12. Polarizacija valovanja

Fizika deli valovanja na vzdolžna (longitudinalna) in prečna (transverzalna). Zvok v plinu ali tekočini je vzdolžno valovanje. Valovni vektor $\vec{k}$ ter amplituda in faza nihanja popolnoma opišejo gibanje delcev plina ali tekočine v smeri razširjanja vzdolžnega valovanja. V trdni snovi lahko hkrati obstajajo različna mehanska valovanja. Potres sproži v Zemljini skorji dve različni valovanji: hitrejši vzdolžni tlačni val P (angleško: primary/pressure wave) in počasnejši prečni strižni val S (angleško: secondary/shear wave) z različnima valovnima vektorjema $\vec{k}_P \neq \vec{k}_S$.

Valovni vektor $\vec{k}$ ter amplituda in faza nihanja ne zadoščajo za celovit opis prečnega valovanja. Če zasukamo eno od pravokotnih koordinatnih osi v smer valovnega vektorja $\vec{k}$, ima prečno valovanje natančno dve med sabo popolnoma neodvisni komponenti, ki nihata v smereh preostalih dveh koordinatnih osi. Opisano lastnost prečnega valovanja imenujemo polarizacija valovanja. Sam izraz polarizacija sicer lahko ima v fiziki tudi povsem drugačen pomen.

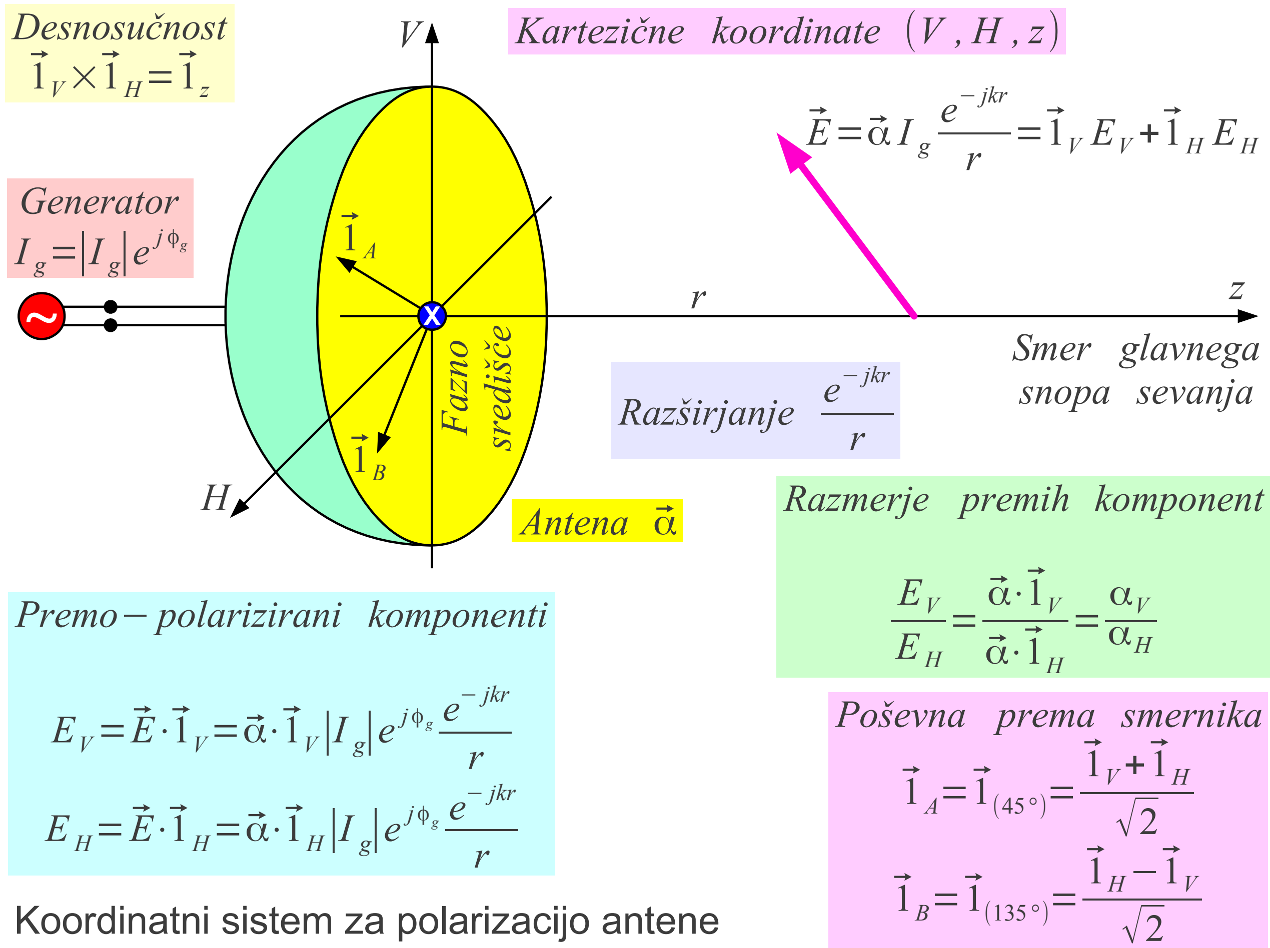
Francoski častnik, inženir in znanstvenik Étienne-Louis Malus je leta 1809 odkril polarizacijo svetlobe. Elektromagnetno valovanje je vedno izključno prečno valovanje. Fizikalni zakoni ne dovoljujejo vzdolžnega elektromagnetnega valovanja. Poljubno elektromagnetno valovanje z določenim valovnim vektorjem $\vec{k}$ lahko zato razstavimo v natančno dve med sabo pravokotni in ena od druge popolnoma neodvisni komponenti.

Za opis polarizacije valovanja se je nujno najprej dogovoriti za koordinatni sistem. Polarizacijo elektromagnetnega valovanja vedno zapišemo za vektor električnega polja $\vec{E}$. Pripadajoče magnetno polje $\vec{H}$ je nanj vedno pravokotno in tvori s smerjo valovnega vektorja $\vec{k}$ desnosučni koordinatni sistem $\vec{1}_E \times \vec{1}_H = \vec{1}_k$. Zato magnetnega polja $\vec{H}$ pri obravnavi polarizacije elektromagnetnega valovanja ne omenjamo.

Fiziki vežejo koordinatni sistem polarizacije na samo valovanje. V elektrotehniki vežemo koordinatni sistem na anteno ne glede na to, ali se antena uporablja za oddajo ali pa za sprejem valovanja. Zaradi različnih definicij koordinatnih sistemov polarizacije imajo enačbe v elektrotehničnih člankih in knjigah pogosto obrnjene predznake nekaterih veličin glede na fizikalne članke in učbenike.

V elektrotehniki uporabimo desnosučni kartezični koordinatni sistem. Koordinate poimenujemo (V, H, z), da poudarimo, da gre za polarizacijo valovanja. Koordinatni sistem (V, H, z) je sicer popolnoma enak primerno postavljenemu (x, y, z). Zaradi obilice podatkov običajno ne navajamo podrobnega polarizacijskega smernega diagrama antene. Polarizacijo antene tedaj preprosto zapišemo samo za maksimum sevanja v osi glavnega snopa.

Izhodišče koordinatnega sistema (V, H, z) je v faznem središču antene. Os z je usmerjena v smer glavnega snopa sevanja antene. Pokončna (vertikalna) os V je usmerjena navzgor oziroma v vesolju v geostacionarni tirnici na sever. Vodoravna (horizontalna) os H tvori desnosučni koordinatni sistem z ostalima dvema osema. V vesolju v geostacionarni tirnici je os H usmerjena na vzhod, da kaže os z v smeri sevanja anten telekomunikacijskega satelita proti Zemlji:



Koordinatni sistem za polarizacijo antene

Vektor električnega polja $\vec{E}$ vedno leži v ravnini VH, ki je pravokotna na smer širjenja valovanja v smeri osi z. Sevanje poljubne antene lahko zato razstavimo v premi komponenti E_V in E_H. Izraz prema (linearna) polarizacija pomeni, da konica vektorja električnega polja

$\vec{E}$ niha po premici. Prema komponenta $\vec{1}_V E_V$ niha po koordinatni osi V, prema komponenta $\vec{1}_H E_H$ pa niha po koordinatni osi H. Vsota obeh komponent ni nujno premo polarizirana, saj konica vektorja $\vec{E}$ lahko opisuje tudi drugačno krivuljo v prostoru, v splošnem primeru elipso.

Komponenti E_V in E_H sta dva kazalca, torej dve kompleksni oziroma štiri realna števila. Komponenti E_V in E_H sicer natančno opisujeta sevanje antene, ki pa poleg lastnosti antene vsebuje tudi amplitudo $|I_g|$ in fazo generatorja ϕ_g. Slednja dva nista podatka antene niti ne opisujeta polarizacije valovanja!

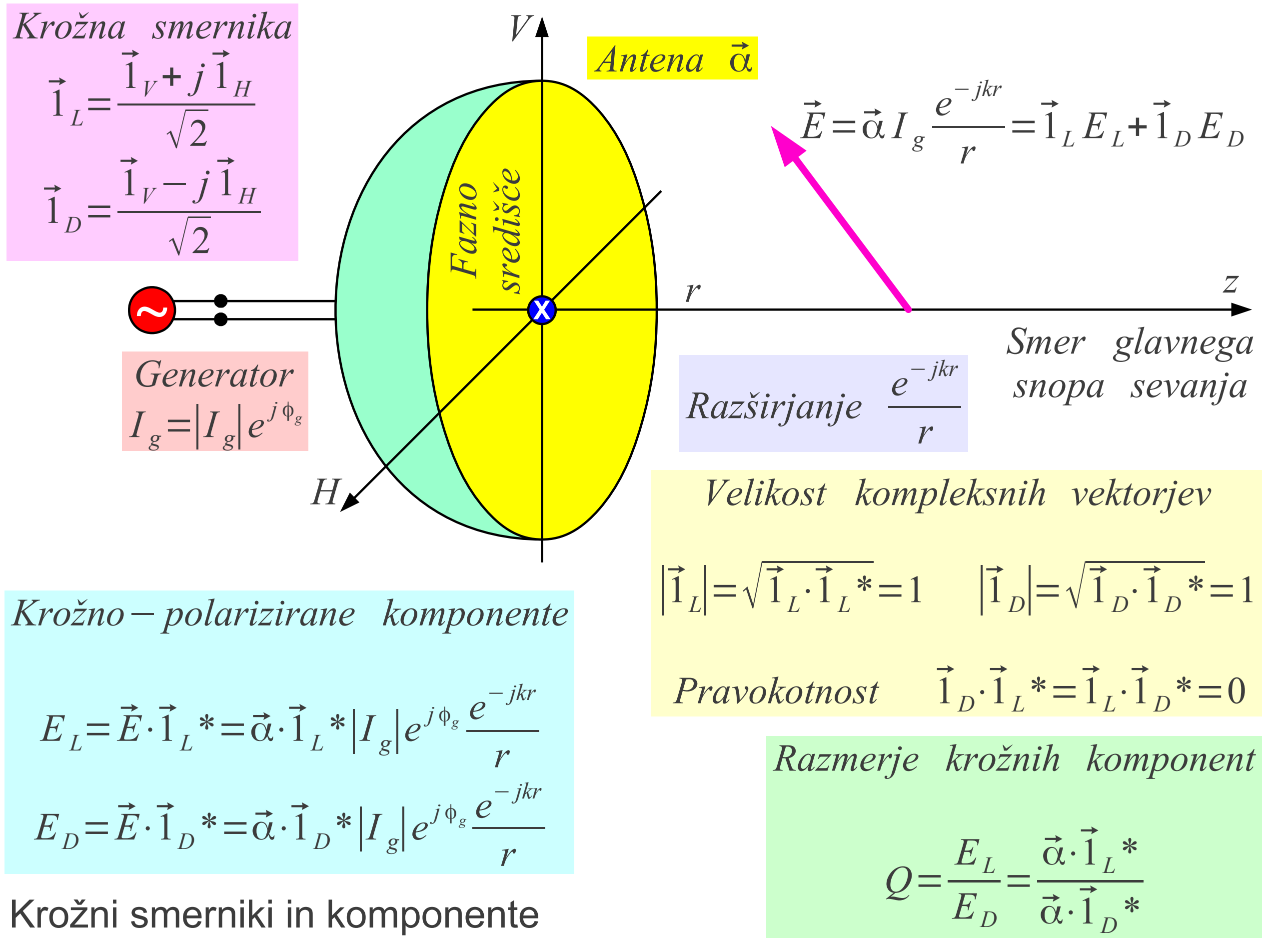
Polarizacijo antene lahko popolnoma opišemo z enim kompleksnim številom oziroma dvema realnima številoma. Na primer z razmerjem premih komponent E_V/E_H, ki je kompleksno število. V slednjem se lastnosti generatorja in razširjanje valovanja v praznem prostoru natančno krajšajo!

V istem koordinatnem sistemu (V, H, z) lahko izberemo še drugačne preme smernike. Primer sta poševna prema smernika $\vec{1}_A=\vec{1}_{(45°)}$ in $\vec{1}_B=\vec{1}_{(135°)}$. Slednja sta med sabo pravokotna. Sevanje poljubne antene lahko razstavimo na premi komponenti E_A in E_B ter zapišemo polarizacijo antene z njunim kompleksnim razmerjem E_A/E_B.

Čeprav je teoretsko popolnoma upravičena, uporaba razmerja premih komponent E_V/E_H oziroma E_A/E_B v praksi ni priljubljena. Razlog je v težavni definiciji koordinatnega sistema (V, H, z). Že pri nekoliko večji zemljepisni oddaljenosti se koordinatne osi (V, H, z) na površju Zemlje zasukajo. V vesolju sploh ni uporabne definicije koordinatnih osi (V, H, z) razen v geostacionarni tirnici.

Brez definicije koordinatnega sistema (V, H, z) polarizacije ne moremo popolnoma opisati. Lahko pa z izbiro primernih smernikov in pripadajočih komponent vsaj delno opišemo polarizacijo antene brez natančne definicije (V, H, z). V praksi je zelo priljubljena izbira krožnih smernikov $\vec{1}_L$ in $\vec{1}_D$, ki omogočata zapis nekaterih lastnosti polarizacije antene brez natančne definicije koordinat (V, H, z).

Krožna smernika $\vec{1}_L=(\vec{1}_V+j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$ in $\vec{1}_D=(\vec{1}_V-j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$ sta kompleksna vektorja. Konici vektorjev $\vec{1}_L$ in $\vec{1}_D$ krožita v ravnini VH. Pri računanju s krožnimi vektorji upoštevamo pravila kompleksnega računa:

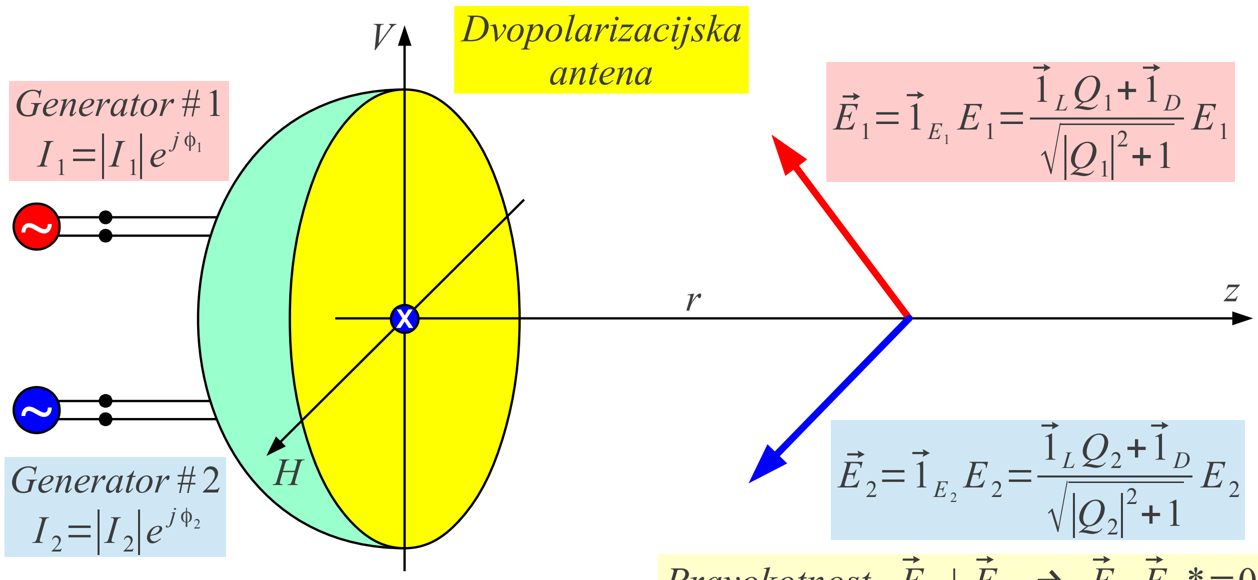


Krožni smerniki in komponente

Velikost kompleksnega vektorja dobimo s skalarnim produktom $|\vec{1}_D|=\sqrt{\vec{1}_D\cdot\vec{1}_D^*}=1$ vektorja in njegove konjugirano-kompleksne vrednosti. Pravokotnost kompleksnih vektorjev preverimo s skalarnim produktom $\vec{1}_D\cdot\vec{1}_L^*=0$. Komponento vektorja dobimo s skalarnim produktom $E_D=\vec{E}\cdot\vec{1}_D^*$ vektorja in konjugirano-kompleksne vrednosti smernika. Opisane definicije so povsem skladne z običajnim računom z realnimi vektorji in hkrati s kompleksnim računom s skalarnimi kazalci.

S pomočjo krožnih smernikov $\vec{1}_L$ in $\vec{1}_D$ lahko sevanje poljubne antene razstavimo na krožni komponenti E_L in E_D . Polarizacijo antene opisuje kompleksno razmerje krožnih komponent $Q=E_L/E_D$ (angleško: circular-polarization ratio). Rožljanje s kompleksnim računom obrodi sad: amplituda razmerja krožnih komponent $|Q|=|E_L/E_D|$ ni odvisna od izbire koordinatnega sistema (V,H,z) !

Amplituda razmerja krožnih komponent $|Q|$ je sicer praktično uporabna veličina, ko želimo uporabljati krožno polarizacijo valovanja in antene niso brezhibne. V grobem amplituda $|Q|$ pomeni:



$$I_1=|I_1|e^{j\phi_1}$$

$$I_2=|I_2|e^{j\phi_2}$$

$$\vec{E}_1=\vec{1}_{E_1}E_1=\frac{\vec{1}_L Q_1+\vec{1}_D}{\sqrt{|Q_1|^2+1}}E_1$$

$$\vec{E}_2=\vec{1}_{E_2}E_2=\frac{\vec{1}_L Q_2+\vec{1}_D}{\sqrt{|Q_2|^2+1}}E_2$$

$$Q=0\equiv desna-krožna\quad polarizacija$$
$$|Q|<1\equiv desna-eliptična\quad polarizacija$$
$$|Q|=1\equiv prema\quad polarizacija$$
$$|Q|>1\equiv leva-eliptična\quad polarizacija$$
$$Q\rightarrow\infty\equiv leva-krožna\ polarizacija$$

Razmerje krožnih komponent

$$Pravokotnost\quad \vec{E}_1\perp\vec{E}_2\ \rightarrow\ \vec{E}_1\cdot\vec{E}_2{}^*=0$$

$$\left(\vec{1}_L Q_1+\vec{1}_D\right)\cdot\left(\vec{1}_L Q_2+\vec{1}_D\right)^*=0$$

$$Q_1 Q_2{}^*+1=0$$

$$Q_1=-\frac{1}{Q_2{}^*}\qquad Q_2=-\frac{1}{Q_1{}^*}$$

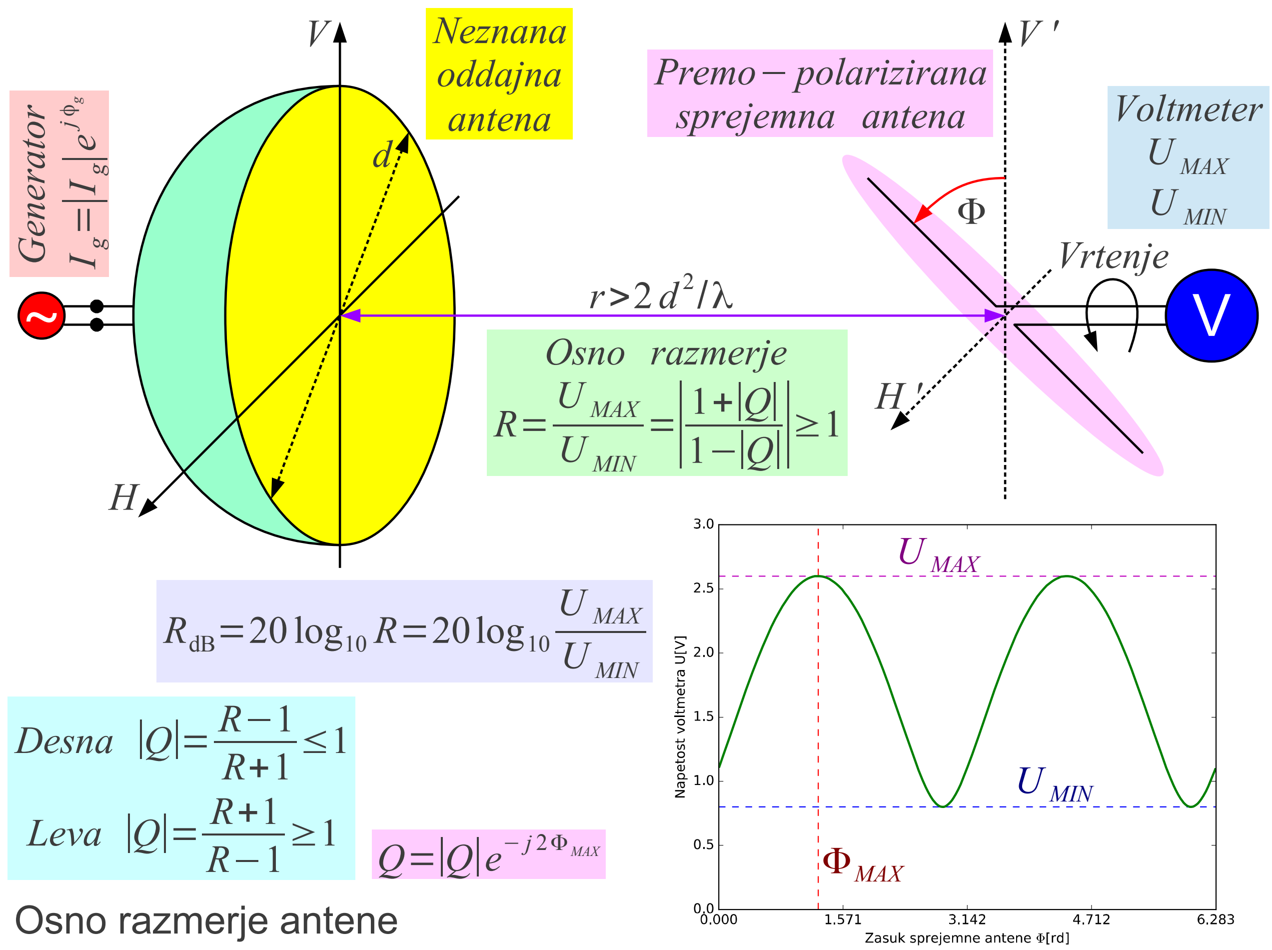
Z razmerjem krožnih komponent Q lahko zapišemo kompleksni smerni vektor poljubnega električnega polja $\vec{E}$. Iz pravokotnosti $\vec{E}_1\perp\vec{E}_2$ sledi pogoj za razmerji krožnih komponent Q_1 in Q_2 dvopolarizacijske antene, da se oddaji na pravokotnih polarizacijah med sabo ne motita. Dvopolarizacijski prenos omogoča dvakrat višjo zmogljivost radijske zveze v isti pasovni širini, torej dvakrat višjo spektralno učinkovitost. Nekoč je dvopolarizacijski prenos zahteval natančno nastavljanje satelitskih anten. Danes med sabo pravokotne vektorje poišče cenena elektronika v vsakem WiFiju oziroma mobilnem telefonu.

Smernik $\vec{1}_D=(\vec{1}_V-j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$ se v izhodišču koordinatnega sistema vrti v ravnini VH v desno in hkrati valovanje napreduje po pravilu desnega vijaka v smeri osi z . Elektrotehniki (definicija IEEE) takšno polarizacijo imenujemo desna-krožna polarizacija ali RHCP (angleško: Right-Hand Circular Polarization). Fiziki opazujejo valovanje v prostoru, kjer konica vektorja $\vec{1}_D=(\vec{1}_V-j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$ opisuje levo vijačnico. Zato fiziki takšno polarizacijo imenujejo leva-krožna polarizacija v nasprotju z definicijo IEEE.

Obratno se smernik $\vec{1}_L=(\vec{1}_V+j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$ v izhodišču koordinatnega sistema vrti v ravnini VH v levo in hkrati valovanje napreduje po pravilu levega vijaka v smeri osi z. Definicija IEEE takšno polarizacijo imenuje leva-krožna polarizacija ali LHCP (angleško: Left-Hand Circular Polarization). Fiziki opazujejo valovanje v prostoru, kjer vektor $\vec{1}_L=(\vec{1}_V+j\vec{1}_H)/\sqrt{2}$ opisuje desno vijačnico. Zato fiziki takšno polarizacijo imenujejo desna-krožna polarizacija v nasprotju z definicijo elektrotehnikov.

Polarizacijo neznane antene merimo v radijski zvezi, kjer na drugi strani zveze uporabimo en ali več različnih referenčnih anten z znano polarizacijo. Običajno je najlažje izdelati premo-polarizirane antene. Na primer, v polvalovnem dipolu lahko teče tok samo v smeri žice, torej takšna antena seva premo-polarizirano električno polje v smeri žice.

Polarizacijo neznane antene lahko merimo s sukanjem znane premo-polarizirane antene na drugi strani zveze. Pri sukanju premo-polarizirane referenčne antene dobimo dva maksimuma in dva minimuma sprejema:



Osno razmerje antene

Razmerje med maksimum in minimumom sprejete napetosti $R=U_{MAX}/U_{MIN}$ imenujemo osno razmerje polarizacije (angleško: axial ratio). Osno razmerje pogosto navajamo v logaritemskih enotah $R_{\mathrm{dB}}=20\log_{10}R$. Izmerjeno osno razmerje je v razponu $1\leq R\leq\infty$ oziroma $0\mathrm{dB}\leq R_{\mathrm{dB}}\leq\infty\,\mathrm{dB}$. Kakovostna krožno-polarizirana antena ima osno razmerje pod $R_{\mathrm{dB}}<1\mathrm{dB}$. Premo-polarizirana antena ima neskončno veliko osno razmerje $R\rightarrow\infty$, saj grejo minimumi proti nič!

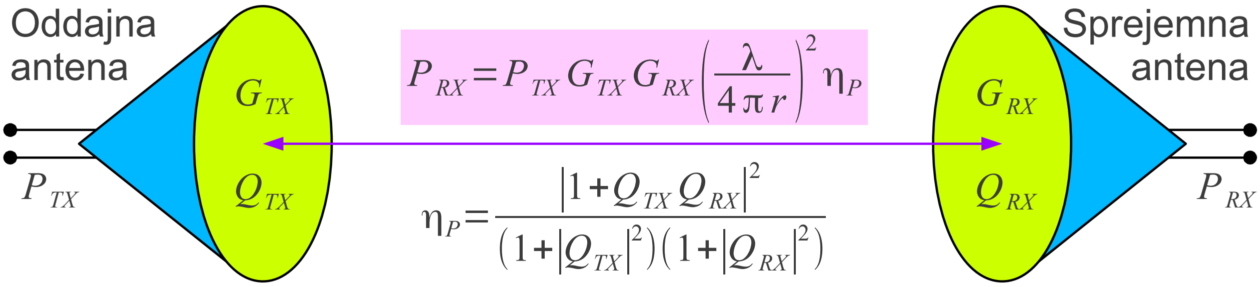
Iz izmerjenega osnega razmerja R lahko izračunamo amplitudo razmerja krožnih komponent $|Q|$. Iz lege referenčne antene Φ_{MAX} , kjer dobimo največji sprejem, lahko določimo še fazo razmerja krožnih komponent in dobimo $Q=|Q|e^{-j2\Phi_{MAX}}$. Česar z opisano meritvijo ne moremo določiti, je smer krožne oziroma eliptične polarizacije. Iz izmerjenega osnega razmerja R dobimo dve rešitvi za amplitudo $|Q|$, ki ustrezata levi in desni krožni oziroma eliptični polarizaciji!

Za določitev smeri krožne polarizacije bi v opisani meritvi potrebovali kazalčni voltmeter, ki zna poleg amplitude sprejemne napetosti meriti tudi fazo. Kazalčna meritev zahteva neroden referenčni vod od oddajnika. Verjetno je bolj preprosto uporabiti dodatno referenčno anteno z znano levo oziroma desno krožno polarizacijo. Končno, za večino merjencev že v naprej v grobem poznamo smer polarizacije desna ali leva, zanimajo nas le podrobnosti in tu daje meritev osnega razmerja R natančen odgovor.

V obratni smeri bi osno razmerje $R'=(1+|Q|^2)/(1-|Q|^2)$ lahko izračunali iz amplitude razmerja krožnih komponent. Leva krožna oziroma eliptična polarizacija pri tem daje negativen rezultat $-\infty\leq R'\leq-1$. Z negativnim R' bi lahko označili levo polarizacijo. Žal predznaka R' z opisano meritvijo ne moremo določiti, zato običajno uporabljamo samo pozitivno vrednost $R=|R'|=|(1+|Q|^2)/(1-|Q|^2)|\geq 1$.

S skalarnim produktom $\vec{E}_1\cdot\vec{E}_2{}^*=0$ ugotovimo, da sta polji $\vec{E}_1\perp\vec{E}_2$ med sabo pravokotno polarizirani. Velikost skalarnega produkta $|\vec{E}_1\cdot\vec{E}_2{}^*|=|\vec{E}_1||\vec{E}_2|$ pravi, da sta polji $\vec{E}_1\|\vec{E}_2$ enako polarizirani in se razlikujeta kvečjemu za skalarno (amplituda in faza) množilno konstanto. Ker v elektrotehniki vežemo polarizacijo na anteno, v radijski zvezi potrebujemo še povsem neodvisen (tretji!) pojem imenovan skladnost polarizacije (angleško: polarization match)!

V izračunu radijske zveze se pogosto sploh ne ukvarjamo s polarizacijo in privzamemo, da sta polarizaciji oddajne in sprejemne antene popolnoma skladni med sabo. Polarizaciji oddajne in sprejemne antene upoštevamo tako, da Friisovo enačbo radijske zveze v praznem prostoru dopolnimo s faktorjem skladnosti polarizacije (angleško: polarization mismatch factor ali polarization efficiency) $0 \leq \eta_P \leq 1$:



$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4 \pi r} \right)^2 \eta_P$$

$$\eta_P = \frac{|1 + Q_{TX} Q_{RX}|^2}{(1 + |Q_{TX}|^2)(1 + |Q_{RX}|^2)}$$

Polarizacija TX		Q_{TX}	R_{TX}	Faktor skladnosti η_P (polarizacija RX)					
				VP	HP	RHCP	LHCP	$P_{45°}$	$P_{135°}$
VP	$\vec{1}_V$	1	∞	1	0	1/2	1/2	1/2	1/2
HP	$\vec{1}_H$	-1	∞	0	1	1/2	1/2	1/2	1/2
RHCP	$\vec{1}_D = (\vec{1}_V - j \vec{1}_H)/\sqrt{2}$	0	1	1/2	1/2	1	0	1/2	1/2
LHCP	$\vec{1}_L = (\vec{1}_V + j \vec{1}_H)/\sqrt{2}$	∞	1	1/2	1/2	0	1	1/2	1/2
$P_{45°}$	$\vec{1}_A = (\vec{1}_V + \vec{1}_H)/\sqrt{2}$	$-j$	∞	1/2	1/2	1/2	1/2	0	1
$P_{135°}$	$\vec{1}_B = (\vec{1}_H - \vec{1}_V)/\sqrt{2}$	j	∞	1/2	1/2	1/2	1/2	1	0

Faktor skladnosti polarizacije

Faktor skladnosti polarizacije $\eta_P = |\vec{1}_{ETX} \cdot \vec{1}_{ERX}{}^*|^2$ je načeloma kvadrat velikosti skalarnega produkta smernikov polarizacije oddajnika in sprejemnika. Pri zapisu smernikov z desno in levo komponento moramo paziti na njuno medsebojno fazo. Pri izračunu skladnosti se razliki faze krožnih komponent oddajnika in sprejemnika med sabo seštevata. Pri ugotavljanju vzporednosti oziroma pravokotnosti polarizacij se razliki faze krožnih komponent dveh oddajnikov med sabo odštevata. Izraz za faktor skladnosti η_P polarizacije v radijski zvezi zato vsebuje zmnožek $Q_{TX} Q_{RX}$ (brez konjugirano-kompleksno oziroma zvezdice $*$) za razliko od zmnožka $Q_{TX1} Q_{TX2}{}^*$ pri primerjavi polarizacij dveh oddajnikov.

Kaj v resnici pomeni skladnost polarizacije, si je smiselno ogledati na nekaj preprostih zgledih. Povsem samoumevno pokončno polariziran oddajnik (VP) zahteva pokončno polariziran sprejemnik (VP). Vodoravno polariziran oddajnik (HP) zahteva vodoravno polariziran sprejemnik (HP). Z uporabo med sabo pravokotnih polarizacij lahko hkrati v istem prostoru in v istem frekvenčnem pasu vzpostavimo dve neodvisni radijski zvezi VP-VP in

HP-HP brez medsebojnih motenj.

Elektrotehnična definicija polarizacije veže koordinatni sistem na anteno. Desno-krožno polariziran oddajnik (RHCP) zahteva sprejemnik z enako desno-krožno polarizirano (RHCP) anteno. Levo-krožno polariziran oddajnik (LHCP) zahteva sprejemnik z enako levo-krožno polarizirano (LHCP) anteno. Pri uporabi krožne polarizacije sta anteni na obeh koncih zveze popolnoma enaki med sabo, kar fiziki težko razumejo. Povsem jasno uporaba obeh krožnih polarizacij RHCP in LHCP omogoča dve neodvisni radijski zvezi v istem prostoru in v istem frekvenčnem pasu.

Elektrotehniki težko razumejo, zakaj ne moremo uporabljati enakih anten pri poševni premi polarizaciji. Poševna prema polarizacija 45° oddajnika se na sprejemni strani preslika v poševno polarizacijo 135° zaradi obrnjene smeri sevanja antene! Fiziki koordinatnega sistema sicer ne obračajo, morajo pa vseeno uporabiti drugačno sprejemno anteno od oddajne antene! Povsem jasno tudi v primeru poševne preme polarizacije obstajata dve med sabo pravokotni inačici, ki omogočata dve neodvisni radijski zvezi v istem prostoru in v istem frekvenčnem pasu.

V tabeli šestih značilnih zgledov polarizacij oddajnika in sprejemnika imata vsak stolpec in vsaka vrstica natančno eno enico in eno ničlo. Za vsako polarizacijo oddajnika torej obstaja skladna polarizacija sprejemnika. Vsaki polarizaciji lahko najdemo pravokotni par, ki omogoča podvojitev zmogljivosti radijske zveze. Antena z univerzalno polarizacijo, ki bi zaznala poljubno polariziran oddajnik, ne obstaja.

Celo dvajseto stoletje so elektrotehniki in fiziki obravnavali polarizacijo valovanja na dva različna načina. Elektrotehniki so uporabljali antene z eno samo polarizacijo in imeli na razpolago hitre merilne pripomočke za ozkopasovne radijske signale. Fiziki so opazovali svetlobo poljubne polarizacije in izredno velike pasovne širine z več velikostnih razredov počasnejšimi merilnimi pripomočki.

V enaindvajsetem stoletju so se naloge elektrotehnikov in fizikov približale. Razvoj radijske tehnike zahteva dvopolarizacijske antene in širokopasovne signale, kar merilni pripomočki s težavo dohajajo. Komunikacije po svetlobnih vlaknih uporabljajo razmeroma ozkopasovne svetlobne signale in dvopolarizacijski prenos skupaj z oddajniki, sprejemniki in merilno tehniko, ki je sposobna te signale v celoti obdelati. Sodoben učbenik mora torej povzeti in med sabo povezati vse dosežke elektrotehnikov in fizikov.

Elektromagnetno sevanje koherentnega oddajnika popolnoma opišejo štiri realna števila: amplituda in faza generatorja ter kompleksno razmerje komponent polarizacije antene. Pri svetlobnih frekvencah je težko meriti fazo, ostanejo torej tri realna števila, moč generatorja in kompleksna polarizacija antene. Dodatno celo pri koherentnih svetlobnih virih pogosto nastopata obe med sabo pravokotni polarizaciji, napajani z generatorjema, ki med sabo nista sinhronizirana niti nujno nimata enakih povprečnih moči.

Praktično uporaben zapis moči in polarizacije svetlobe je zasnoval matematik George Gabriel Stokes leta 1852 s štirimi parametri s_0 , s_1 , s_2 in s_3 . Vsi štirje parametri imajo merske enote moči $P[\mathrm{W}]$, gostote moči $\vec{S}[\mathrm{W/m^2}]$ oziroma kvadrata amplitude električne poljske jakosti $|\vec{E}|^2[\mathrm{V^2/m^2}]$. Parameter s_0 predstavlja skupno moč svetlobe, parameter s_1 razliko moči med pokončno in vodoravno polarizacijo, parameter s_2 razliko moči med poševnima polarizacijama 45° in 135° ter parameter s_3 razliko moči med levo in desno krožno polarizacijo:

George Gabriel Stokes 1852

$$s_0 = P_V + P_H = P_A + P_B = P_L + P_D$$

$$s_1 = P_V - P_H = m\, s_0 \frac{2\,\mathrm{Re}[Q]}{|Q|^2+1}$$

$$s_2 = P_A - P_B = m\, s_0 \frac{-2\,\mathrm{Im}[Q]}{|Q|^2+1}$$

$$s_3 = P_L - P_D = m\, s_0 \frac{|Q|^2-1}{|Q|^2+1}$$

Hitri opazovalec

$$B_{opazovalca} \gg B_{signala}$$

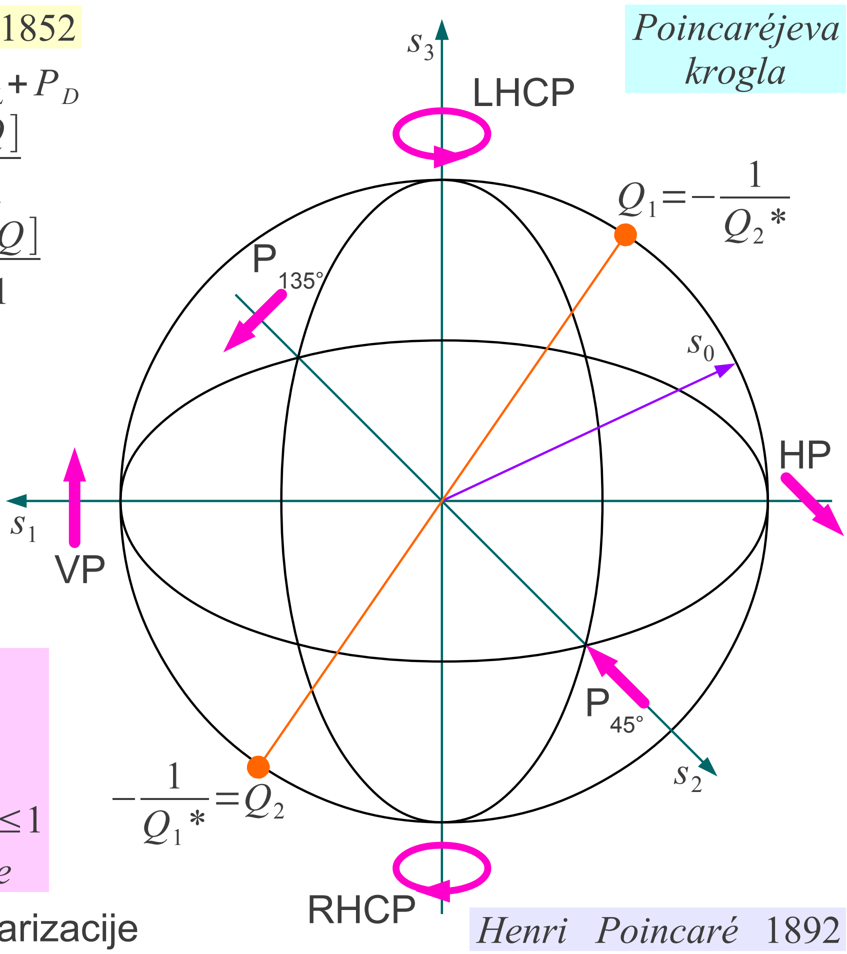
$$s_0 = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \qquad m = 1$$

Počasni opazovalec

$$B_{opazovalca} \ll B_{signala}$$

$$m\, s_0 = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \qquad 0 \le m \le 1$$

$$m \equiv stopnja \quad polarizacije$$



Stokesovi parametri polarizacije

Vse štiri Stokesove parametre določimo iz meritve moči. Primeren merilnik znamo izdelati za poljubno frekvenco od radijskih valov do svetlobe. Meritev moči izmeničnega signala v vsakem primeru vsebuje povprečenje. Rezultat meritve moči je odvisen od časa povprečenja.

Hitri opazovalec $B_{opazovalca} \gg B_{signala}$ lahko popolnoma izmeri polarizacijo ozkopasovnega signala. Polarizacijo in moč signala opiše s tremi med sabo neodvisnimi parametri s_1 , s_2 in s_3 . Preostali Stokesov parameter, skupno moč signala $s_0 = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}$ izračuna iz ostalih treh.

Počasni opazovalec $B_{opazovalca} \ll B_{signala}$ ne more slediti časovnemu razvoju polarizacije širokopasovnega signala. Polarizacijo in moč signala opiše s štirimi med sabo neodvisnimi parametri s_0 , s_1 , s_2 in s_3 . Zaradi dolgega časa povprečenja je skupna moč signala $s_0 \geq \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}$ lahko večja od korena vsote kvadratov ostalih treh parametrov.

Počasni opazovalec oceni uspešnost svojega dela s stopnjo polarizacije $m = \left(\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}\right) / s_0$. Stopnja polarizacije se giblje v razponu $0 \leq m \leq 1$. Stopnja polarizacije $m = 0$ pomeni nepolarizirano valovanje. Stopnja polarizacije $m = 1$ pomeni popolnoma polarizirano valovanje.

Časovni razvoj polarizacije bele sončne svetlobe je tako hiter, da mu danes ne moremo slediti z nobenim merilnim pripomočkom. Povprečje razlike moči pokončne in vodoravne polarizacije zato izmerimo $s_1 = 0$, povprečje razlike moči obeh poševnih polarizacij izmerimo $s_2 = 0$ in povprečje razlike obeh krožnih polarizacij izmerimo $s_3 = 0$. Za sodobno merilno tehniko bela sončna svetloba ostaja nepolarizirana $m = 0$!

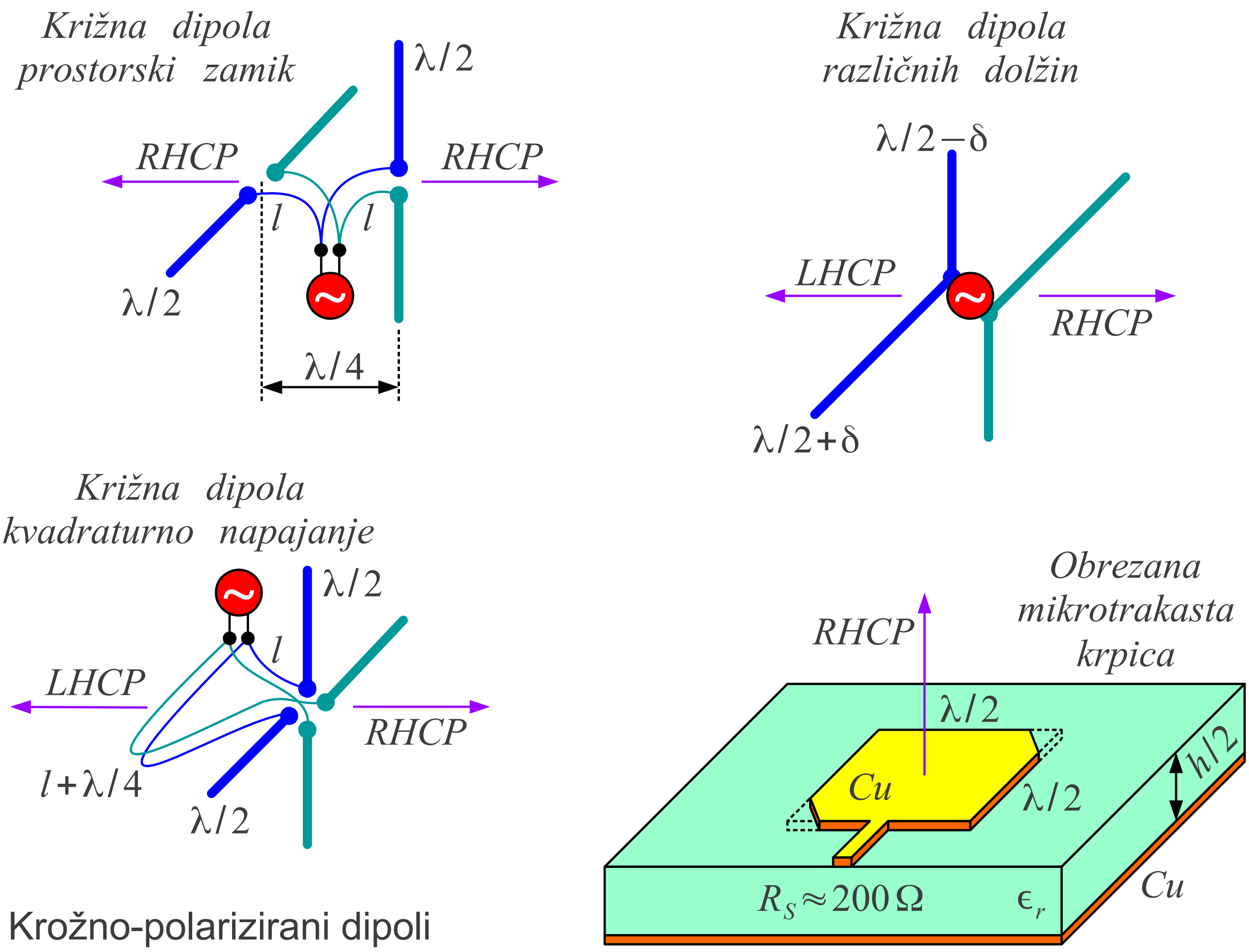
Étienne-Louis Malus je s preprostimi merilnimi pripomočki ugotovil, da se odbojnost vodne gladine za pokončno polarizacijo VP razlikuje od odbojnosti za vodoravno polarizacijo HP. Kljub nespremenjeni pasovni širini in počasnim merilnim pripomočkom ima od vodne gladine odbiti žarek sončne svetlobe stopnjo polarizacije $m \neq 0$ različno od nič! Odboj sončne svetlobe na meji različnih dielektrikov je lahko v izbranih pogojih (David Brewster 1815) celo popolnoma polariziran $m = 1$.

Matematik Henri Poincaré je leta 1892 našel nazoren prikaz Stokesovih parametrov v krogli v središču kartezičnega koordinatnega sistema (s_1, s_2, s_3) . Popolnoma polarizirano valovanje $m = 1$ opisuje točka na površini krogle polmera s_0 . Delno polarizirano valovanje $0 < m < 1$ opisujejo točke v notranjosti krogle. Nepolarizirano valovanje $m = 0$ ustreza središču krogle. Nasprotiležni (antipodalni) točki na površini krogle opisujeta par med sabo pravokotnih polarizacij.

Med Stokesovimi parametri s_0 , s_1 , s_2 in s_3 in kompleksnim razmerjem krožnih komponent Q obstaja natančna povezava. Preprosto povedano, na Poincaréjevi krogli zemljepisna širina natančno določa amplitudo razmerja krožnih komponent $|Q|$, zemljepisna dolžina pa ustreza fazi razmerja krožnih komponent. Južni tečaj Poincaréjeve krogle ustreza desni krožni polarizaciji RHCP, severni tečaj pa levi krožni polarizaciji LHCP. Vzdolž ekvatorja Poincaréjeve krogle je polarizacija prema, njena smer se suče s polovico zemljepisne dolžine.

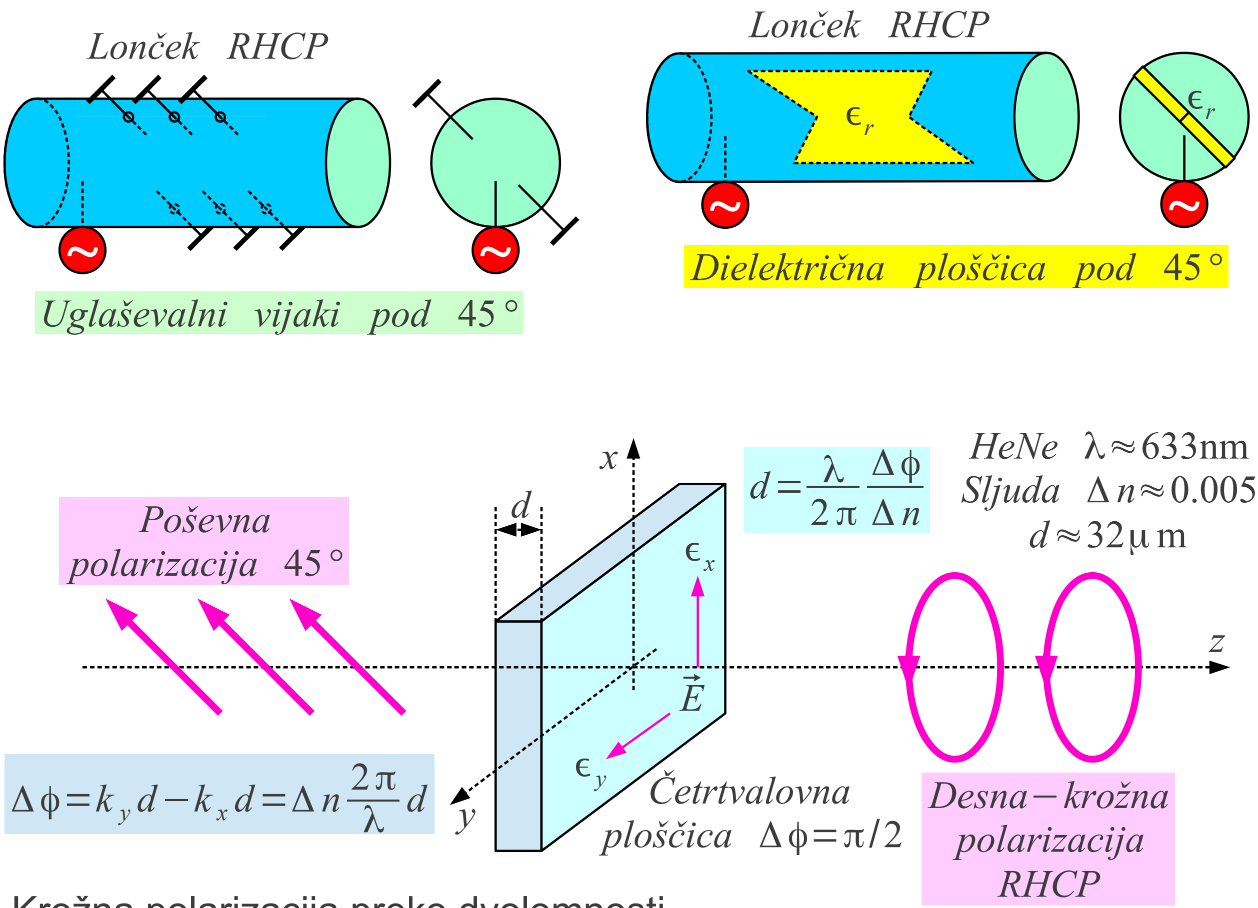
Žal je zaradi različnih definicij koordinatnih sistemov enoveljavno določen samo Stokesov parameter s_1 . Stokesova parametra s_2 in s_3 menjata predznak, če koordinatni sistem vežemo na sprejemno anteno namesto na valovanje. Stokesov parameter s_3 še dodatno menja predznak zaradi različnih definicij smeri krožne polarizacije elektrotehnikov in fizikov.

Pri sprejemu nepolariziranega valovanja $m=0$ je faktor skladnosti polarizacije vedno enak $\eta_P=1/2=50\%$ ne glede na polarizacijo sprejemne antene. Praktično pomemben primer v radijski tehniki je sprejem toplotnega šuma. Tudi druge motnje v radijski zvezi so najpogosteje nepolarizirane. Celotno moč nepolariziranega valovanja $m=0$ bi lahko sprejeli samo z dvema med sabo pravokotno polariziranima antenama, priključenima na dve neodvisni bremeni.



Krožno-polarizirani dipoli

krožna polarizacija z dipoli in krpicami



Krožna polarizacija preko dvolomnosti

krožna polarizacija z dvolomnostjo valovoda in snovi

Arhimedova spirala $\rho=\alpha\phi$

$$dl=\rho\,d\phi=\alpha\phi\,d\phi$$

$$l_1=\int_0^{\phi}\alpha\phi\,d\phi=\frac{\alpha\phi^2}{2}$$

$$l_2=\int_{\pi}^{\phi+\pi}\alpha\phi\,d\phi=$$

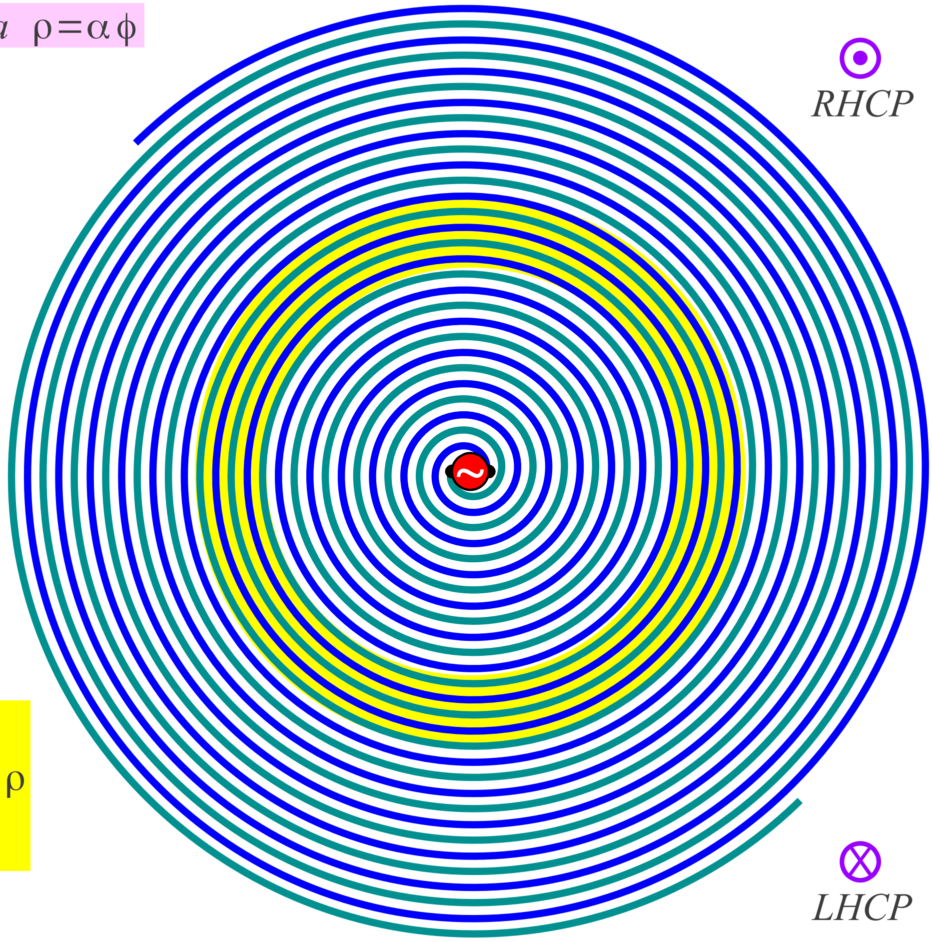
$$=\alpha\left[\frac{(\phi+\pi)^2}{2}-\frac{\pi^2}{2}\right]$$

$$l_2=\alpha\frac{\phi^2}{2}+\alpha\pi\phi$$

Aktivni kolobar

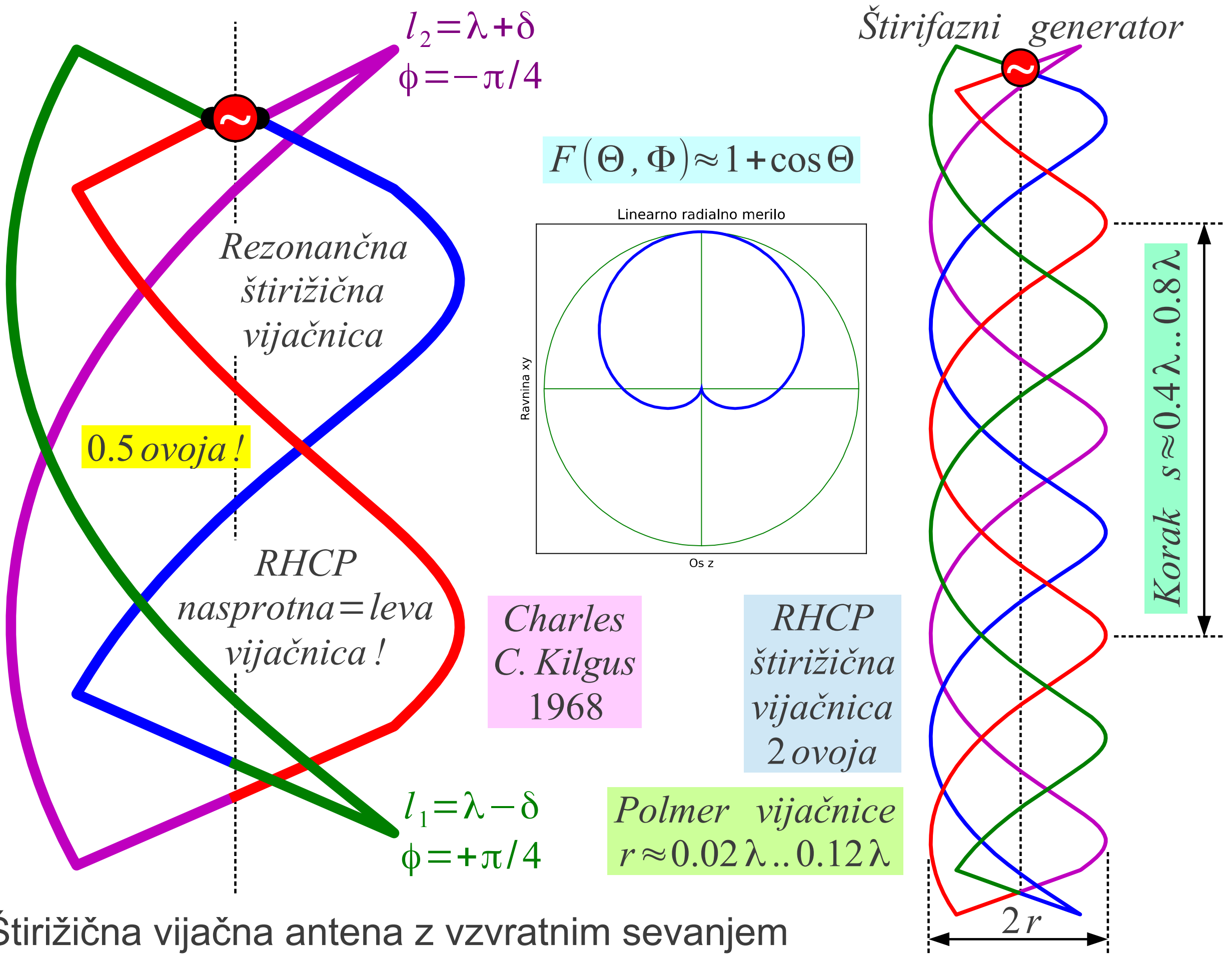
$$\frac{\lambda}{2}\approx l_2-l_1=\alpha\pi\phi=\pi\rho$$

$$\lambda\approx 2\pi\rho$$



Dvokraka spirala

dvokraka spiralna antena



Štirižična vijačna antena z vzvratnim sevanjem

vijačna antena z vzvratnim sevanjem

* * * * *