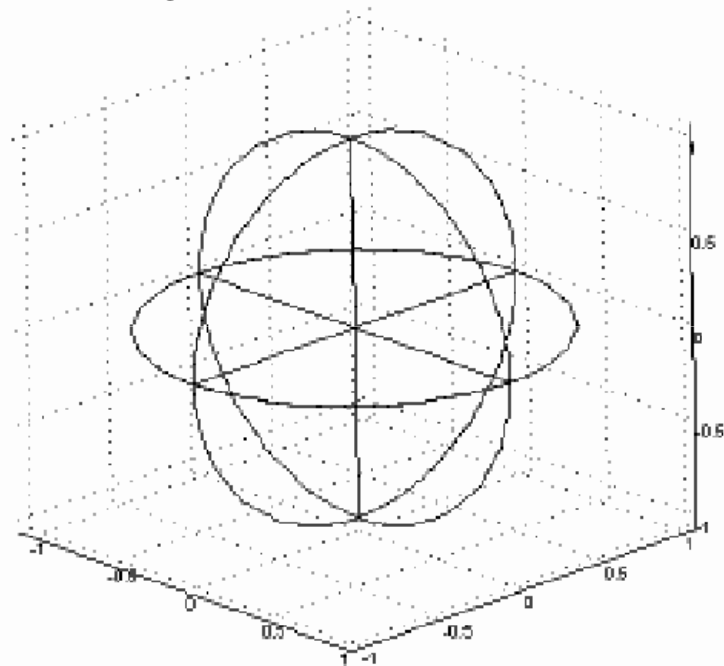


COST 280
2005

- Tripolna antena sprejema v prostoru z odboji vse tri komponente polja

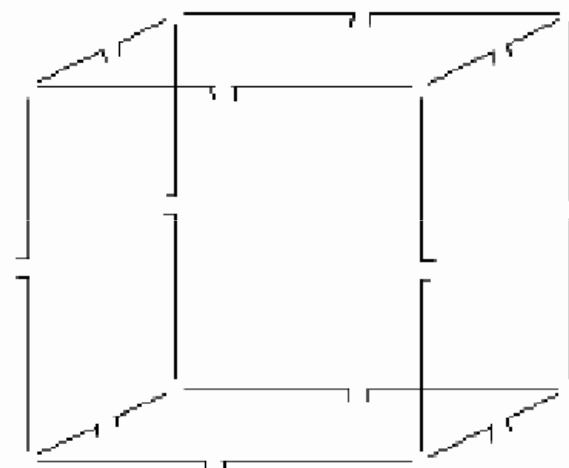
Antene za MIMO

Krogelna 6 vhodna



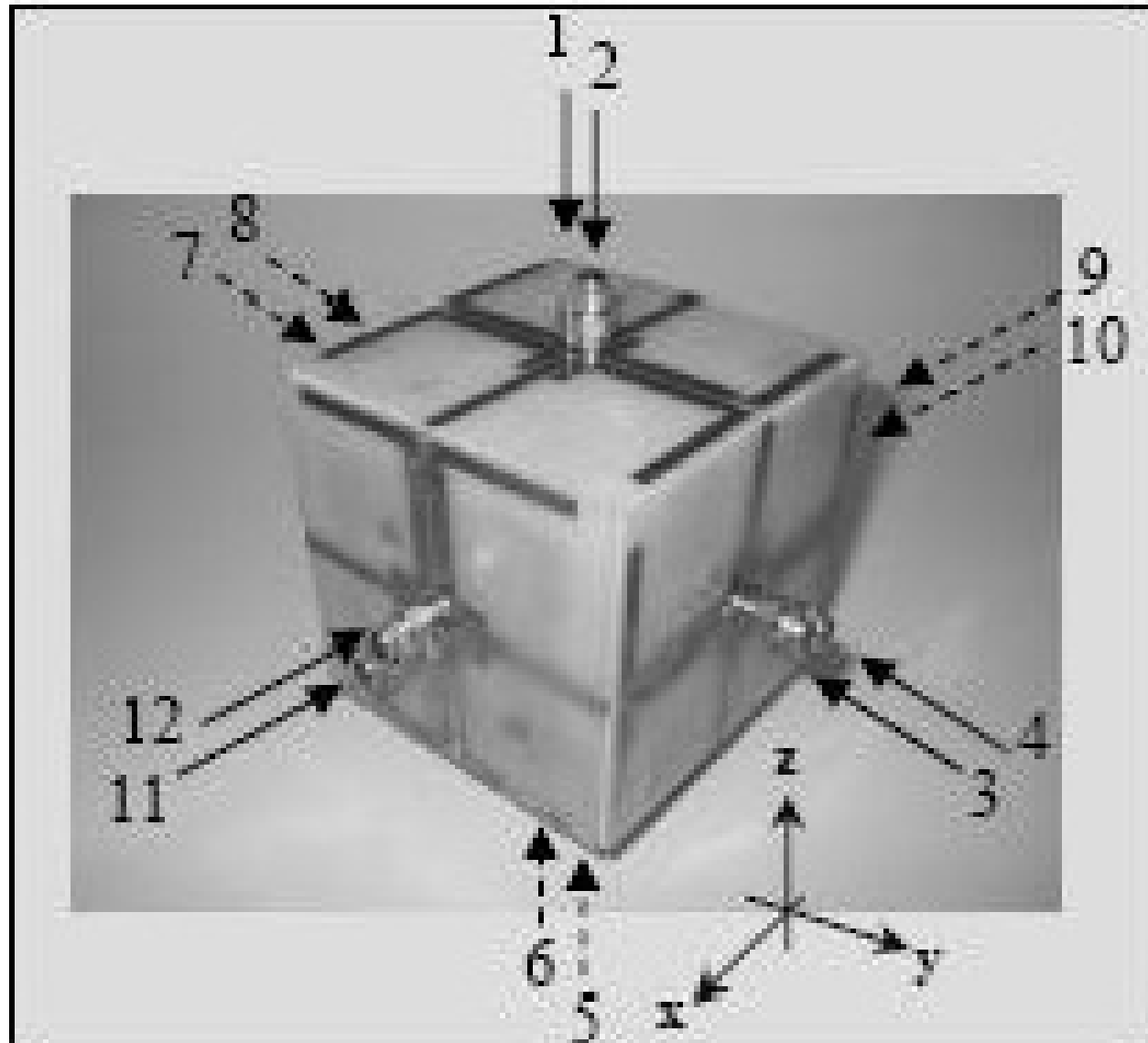
(a)

Kocka 12 vhodna

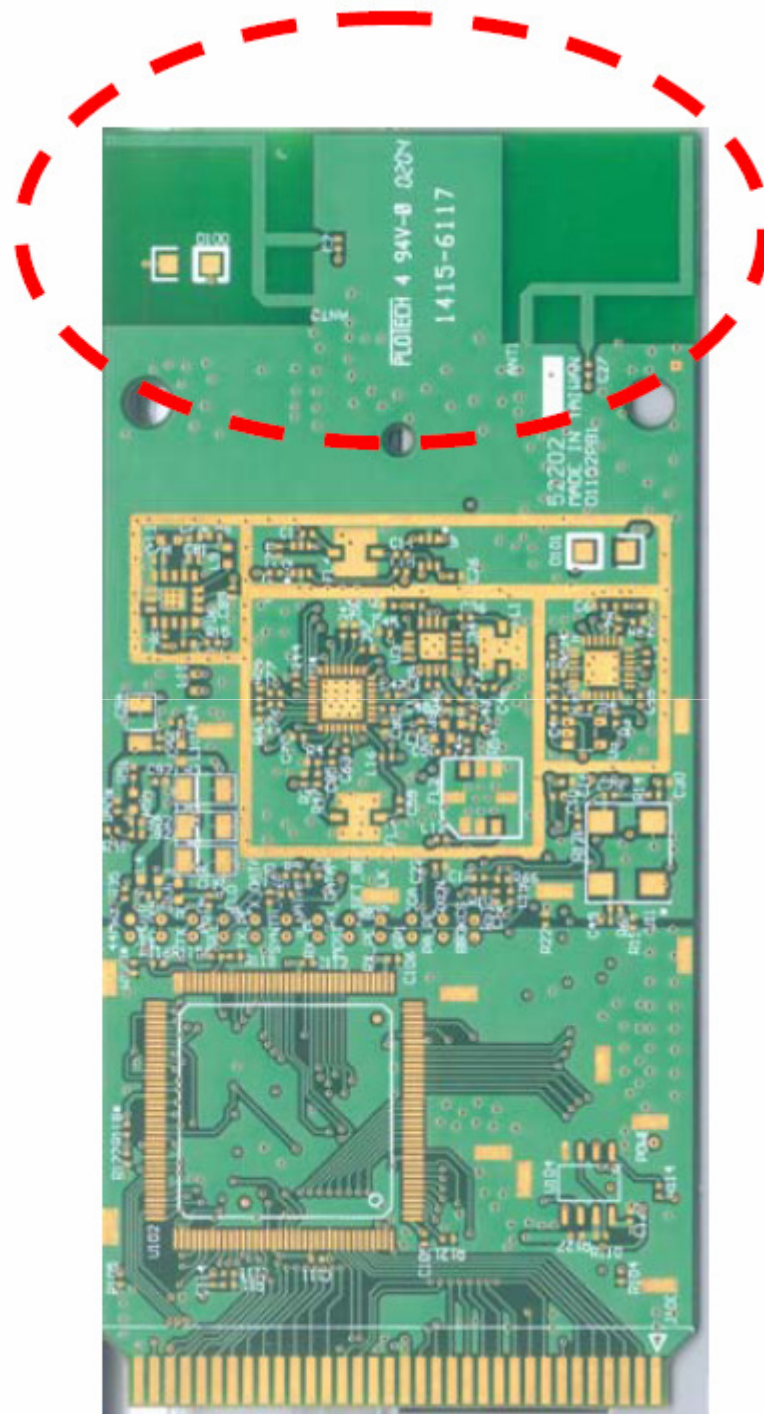
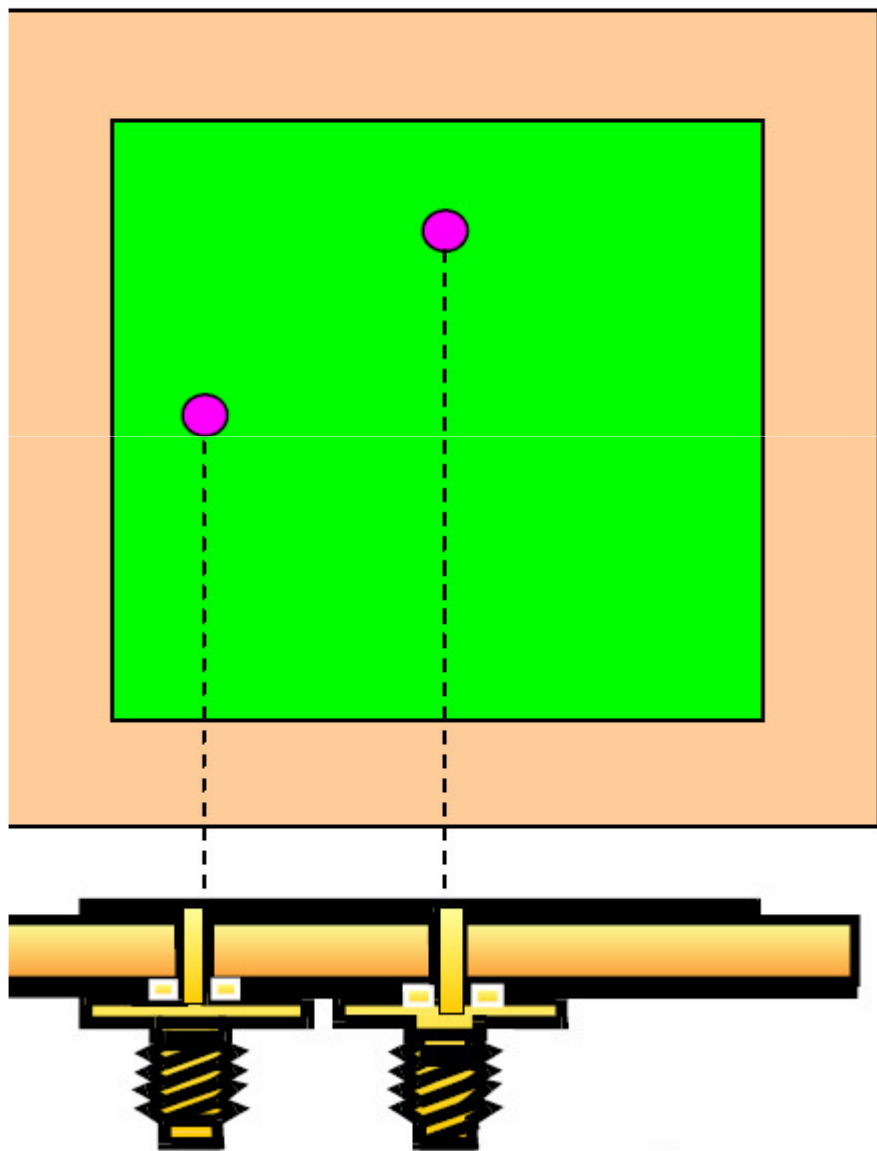


(b)

MIMO kocka



Dvpolarizacijska krpičasta antena



Sklep

- V radiokomunikacijah nasploh in mobilnih zvezah posebej so **učinki polarizacije** na sistem zelo pomembni.
- Brez razumevanja zapletenih pojavov polarizacije ne moremo v celoti razumeti lastnosti elektromagnetnega polja.
- Na polarizaciji zasnovan raznoliki (diverzni) sistem je na polarizaciji sloneča tehnika, ki omogoča izboljššan prenos
Primer Pol-MIMO.
- Polarizacija v radijskem daljinskem zaznavanju je **vir dodatne informacije**, ki dopolnjuje informacijo, pridobljeno na osnovi amplitude in faze sprejetega signala.
- Reševanje polarizacijskih problemov si poenostavimo, če uporabimo dualnost polarizacije z linijskim valovanjem.

Viri

1. J. Budin, Antene, teorija, naprave, merjenja
2. J. Budin, Poglavlja iz teorije anten
3. J. Budin, Razširjanje radijskih valov
4. J. Budin, Mikrovalovna pasivna vezja
5. spletna gradiva.....

Konec

Stokesovi parametri

$$\vec{g}(\vec{E}) = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_v|^2 + |E_h|^2 \\ |E_v|^2 - |E_h|^2 \\ 2 \operatorname{Re}(E_v^* E_h) \\ 2 \operatorname{Im}(E_v^* E_h) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_{v0}|^2 + |E_{h0}|^2 \\ |E_{v0}|^2 - |E_{h0}|^2 \\ 2 E_{v0} E_{h0} \cos \varphi \\ 2 E_{v0} E_{h0} \sin \varphi \end{bmatrix}$$

$g_0 \sim$ total wave intensity,
 $g_1 \sim$ Difference between hor. & vert. linear Parts,
 g_2 & $g_3 \sim$ Phase difference between hor. & vert. linear Parts
Absolute Phase lost!!

Completely polarized waves: $g_0^2 = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2;$

Incompletely polarized waves: $g_0^2 > g_1^2 + g_2^2 + g_3^2;$

Completely polarized waves:
$$\vec{g} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_0 \cos(2\psi) \cos(2\chi) \\ g_0 \sin(2\psi) \cos(2\chi) \\ g_0 \sin(2\psi) \end{bmatrix}$$

Stokesovi parametri

General Case: $g_0^2 > g_1^2 + g_2^2 + g_3^2$

Degree of Polarization: $p = \frac{\sqrt{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2}}{g_0}$

Decomposition into **completely polarized** & **unpolarized Component**

$$\begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-p \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + g_0 \begin{bmatrix} p \\ p \cos(2\psi) \cos(2\chi) \\ p \sin(2\psi) \cos(2\chi) \\ p \sin(2\chi) \end{bmatrix}$$