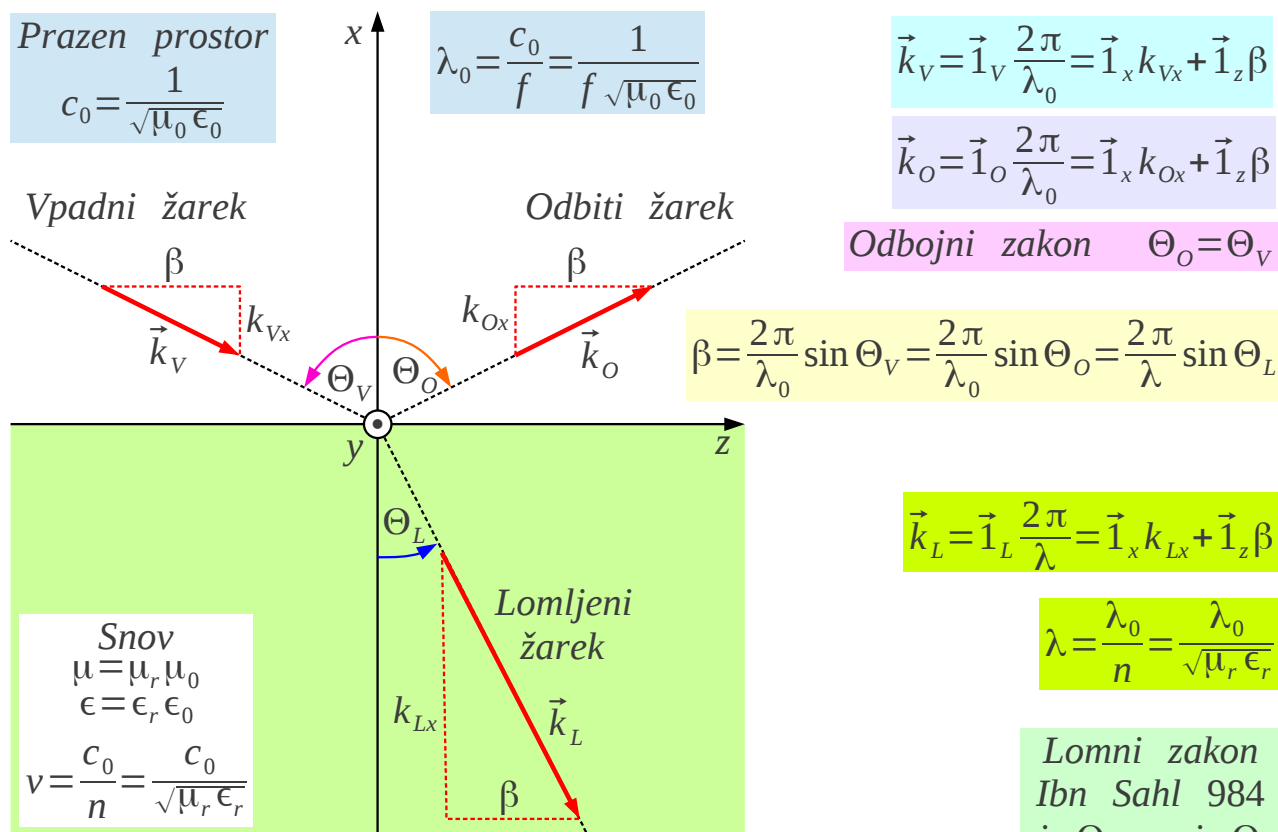


15. Odboj valovanja

Odboj valovanja ima v radijski zvezi najrazličnejše vloge. Odboj lahko oslabi oziroma popači koristen radijski signal. Odboj od zrcala na vrhu hriba pomaga premagati uklonsko slabljenje ovire. Odboj radijskih valov od letala je merjena veličina radarja.

Valovanje se različno odbija od predmetov, ki so dosti manjši $d \ll \lambda$ oziroma dosti večji $d \gg \lambda$ od valovne dolžine. Odbojnost površine različnih predmetov se spreminja v širokem razponu od $|\Gamma| \ll 1$ vse do $|\Gamma| \approx 1$. Glede na hrapavost in obliko površine je odboj lahko zrcalen oziroma razpršen.

V vseh omenjenih primerih radijsko valovanje vpada iz praznega prostora na površino snovi. Zrak se pogosto obnaša skoraj kot prazen prostor, več o tem v poglavju o ozračju. Snov je lahko dielektrik, prevodnik oziroma feromagnetik. Električno prevodnost snovi lahko v enačbah natančno opisuje kompleksna relativna dielektričnost ϵ_r . Vpadni žarek valovanja se na površini snovi delno odbije nazaj v prazen prostor in delno lomi v snov:



Odboj in lom na površini snovi

Vpadni, odbiti in lomljeni žarek opisujejo pripadajoči valovni vektorji \vec{k}_V , \vec{k}_O in \vec{k}_L . Če naj bo fizikalni pojav v vseh točkah površine snovi enak, morajo biti komponente vseh treh valovnih vektorjev, ki so vzporedne s površino snovi, med sabo enake. Vzporedno komponento valovnega vektorja v smeri osi z se pogosto označuje z $\beta = \vec{1}_z \cdot \vec{k}_V = \vec{1}_z \cdot \vec{k}_O = \vec{1}_z \cdot \vec{k}_L$.

Iz enakosti vzdolžnih komponent neposredno sledi odbojni zakon $\Theta_O = \Theta_V$, koda vpadnega in odbitega žarka sta med sabo enaka. Perzijski matematik Ibn Sahl je davnega leta 984 na dvoru kalifata v Bagdadu izpeljal povsem pravilen lomni zakon $\sin \Theta_V = n \sin \Theta_L$, kjer lomni količnik $n = c_0/v$ predstavlja razmerje med hitrostma svetlobe v praznem prostoru in v snovi. Odbojni in lomni zakon veljata oba za katerokoli vrsto valovanja, vzdolžnega ali prečnega.

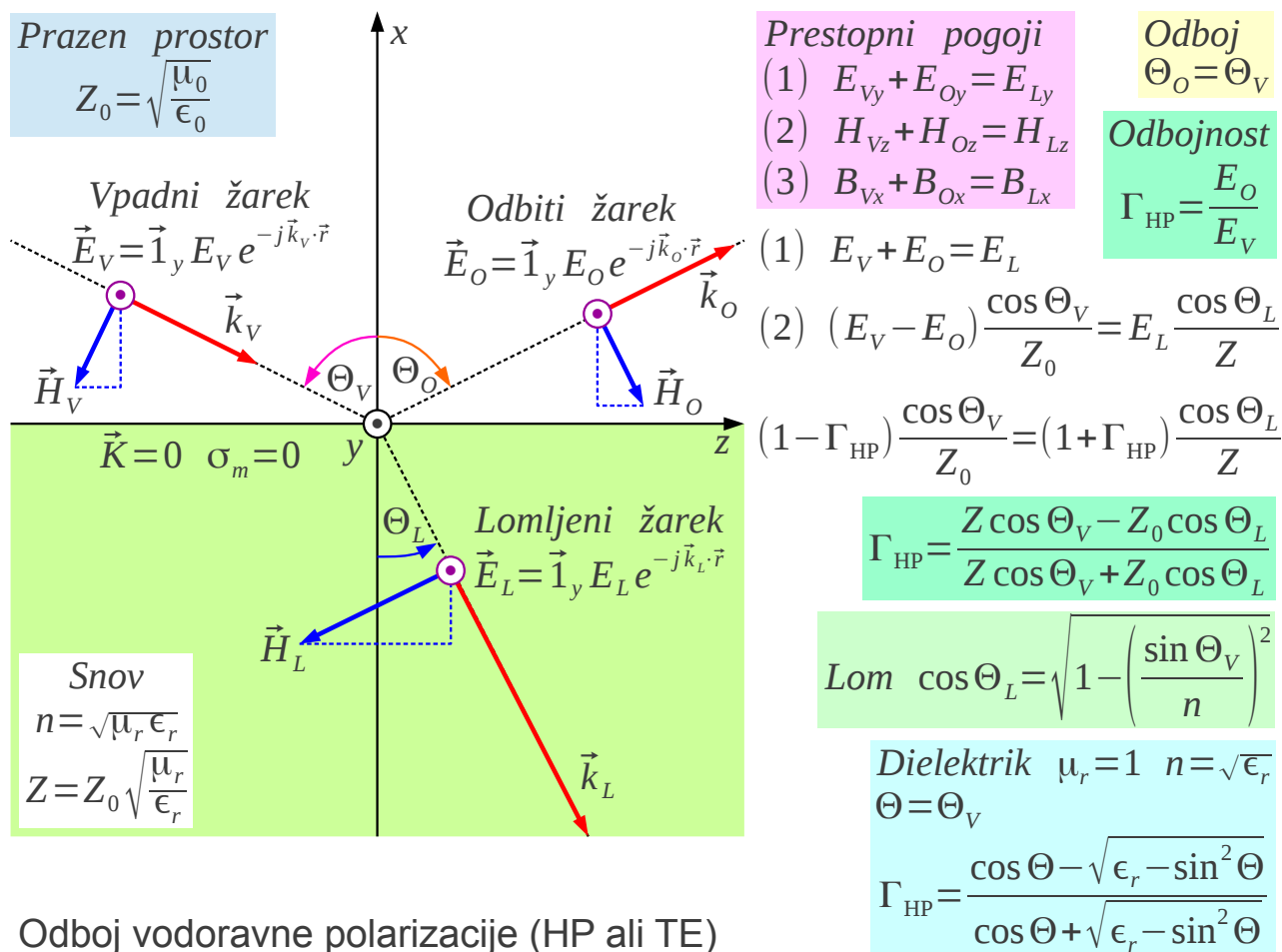
Delitev moči vpadnega žarka na odbiti žarek in lomljeni žarek ter medsebojne faze vseh treh žarkov so odvisne od vrste valovanja. Pri prečnih valovanjih so razmerja moči in medsebojne faze dodatno odvisne od polarizacije vpadnega valovanja. Étienne-Louis Malus je leta 1809 prav iz odvisnosti jakosti odboja in loma od polarizacije odkril, da je svetloba prečno valovanje.

Pri elektromagnetnem oziroma kateremkoli drugem prečnem valovanju popolnoma zadošča obravnava dveh nazornih primerov. TE oziroma transverzalno-električni val ima električno polje vzporedno površini snovi. TM oziroma transverzalno-magnetni val ima magnetno polje vzporedno površini snovi. Povsem jasno sta pri pravokotnem vpadu $\Theta_V = 0$ valovanja na površino snovi oba primera med sabo enaka.

Radijski valovi se najpogosteje odbijajo od vodoravne površine tal. TE val v primeru odboja od tal pomeni vodoravno premo polarizacijo ali HP. TM val v primeru odboja od tal pomeni pokončno premo polarizacijo ali VP. V obeh primerih nalogo delitve moči in medsebojne faze rešujemo tako, da polja vseh treh žarkov razstavimo v komponente in vsilimo prestopne pogoje za električno in magnetno polje na površini snovi.

V primeru vodoravne polarizacije imajo električna polja $\vec{E}_i = \vec{1}_y E_i e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}}$ vpadnega, odbitega in lomljenega žarka samo vzporedno komponento s površino tal. Pripadajoča magnetna polja vseh treh žarkov imajo obe komponenti, vzporedno in pravokotno. Prestopni pogoji zahtevajo (1) zvezen prestop (vzporednega) električnega polja E_y , (2) zvezen prestop vzporedne komponente magnetnega polja H_z v odsotnosti

površinskih tokov $\vec{K}=0$ in (3) zvezen prestop pravokotne komponente gostote magnetnega pretoka B_x v odsotnosti magnetnih nabojev $\sigma_m=0$ na površini:

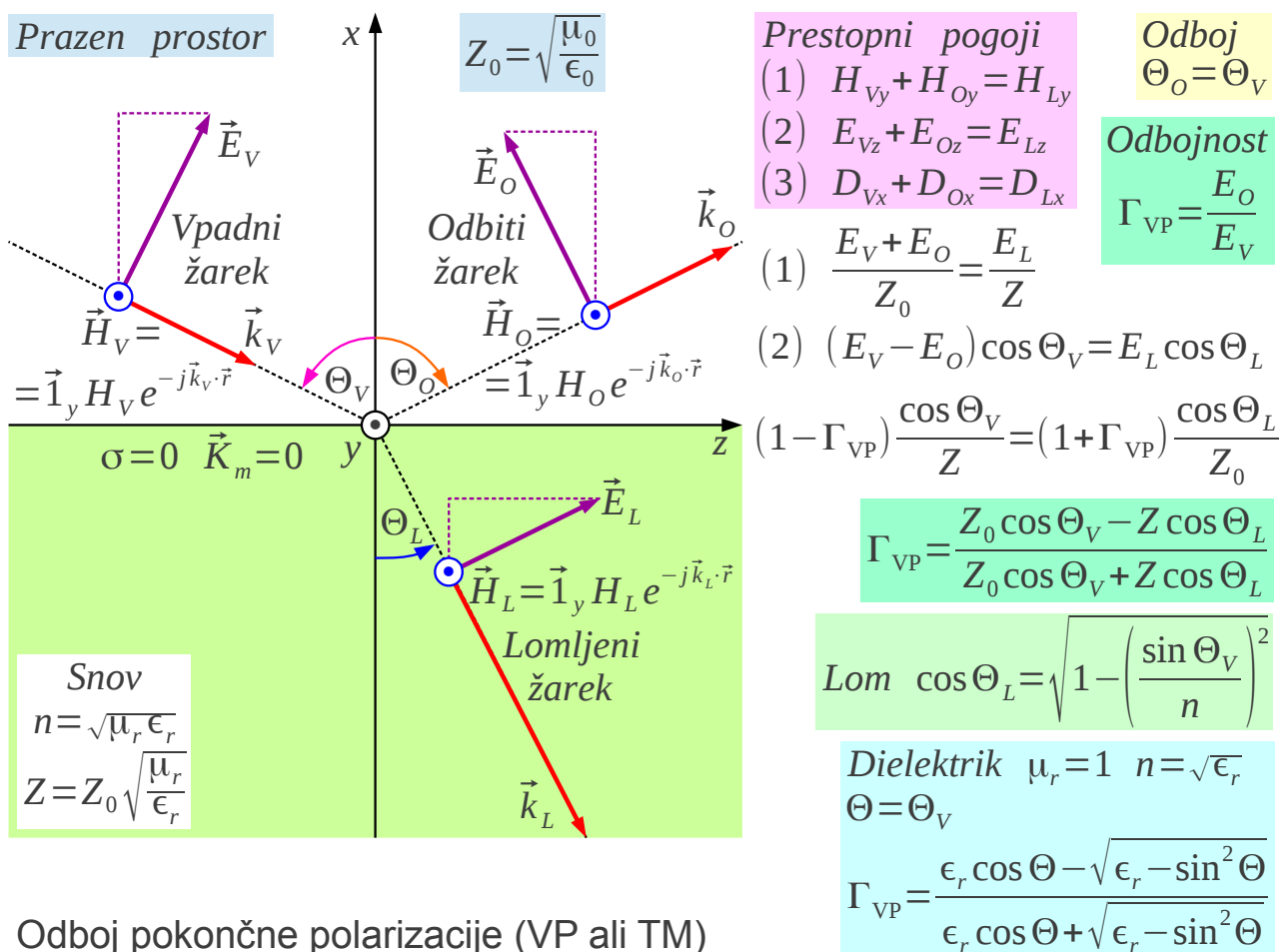


Prestopni pogoj (3) je linearno odvisen od ostalih dveh prestopnih pogojev. Prestopna pogoja (1) in (2) zapišemo z električnimi polji. Polje lomljenega žarka E_L izločimo iz enačb, da pridemo do najzanimivejše veličine, odbojnosti $\Gamma_{HP} = E_O / E_V$. Odbojnost je funkcija valovnih impedanc snovi Z in praznega prostora Z_0 ter smeri vpadnega žarka Θ_V in lomljenega žarka Θ_L . Slednjega izračunamo preko lomnega zakona.

Pokončna polarizacija je dualni zgled vodoravni polarizaciji. Vlogi električnega in magnetnega polja se zamenjata. V primeru pokončne polarizacije imajo magnetna polja $\vec{H}_i = \vec{1}_y H_i e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}}$ vpadnega, odbitega in lomljenega žarka samo vzporedno komponento s površino tal. Pripadajoča električna polja vseh treh žarkov imajo obe komponenti, vzporedno in pravokotno.

Prestopni pogoji zahtevajo (1) zvezen prestop (vzporednega)

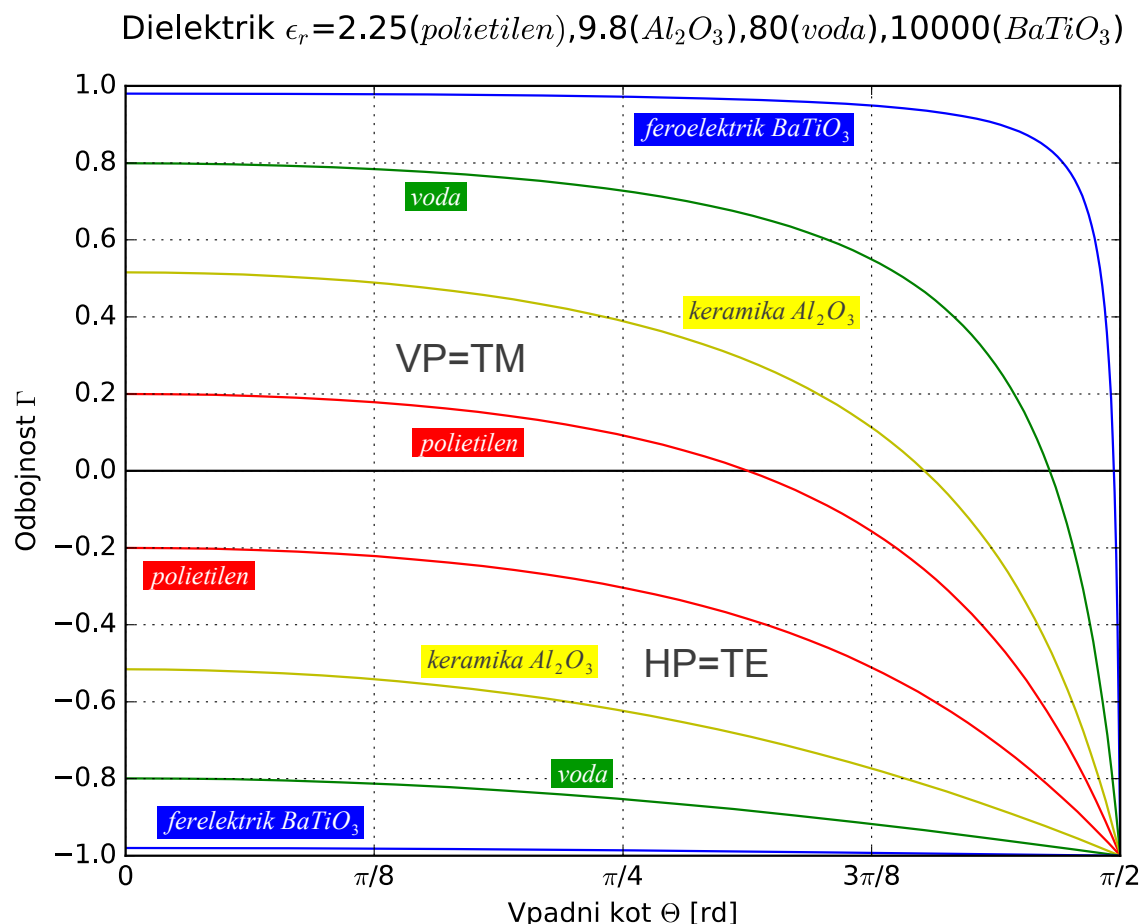
magnetnega polja H_y , (2) zvezen prestop vzporedne komponente magnetnega polja E_z v odsotnosti površinskih magnetnih tokov $\vec{K}_m = 0$ in (3) zvezen prestop pravokotne komponente gostote električnega pretoka D_x v odsotnosti električnih nabojev $\sigma = 0$ na površini:



Prestopni pogoj (3) je linearno odvisen od ostalih dveh prestopnih pogojev. Prestopna pogoja (1) in (2) zapišemo z električnimi polji. Polje lomljenega žarka E_L izločimo iz enačb, da pridemo do najzanimivejše veličine, odbojnosti $\Gamma_{vp} = E_o / E_v$. Odbojnost je funkcija valovnih impedanc snovi Z in praznega prostora Z_0 ter smeri vpadnega žarka Θ_v in lomljenega žarka Θ_L . Slednjega izračunamo preko lomnega zakona.

Zelo pomemben praktični primer je odboj elektromagnetnega valovanja na površini dielektrikov, ki nimajo feromagnetnih lastnosti $\mu = \mu_0$ oziroma $\mu_r = 1$. Lomni količnik takšnih snovi $n = \sqrt{\epsilon_r}$ popolnoma opisuje relativna dielektričnost. Izraza za odbojnosti Γ_{HP} in Γ_{VP} na površini takšne snovi se poenostavita v Fresnelovi odbojnosti za obe polarizaciji (Augustin-Jean Fresnel 1823).

Dualnost v Fresnelovih odbojnostih Γ_{HP} in Γ_{VP} ni neposredno razvidna zaradi lastnosti snovi, dielektrika $\epsilon_r \neq 1$, ki ni feromagnetik $\mu_r = 1$. Pomen Fresnelovih izrazov za Γ_{HP} in Γ_{VP} najbolje prikaže zgled odbojnosti za obe polarizaciji in vse možne vpadne kote na površino nekaj značilnih snovi:



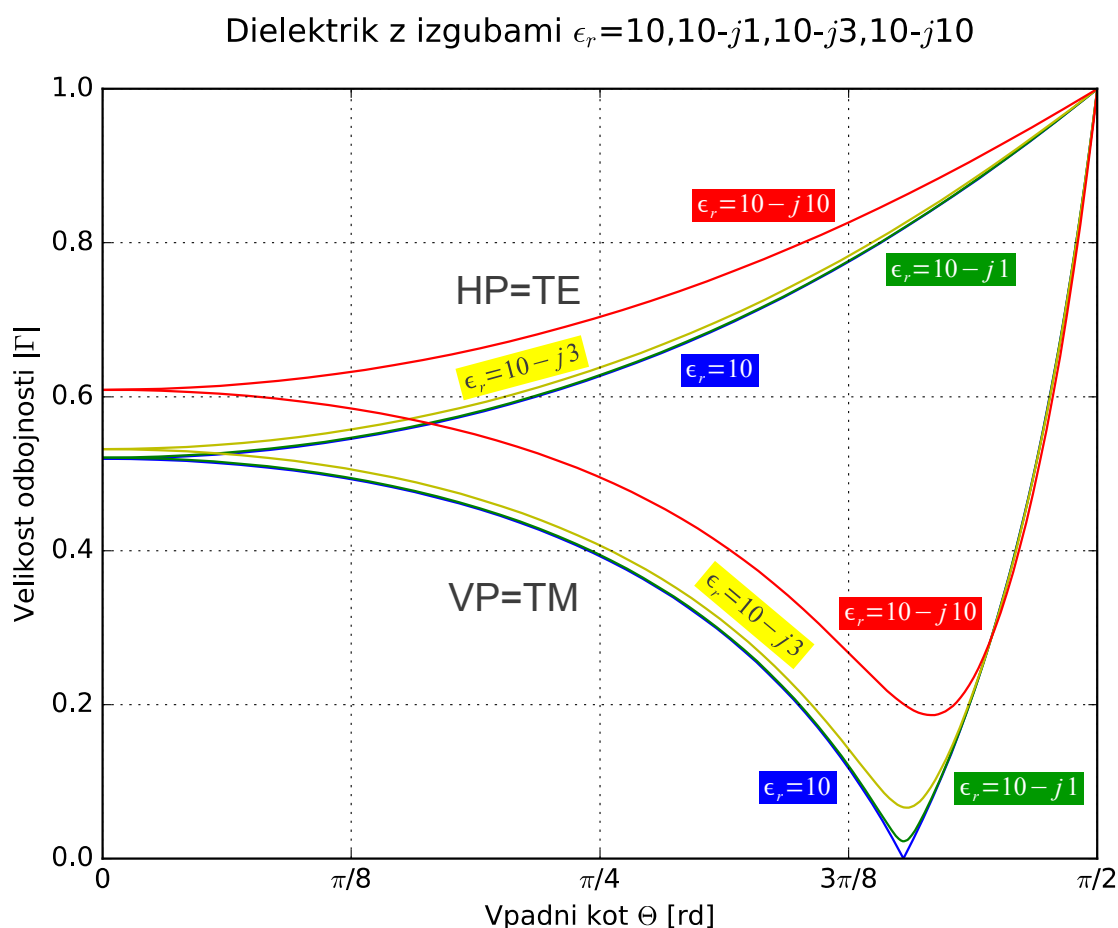
Odbojnosti brezizgubnih snovi sta realni števili v mejah $-1 \leq \Gamma_{HP} \leq 1$ in $-1 \leq \Gamma_{VP} \leq 1$. Odbojnost za vodoravno polarizacijo je pri vpadu na površino gostejše snovi $\epsilon_r > 1$ vedno negativna. Predznak odbojnosti za pokončno polarizacijo je odvisen od izbire koordinatnega sistema in zapisa smeri polja. Odbojnost za pokončno polarizacijo menja predznak pri Brewsterjevem kotu $\Gamma_{VP}(\Theta_B) = 0$ (David Brewster 1815):

$$\Theta_B = \arctan n = \arctan \sqrt{\epsilon_r}$$

Snov z izredno visoko dielektričnostjo $\epsilon_r \gg 1$, na primer feroelektrična keramika $BaTiO_3$, se za valovanje obnaša podobno kot kovina. Iz grafa sklepamo, da sta odbojnosti dobrega prevodnika vedno $\Gamma_{HP} \approx -1$ in $\Gamma_{VP} \approx 1$ ne glede na vpadni kot Θ . Razliko v predznakah,

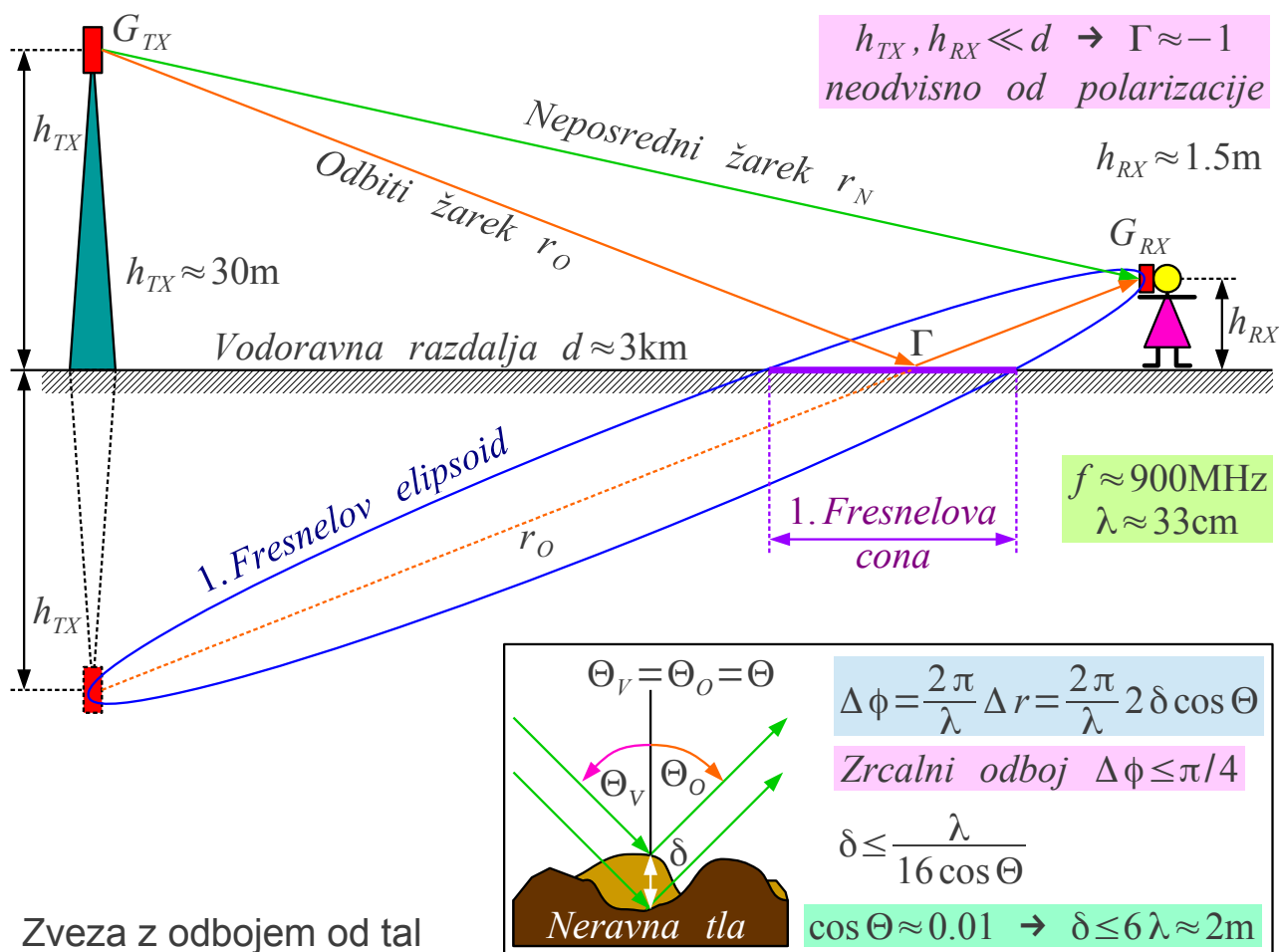
bolj točno pozitivni predznak $\Gamma_{VP} \approx 1$ hitro razloži primer pravokotnega vpada $\Theta = 0$: v izbranem koordinatnem sistemu in zapisu smeri električnega polja kažeta vektorja vpadnega in odbitega električnega polja v nasprotni smeri $\vec{I}_{EV} = -\vec{I}_{EO}$! Pri pravokotnem vpadu $\Theta = 0$ sicer ne moremo ločiti med vodoravno in pokončno polarizacijo, saj sta električni polji obeh vzporedni s površino snovi. Odbojnost pri skoraj pravokotnem vpadu $\Theta \approx 0$ na površino kovine preprosto zapišemo $\Gamma \approx -1$.

Tla se obnašajo kot slab prevodnik za nizke frekvence pod $f < 1\text{MHz}$ oziroma kot dielektrik z izgubami za visoke frekvence nad $f > 100\text{MHz}$. Relativna dielektričnost tal se giblje v razponu $10 < \epsilon_r < 80$ glede na vsebnost vode. Električne izgube v snovi opisuje kompleksna dielektričnost, ki daje kompleksen lomni količnik in kompleksni odbojnosti Γ_{HP} in Γ_{VP} :



Odvisnost kompleksnih odbojnosti $\Gamma_{HP}(\Theta)$ in $\Gamma_{VP}(\Theta)$ od vpadnega kota se kaj dosti ne razlikuje od brezizgubnega primera. Najbolj opazna razlika je pri Brewsterjevem kotu, kjer velikost odbojnosti za pokončno polarizacijo $|\Gamma_{VP}(\Theta_B)| > 0$ ne doseže ničle, pač pa le minimum.

Odboj radijskih valov od tal ima pogosto zelo velik učinek na radijsko zvezo kljub temu, da prvi Fresnelov elipsoid neposrednega žarka med oddajnikom in sprejemnikom sploh ni oviran. Oddajnik na stolpu višine $h_{TX} \approx 30\text{m}$ nad tlemi niti sprejemnik v rokah pešca $h_{RX} \approx 1.5\text{m}$ nimata dovolj usmerjenih anten, da bi lahko ločila med neposrednim in odbitim žarkom na vodoravni razdalji $d \approx 3\text{km}$:

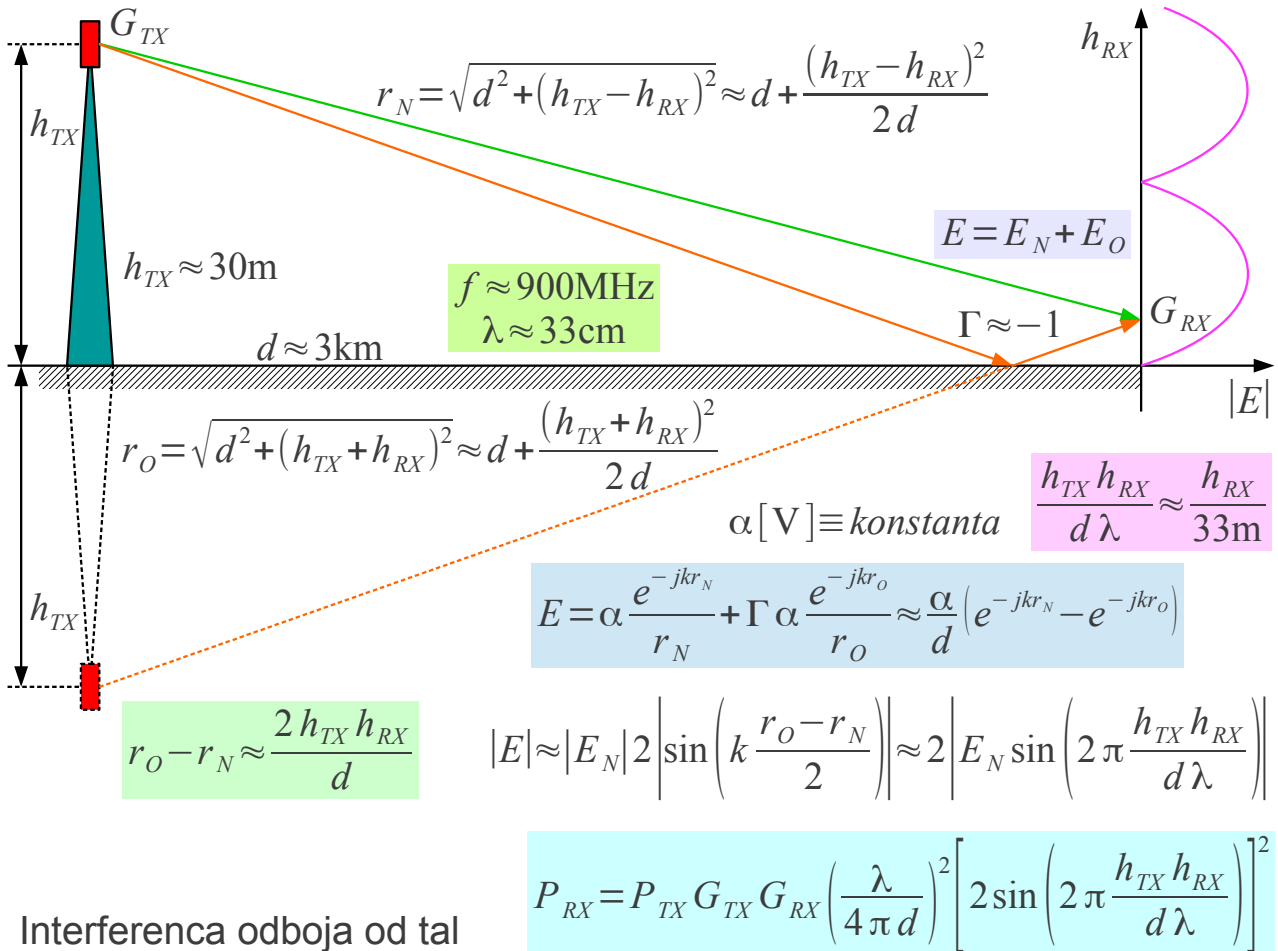


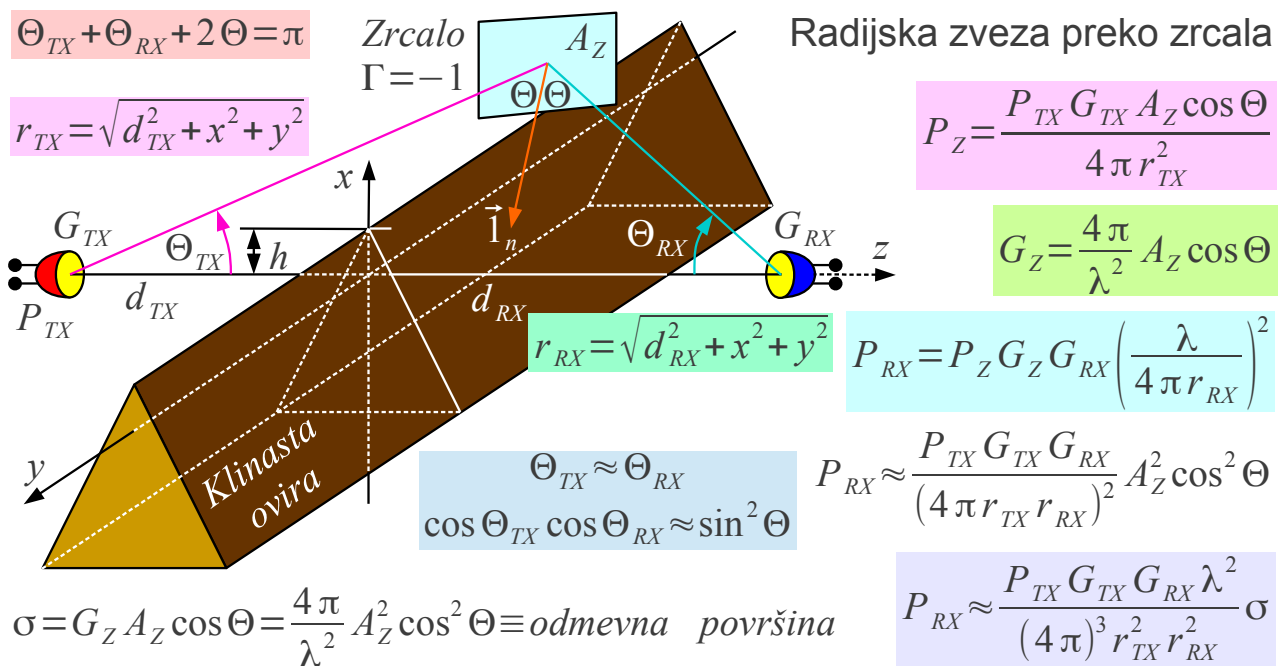
Valovanje potrebuje za odboj od tal najmanj prvo Fresnelovo cono, ki je presek prvega Fresnelovega elipsoida do zrcalne slike oddajnika in ravnine tal. V opisanem primeru $d \gg h_{TX}, h_{RX}$ je prva Fresnelova cona podolgovata in zelo velika.

Raleighjevo merilo za zrcalni odboj je hrapavost tal, ki ne presega odstopanja faze za $\Delta\phi \leq \pi/4$ (slabljenje odboja $a \approx -0.22\text{dB}$). V opisanem primeru je vpad zelo položen $\cos \Theta \approx 0.01$, kar pri valovni dolžini telefona $\lambda \approx 33\text{cm}$ pomeni hrapavost manjšo od $\delta \leq 2\text{m}$. Hrapavost ulice ali travnika je najmanj za en velikostni razred manjša, torej zrcalni odboj!

Pri zelo položnem vpadu $\cos \Theta \approx 0.01$ odbojnosti Γ_{HP} in Γ_{VP} na

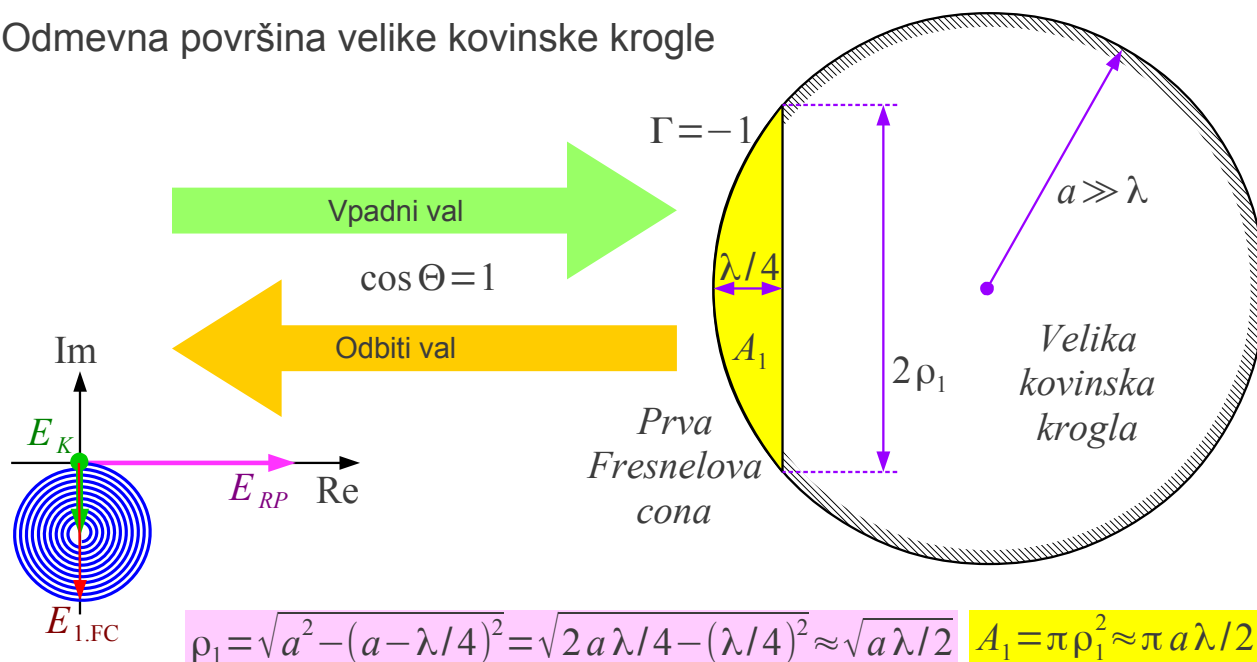
površino dielektrika z izgubami (tla pri $f \approx 900\text{MHz}$) sta obe odbojnosti približno enaki $\Gamma_{\text{HP}} \approx -1$ in $\Gamma_{\text{VP}} \approx -1$. Odboj od tal je pri položnem vpadu skoraj neodvisen od polarizacije $\Gamma_{\text{VP}} \approx \Gamma_{\text{HP}}$. Interferenca vpadnega in odbitega žarka daje vzorec z globokimi minimumi in maksimumi, ki dosegajo dvakratno vrednost polja neposrednega žarka v neoviranem prostoru:





| Primerjava | Smer | Odmevna površina | Pogoji uporabe |
|-------------|--------------------------------|---|-------------------------------|
| Uklanjalnik | $\Theta_{TX} \neq \Theta_{RX}$ | $\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_U^2 \cos \Theta_{TX} \cos \Theta_{RX} / \pi^2$ | $x, y \ll d_{TX}, d_{RX}$ |
| Zrcalo | $\Theta_V = \Theta_O = \Theta$ | $\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_Z^2 \cos^2 \Theta$ | $x, y \approx d_{TX}, d_{RX}$ |

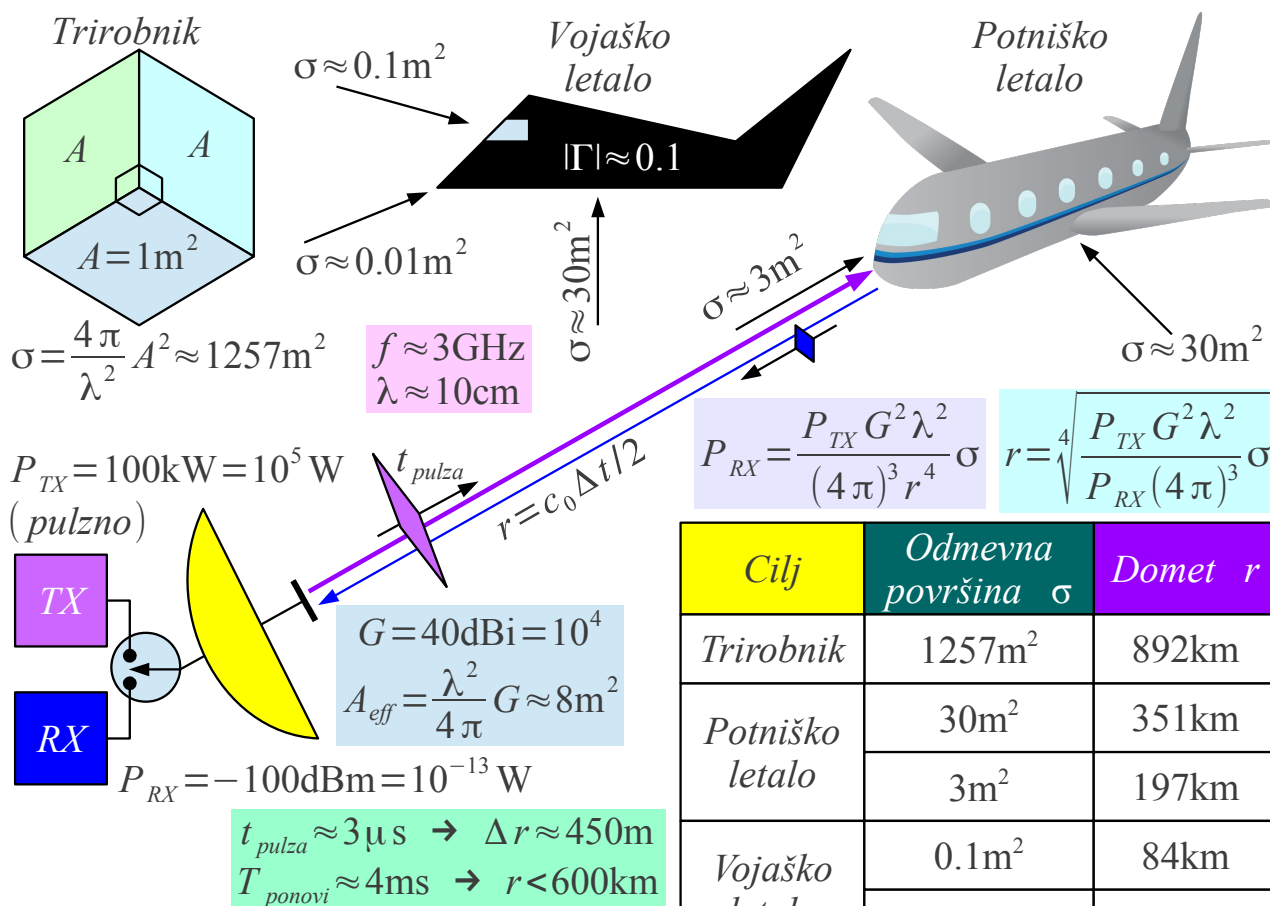
Odmevna površina velike kovinske krogle



Ravna plošča $A_1 \rightarrow \sigma_{RP} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_1^2 \approx \frac{4\pi}{\lambda^2} (\pi a\lambda/2)^2 = \pi^3 a^2$

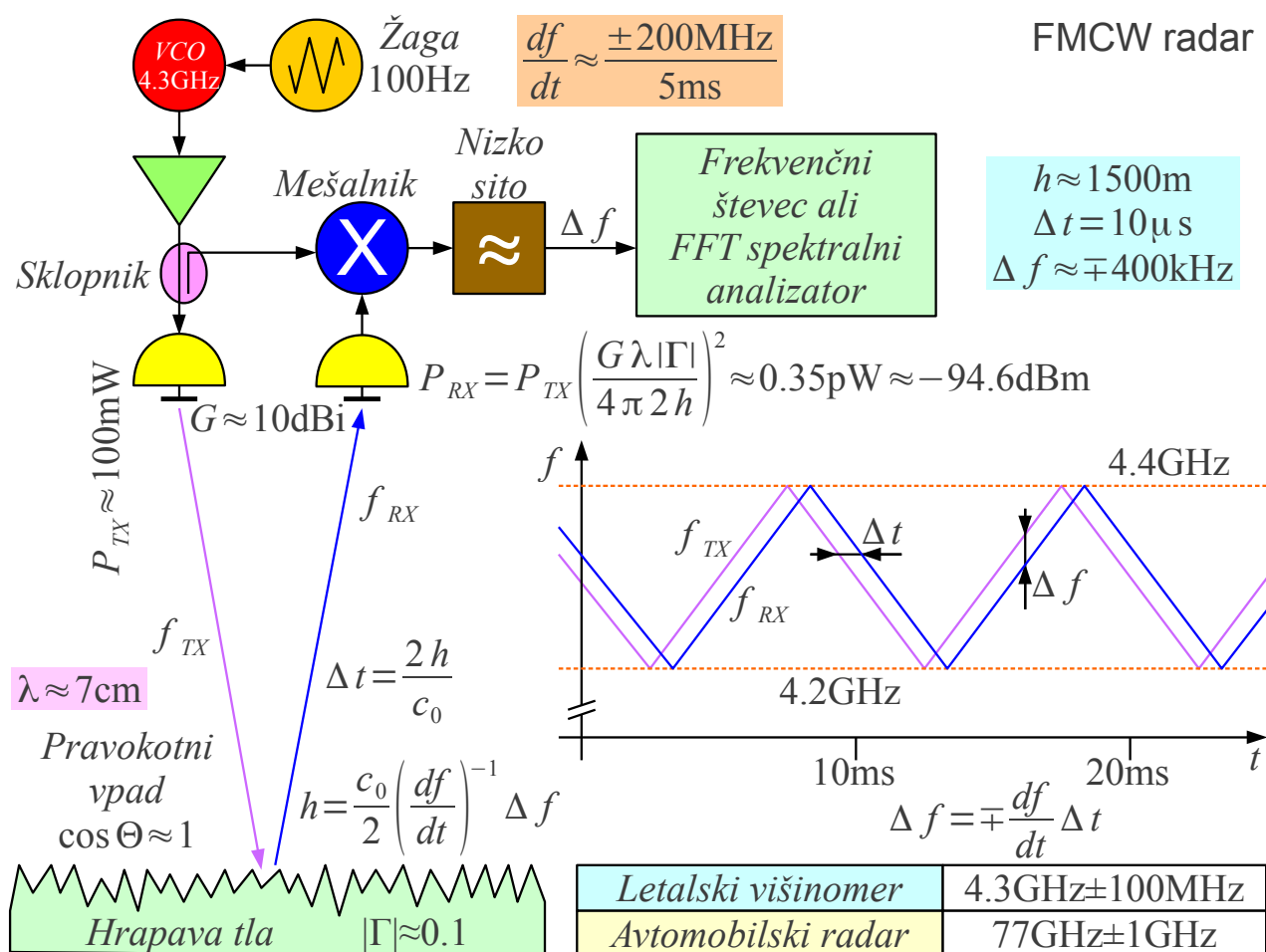
Prva Fresnelova cona $A_1 \rightarrow E_{1.FC} = -j \left(\frac{2}{\pi} \right) E_{RP} \rightarrow \sigma_{1.FC} = \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \sigma_{RP} \approx 4\pi a^2$

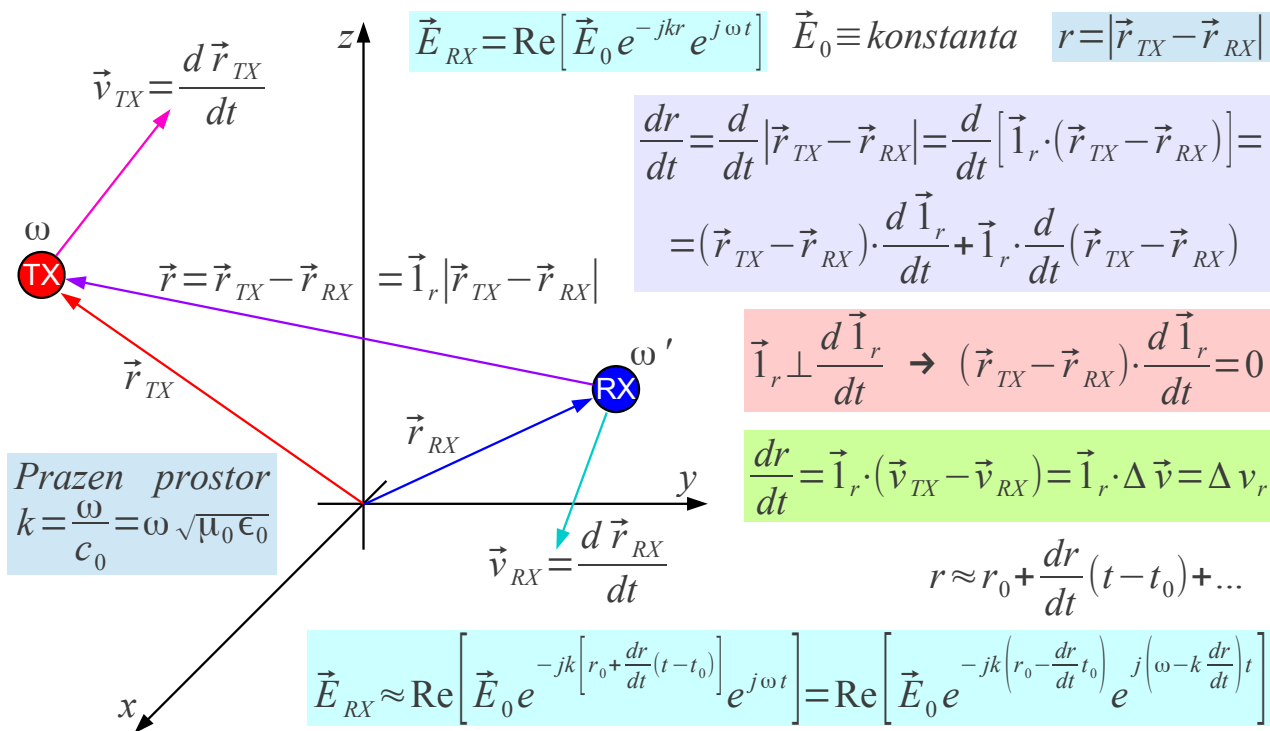
Velika kovinska krogla $\rightarrow E_K = \frac{1}{2} E_{1.FC} \rightarrow \sigma_K = \frac{1}{4} \sigma_{1.FC} \approx \pi a^2$



Domet letalskega radarja

| <i>Cilj</i> | <i>Odmevna površina σ</i> | <i>Domet r</i> |
|------------------------|---|-----------------------------|
| <i>Trirobnik</i> | 1257m ² | 892km |
| <i>Potniško letalo</i> | 30m ² | 351km |
| | 3m ² | 197km |
| <i>Vojaško letalo</i> | 0.1m ² | 84km |
| | 0.01m ² | 47km |



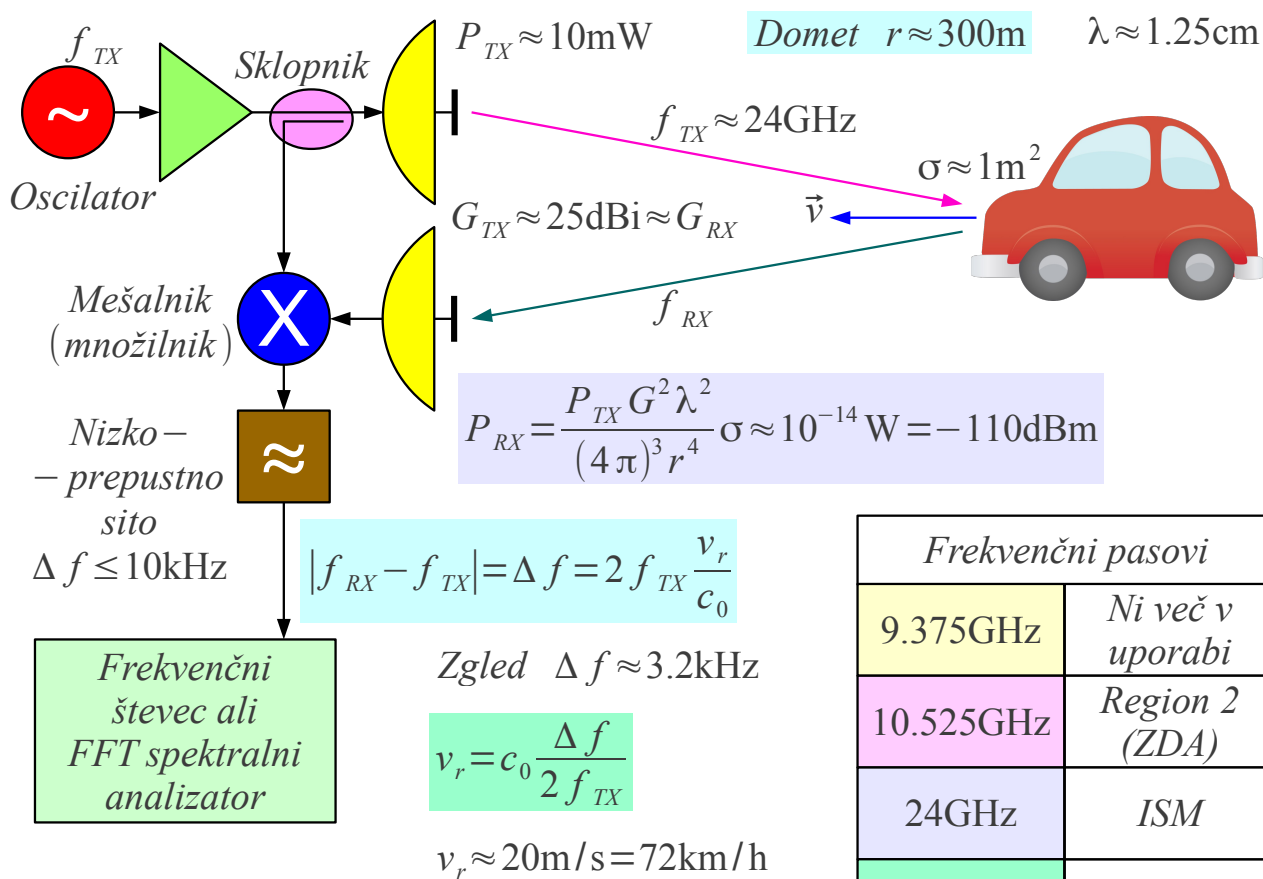


Christian A. Doppler 1842

$$\omega' \approx \omega - k \frac{dr}{dt} = \omega - \frac{\omega}{c_0} \frac{dr}{dt}$$

Dopplerjev pomik

$$\Delta \omega = \omega' - \omega \approx -\frac{\omega}{c_0} \frac{dr}{dt} = -\frac{\omega}{c_0} \frac{(\vec{r}_{TX} - \vec{r}_{RX}) \cdot (\vec{v}_{TX} - \vec{v}_{RX})}{|\vec{r}_{TX} - \vec{r}_{RX}|}$$



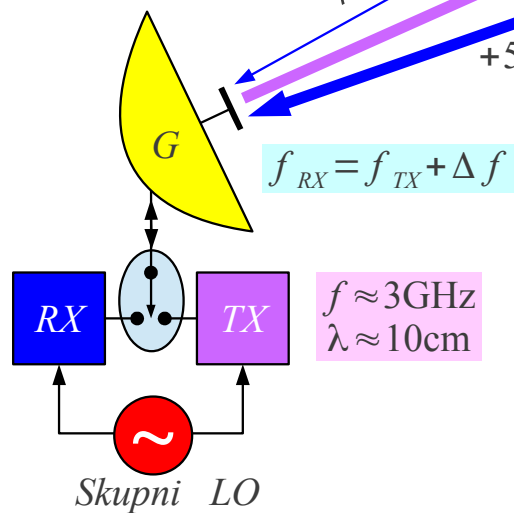
| Frekvenčni pasovi | |
|-------------------|------------------|
| 9.375GHz | Ni več v uporabi |
| 10.525GHz | Region 2 (ZDA) |
| 24GHz | ISM |
| 34GHz | Licenciran |

CW Dopplerjev radar

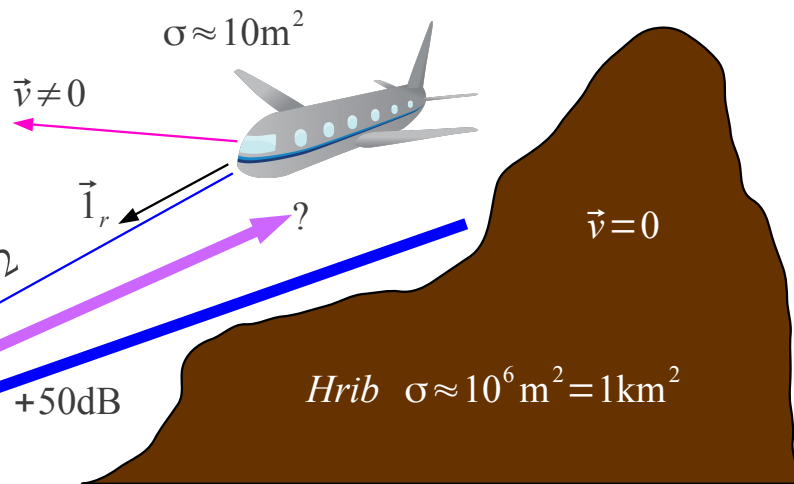
$$t_{\text{pulza}} \approx 3 \mu\text{s} \rightarrow \Delta r \approx 450\text{m}$$

$$T_{\text{ponovi}} \approx 4\text{ms} \rightarrow r < 600\text{km}$$

**Zahtevna
primerjava
faze zaporednih
odmevov**
 $\Delta f \ll 1/t_p$



Pulzno-Dopplerjev RADAR



$$\Delta f = 2 \frac{f_{TX}}{c_0} (\vec{v} \cdot \vec{l}_r) \equiv \text{Dopplerjev pomik}$$

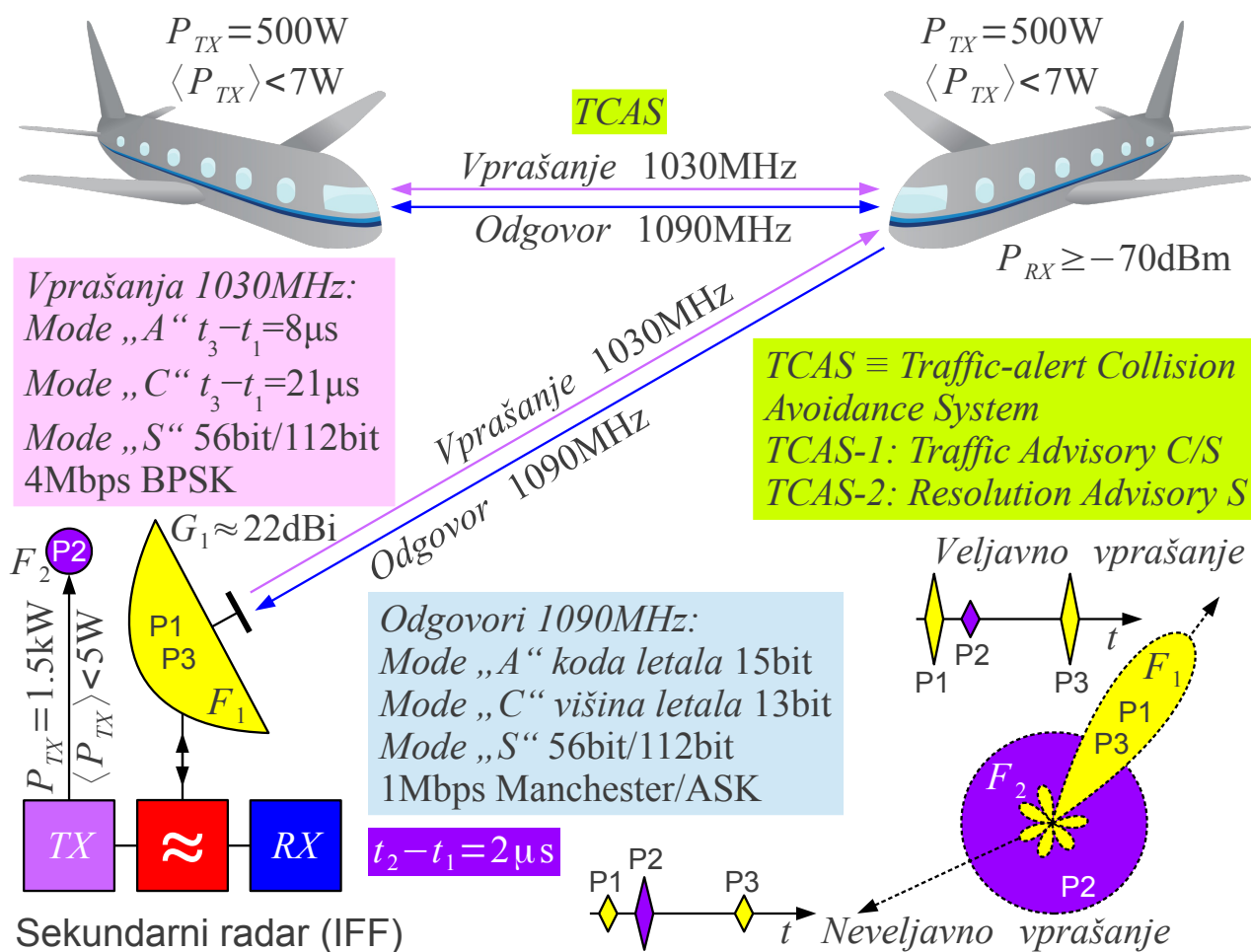
**Razločevanje
premičnih
ciljev MTI**

Letalo $v \approx 250\text{m/s} = 900\text{km/h}$
 $\rightarrow \Delta f \leq 5\text{kHz}$

Hrib $v \approx 0 \rightarrow \Delta f \approx 0$

Radar ne vidi:

- (1) Počasnih ciljev: baloni, jadralci...
- (2) Tangencialnih ciljev: $\vec{v} \perp \vec{l}_r$



* * * * *