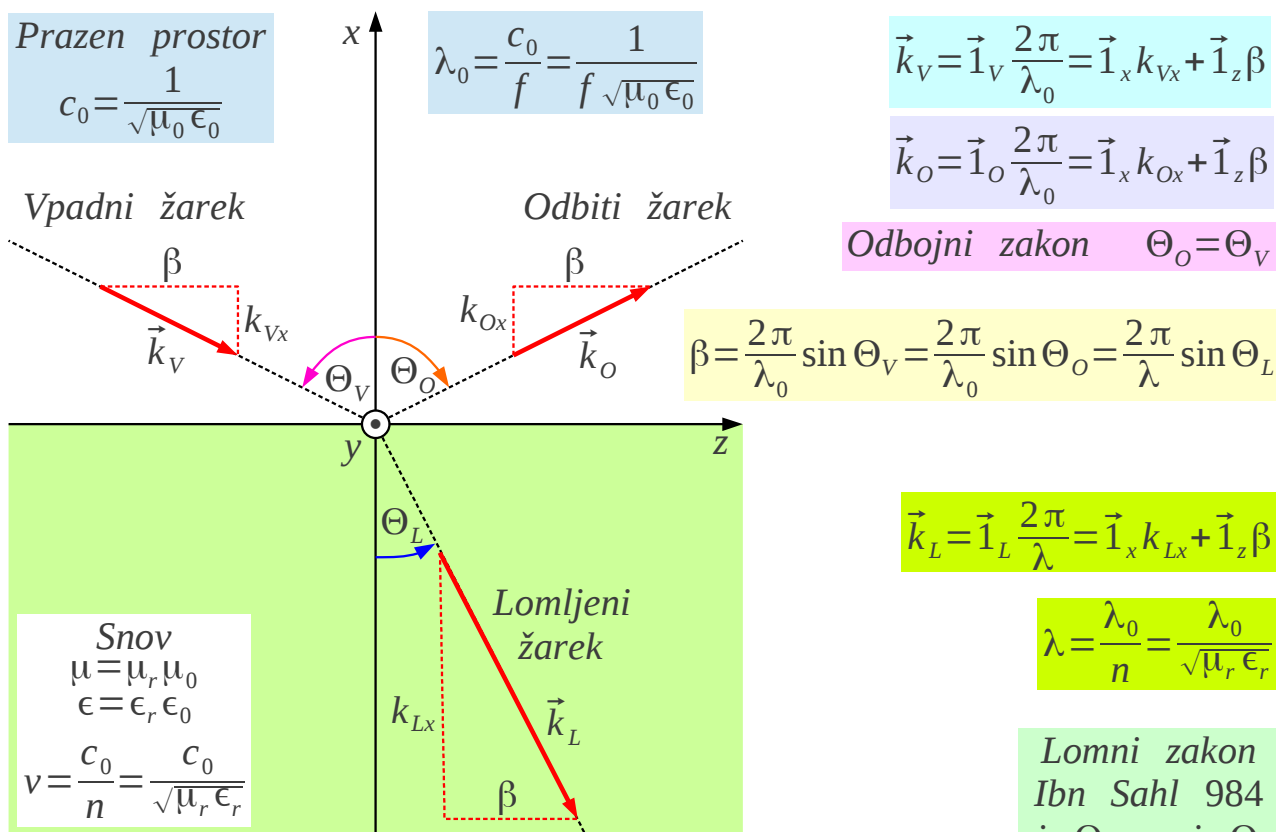


## 15. Odboj valovanja

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  $\epsilon_r$ . 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. Vz dolžno 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 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.

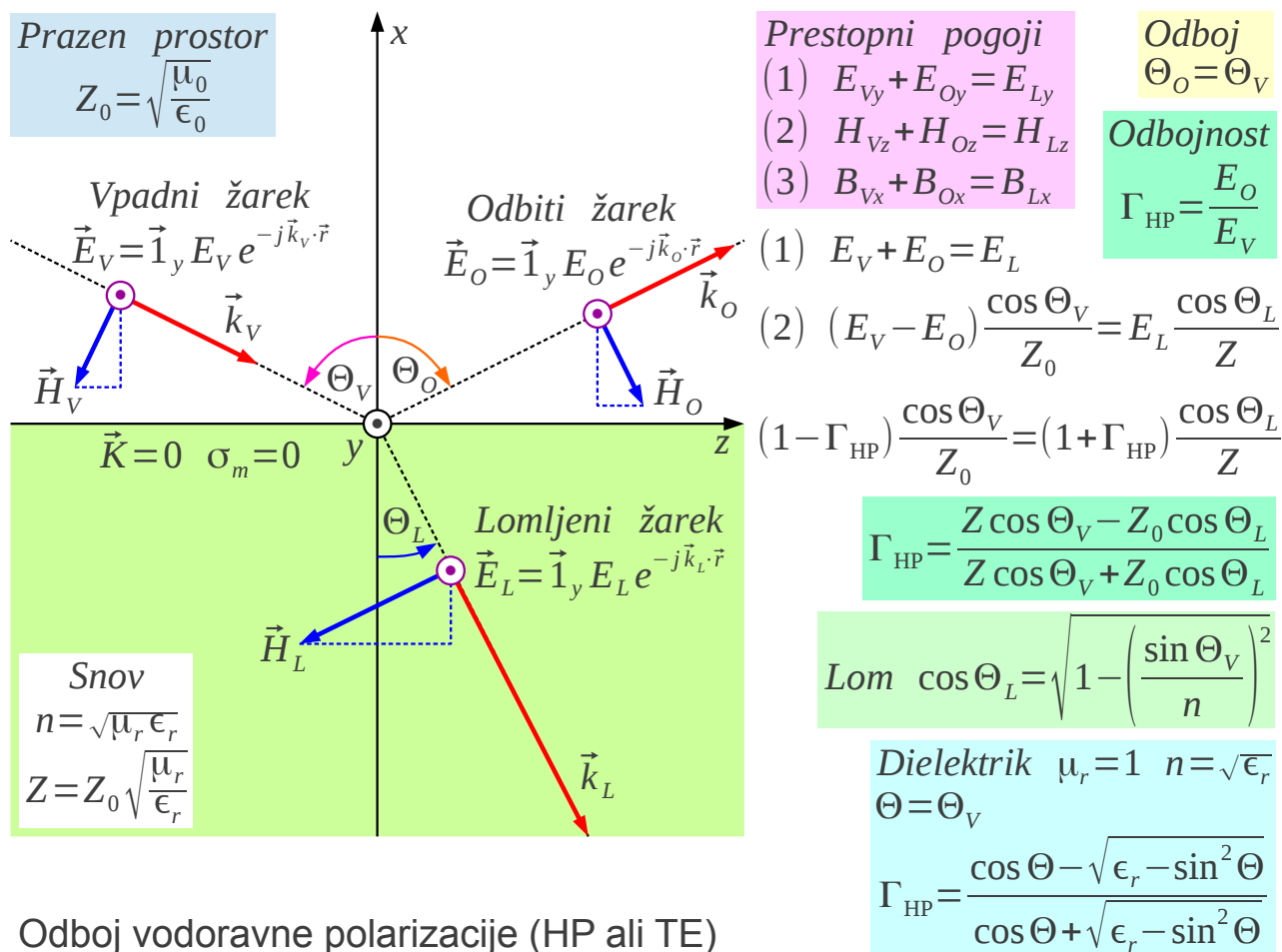
Delitev moči vpadnega žarka na odbiti žarek in lomljeni žarek ter medsebojne faze vseh treh žarkov so odvisne od vrste valovanja. Pri prečnih valovanjih so razmerja moči in medsebojne faze dodatno odvisne od polarizacije vpadnega valovanja. Étienne-Louis Malus je leta 1809 prav iz odvisnosti jakosti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

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

Radijski valovi se najpogosteje odbijajo od vodoravne površine tal. TE v primeru odboja od tal pomeni vodoravno premo polarizacijo ali HP. TM 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.

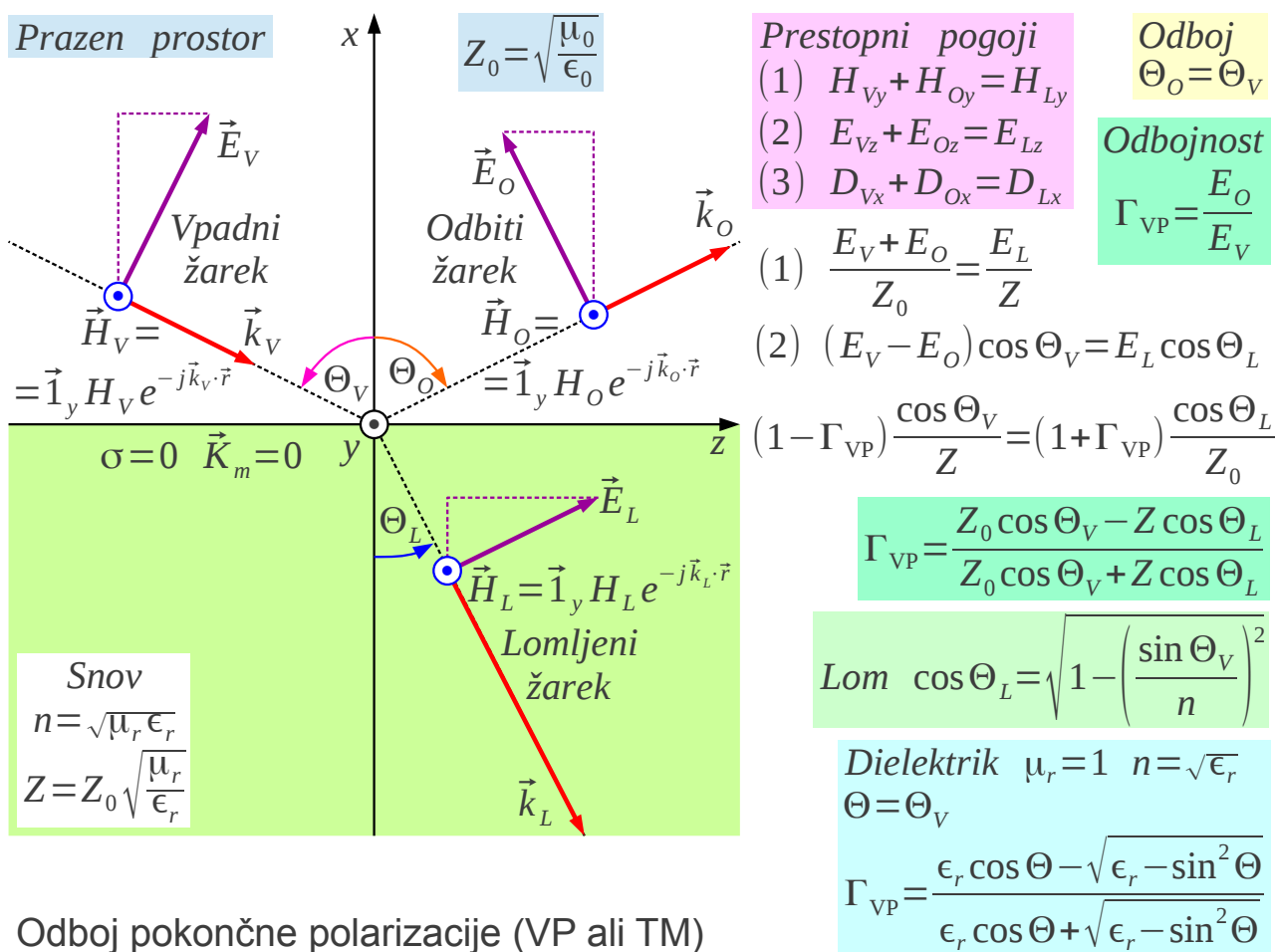
V primeru vodoravne polarizacije ima električno polje  $\vec{E} = \vec{1}_y E e^{-j\vec{k} \cdot \vec{r}}$  vpadnega, odbitega in lomljenega žarka samo vzporedno komponento s površino tal. Pripadajoče magnetno polje vseh treh žarkov ima obe komponenti, vzporedno in pravokotno. Prestopni pogoji zahtevajo (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:

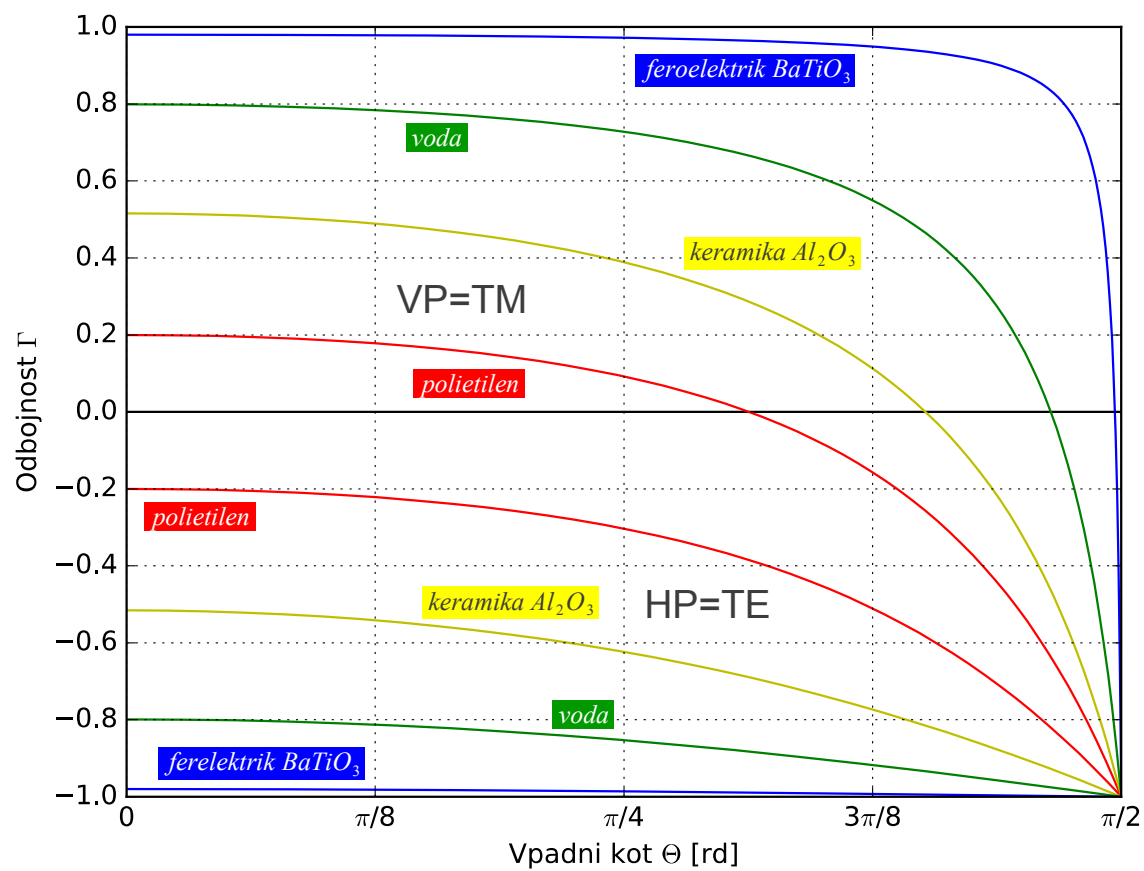


Odboj vodoravne polarizacije (HP ali TE)

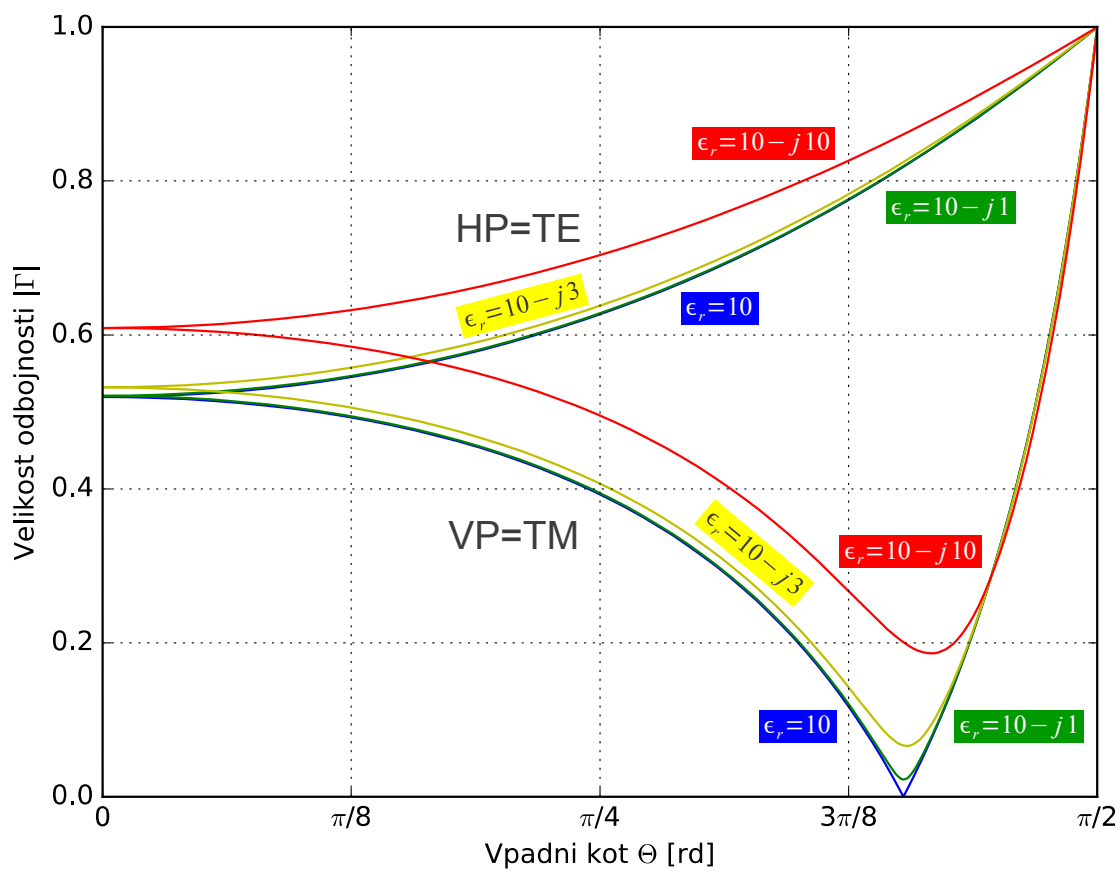
Prestopni pogoj (3) je linearno odvisen od ostalih dveh prestopnih pogojev. Prestopna pogoja (1) in (2) zapišemo z električnimi polji in izločimo polje lomljenega žarka  $E_L$ , da pridemo do najzanimivejše veličine, odbojnosti  $\Gamma_{HP} = E_O / E_V$ . Odbojnost je funkcija valovnih impedanc snovi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

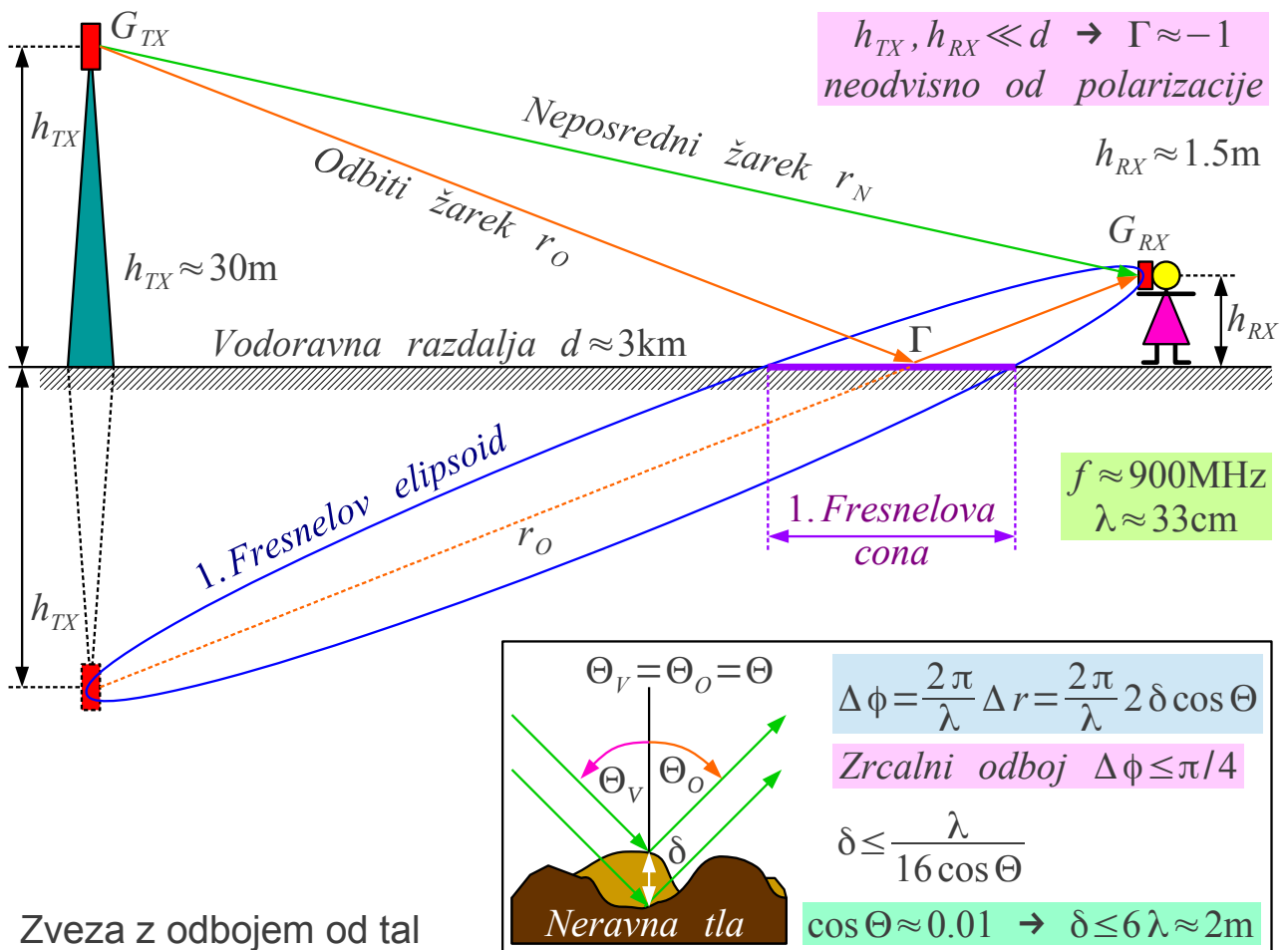


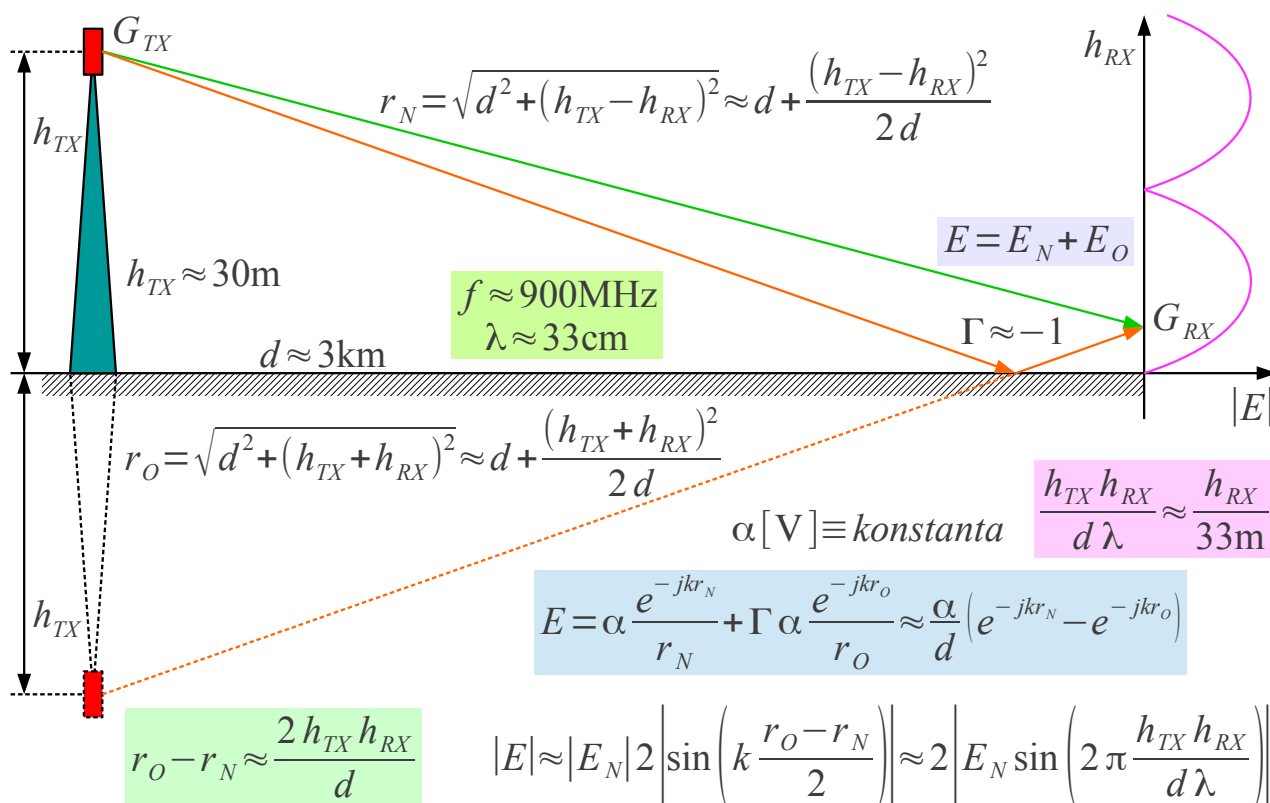
Dielektrik  $\epsilon_r=2.25$ (polietilen),  $9.8$ ( $Al_2O_3$ ),  $80$ (voda),  $10000$ ( $BaTiO_3$ )



Dielektrik z izgubami  $\epsilon_r = 10, 10-j1, 10-j3, 10-j10$



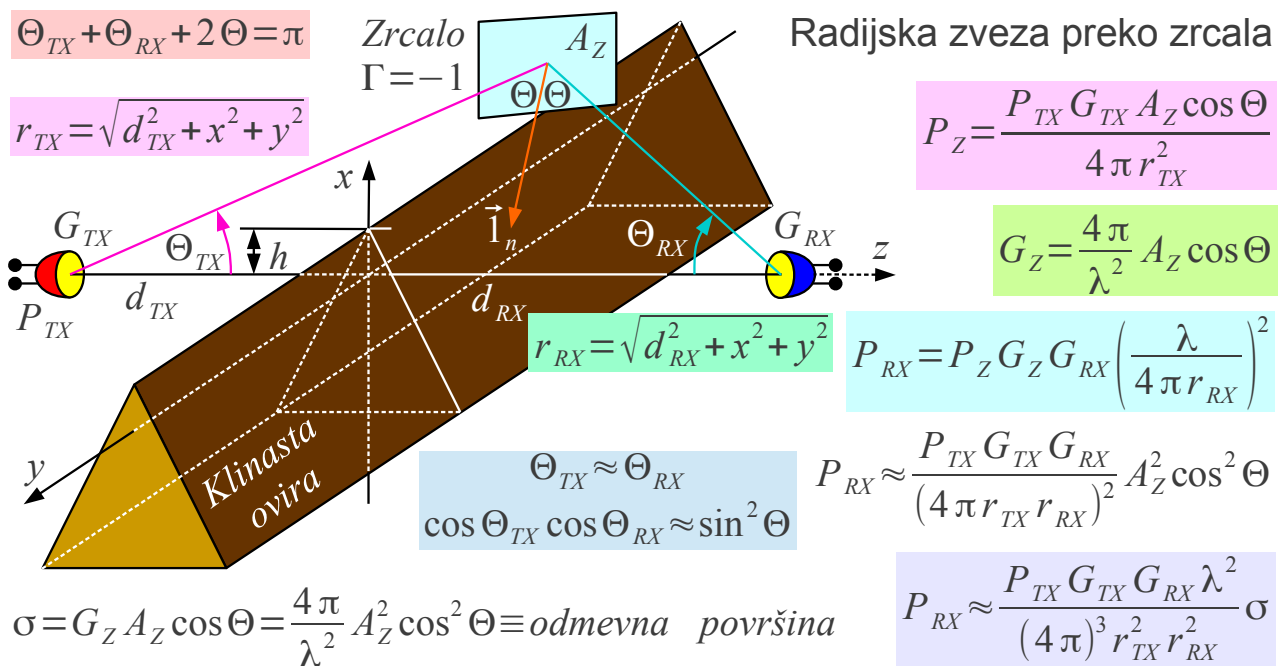




Interferenca odboja od tal

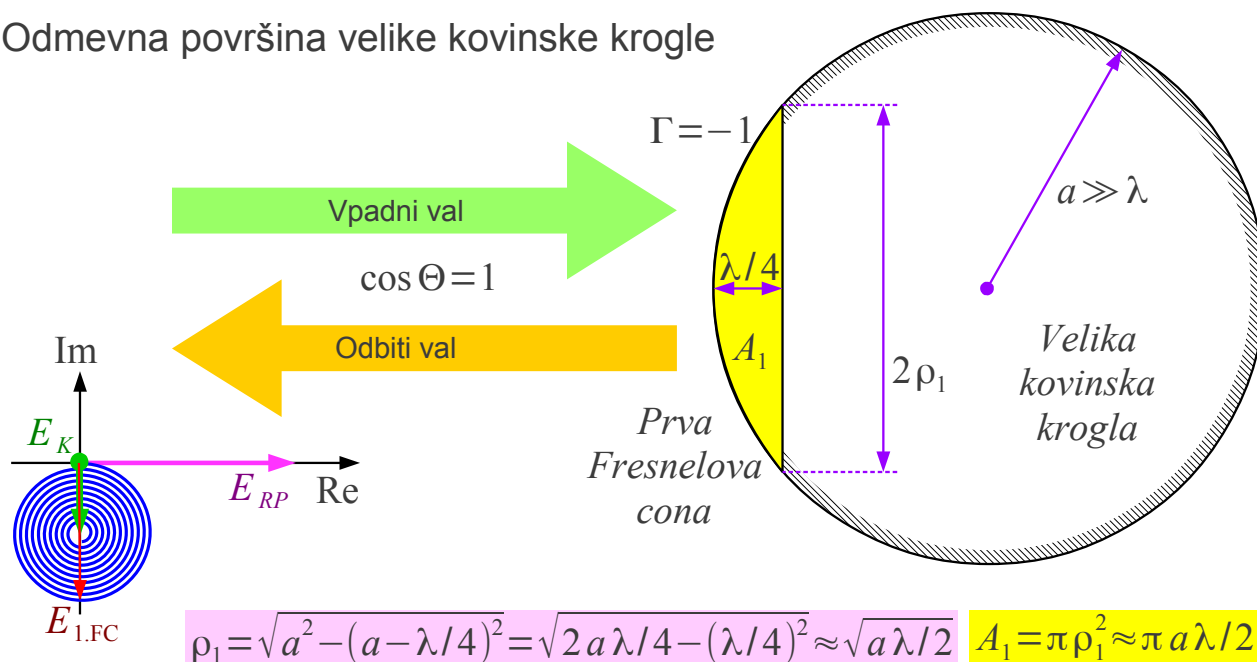
$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left( \frac{\lambda}{4 \pi d} \right)^2 \left[ 2 \sin \left( 2 \pi \frac{h_{TX} h_{RX}}{d \lambda} \right) \right]^2$$





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	$\Theta_V = \Theta_O = \Theta$	$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_Z^2 \cos^2 \Theta$	$x, y \approx d_{TX}, d_{RX}$

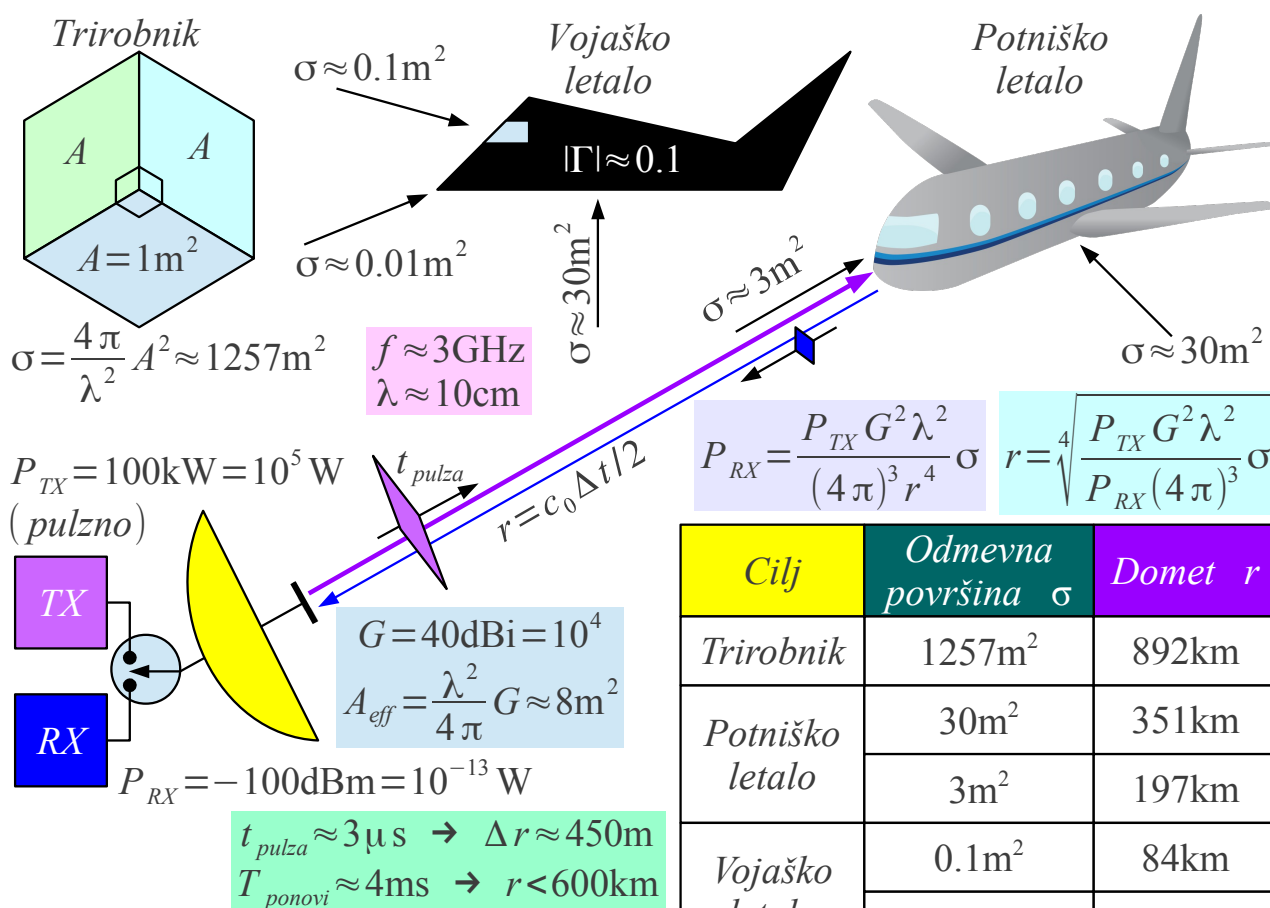
## Odmevna površina velike kovinske krogle



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

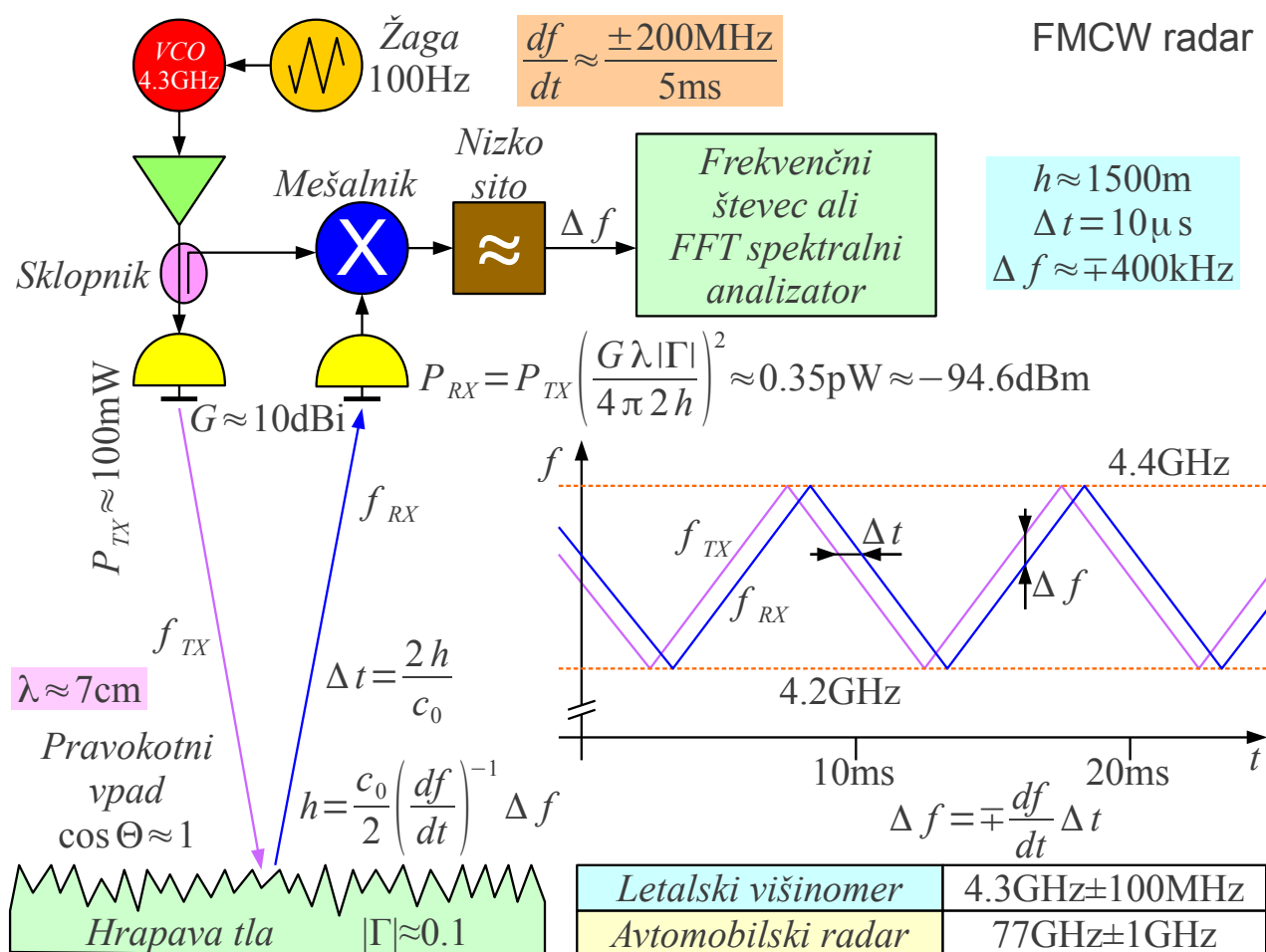
Prva Fresnelova cona  $A_1 \rightarrow E_{1.FC} = -j \left( \frac{2}{\pi} \right) E_{RP} \rightarrow \sigma_{1.FC} = \left( \frac{2}{\pi} \right)^2 \sigma_{RP} \approx 4\pi a^2$

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

Cilj	Odmevna površina $\sigma$	Domet $r$
Trirobnik	$1257 \text{m}^2$	892km
Potniško letalo	$30 \text{m}^2$	351km
	$3 \text{m}^2$	197km
Vojaško letalo	$0.1 \text{m}^2$	84km
	$0.01 \text{m}^2$	47km



$\vec{E}_{RX} = \text{Re} \left[ \vec{E}_0 e^{-jkr} e^{j\omega t} \right] \quad \vec{E}_0 \equiv \text{konstanta} \quad r = |\vec{r}_{TX} - \vec{r}_{RX}|$

$\frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt} |\vec{r}_{TX} - \vec{r}_{RX}| = \frac{d}{dt} [\vec{l}_r \cdot (\vec{r}_{TX} - \vec{r}_{RX})] =$   
 $= (\vec{r}_{TX} - \vec{r}_{RX}) \cdot \frac{d\vec{l}_r}{dt} + \vec{l}_r \cdot \frac{d(\vec{r}_{TX} - \vec{r}_{RX})}{dt}$

$\vec{l}_r \perp \frac{d\vec{l}_r}{dt} \rightarrow (\vec{r}_{TX} - \vec{r}_{RX}) \cdot \frac{d\vec{l}_r}{dt} = 0$

$\frac{dr}{dt} = \vec{l}_r \cdot (\vec{v}_{TX} - \vec{v}_{RX}) = \vec{l}_r \cdot \Delta \vec{v} = \Delta v_r$

$r \approx r_0 + \frac{dr}{dt} (t - t_0) + \dots$

$\vec{E}_{RX} \approx \text{Re} \left[ \vec{E}_0 e^{-jk \left[ r_0 + \frac{dr}{dt} (t - t_0) \right]} e^{j\omega t} \right] = \text{Re} \left[ \vec{E}_0 e^{-jk \left( r_0 - \frac{dr}{dt} t_0 \right)} e^{j \left( \omega - k \frac{dr}{dt} \right) t} \right]$

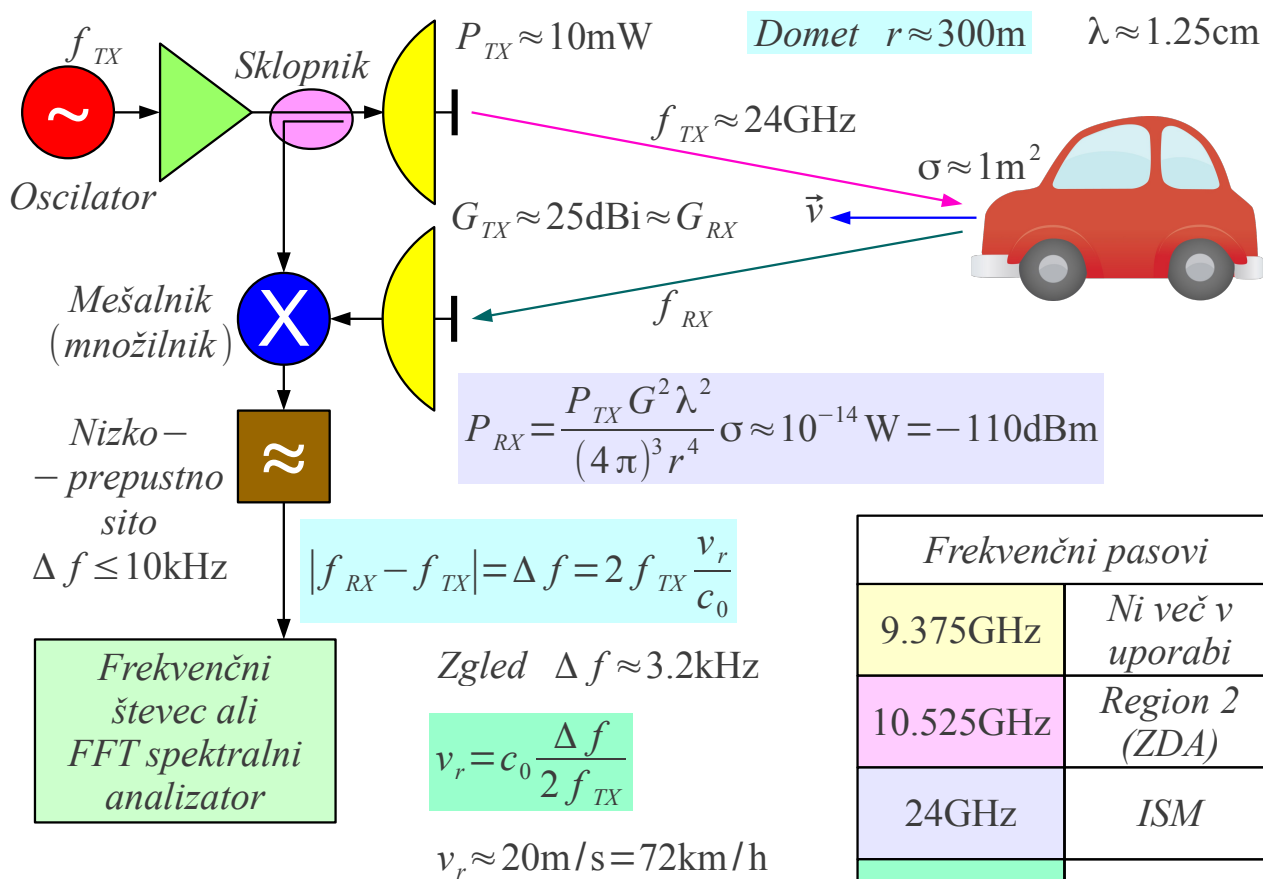
$\omega' \approx \omega - k \frac{dr}{dt} = \omega - \frac{\omega}{c_0} \frac{dr}{dt}$

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

**Dopplerjev pomik**

*Christian A. Doppler 1842*

*Prazen prostor*  
 $k = \frac{\omega}{c_0} = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$



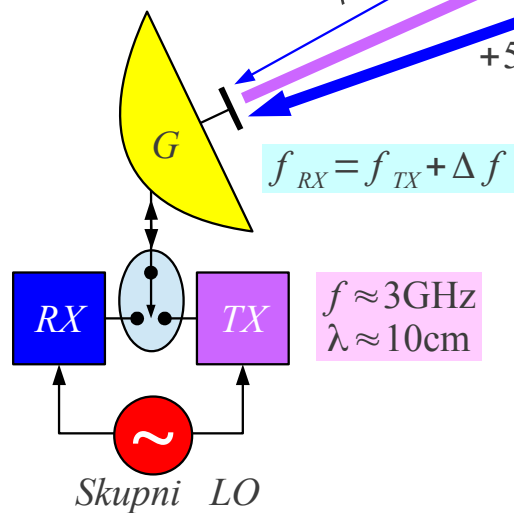
Frekvenčni pasovi	
9.375GHz	Ni več v uporabi
10.525GHz	Region 2 (ZDA)
24GHz	ISM
34GHz	Licenciran

CW Dopplerjev radar

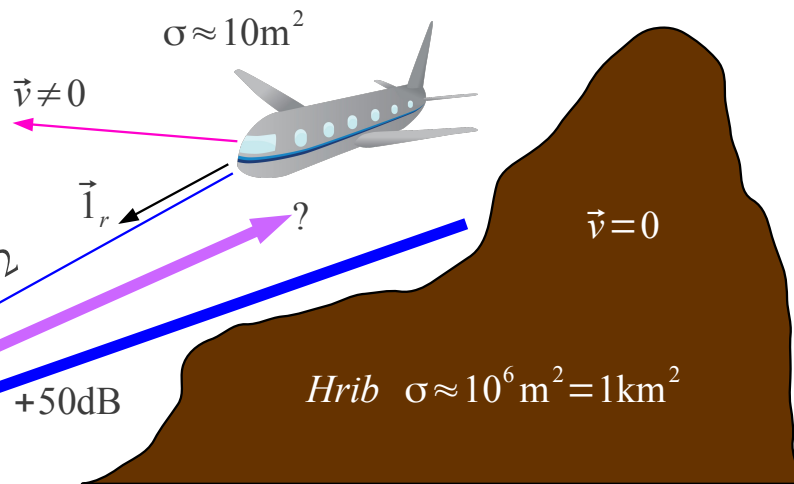
$$t_{\text{pulza}} \approx 3 \mu\text{s} \rightarrow \Delta r \approx 450\text{m}$$

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

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



Pulzno-Dopplerjev RADAR



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

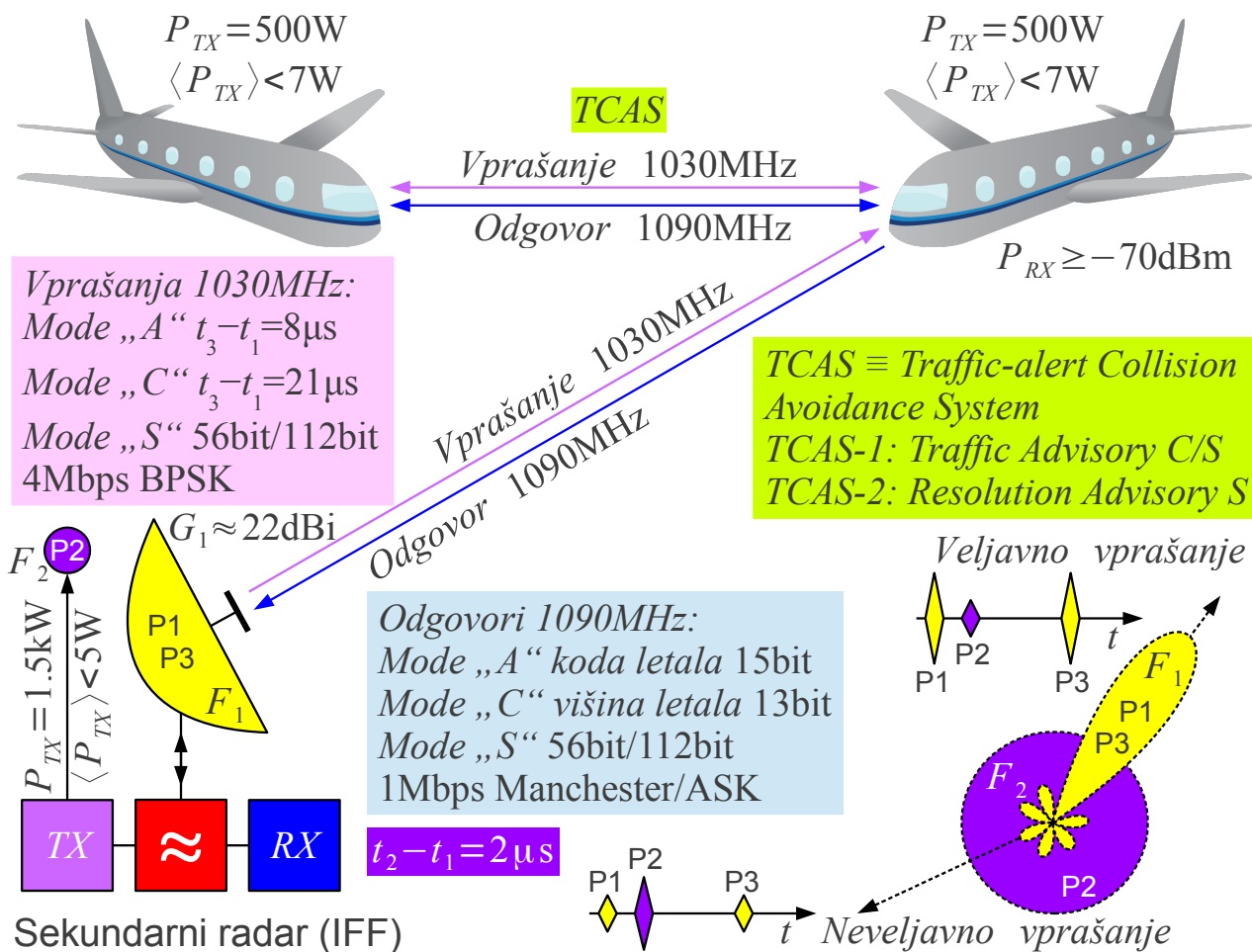
**Razločevanje  
premičnih  
ciljev MTI**

**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:  $\vec{v} \perp \vec{i}_r$



\* \* \* \* \*