

4. Brezvrvična zveza

Brezvrvično zvezo skušamo izdelati tako, da sta oba oddajnik $d_{TX} \ll r$ in sprejemnik $d_{RX} \ll r$ dosti manjša od razdalje, ki jo skušamo premostiti. V nasprotnem primeru bi bila kakršnakoli vrstica zagotovo cenejša rešitev. V brezvrvični zvezi lahko uporabimo elektromagnetne pojave. Največji domet in največjo zmogljivost brezvrvične zveze omogoča uporaba elektromagnetnega sevanja.

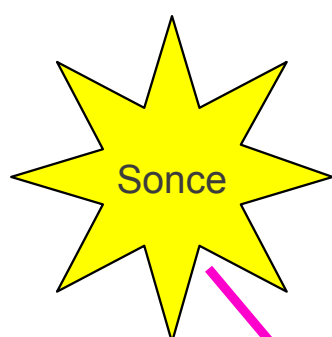
Elektromagnetno sevanje prevladuje na velikih razdaljah $r \gg 1/k = 2\pi/\lambda$ od oddajnika. Jakost sevanega električnega polja $|\vec{E}(\vec{r})| = \alpha e^{-jkr}/r$ upada obratno sorazmerno razdalji od oddajnika. Prav tako upada jakost sevanega magnetnega polja $|\vec{H}(\vec{r})| = \alpha' e^{-jkr}/r$ obratno sorazmerno razdalji od oddajnika. Oba električno in magnetno polje vsebujeta zakasnitev e^{-jkr} končne hitrosti svetlobe.

Sevano električno in magnetno polje sta med sabo pravokotna vektorja, sofazna in v točnem razmerju $|\vec{E}(\vec{r})|/|\vec{H}(\vec{r})| = Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ v praznem prostoru. Poyntingov vektor $\vec{S}(\vec{r}) = \vec{1}_r \alpha' \alpha'' / r^2$ je popolnoma realen, je pravokoten na oba električno in magnetno polje, kaže proč od oddajnika v smeri potovanja moči in upada s kvadratom razdalje.

Sevana moč $P = \oint \vec{S} \cdot \vec{1}_r dA$ se v praznem prostoru nikjer ne izgublja. Vrednost integrala po katerikoli sklenjeni ploskvi, ki zajema oddajnik, je vedno konstantna. Vektor gostote pretoka moči $\vec{S}(\vec{r}) = \vec{1}_r \eta P_{TX} / (4\pi r^2)$ preprosto dobimo iz moči oddajnika, ki se porazdeli po površini krogle z oddajnikom v središču ob upoštevanju električnega izkoristka neidealnega oddajnika (žarnice):

$|\vec{E}| = 61 \text{ V}_{\text{eff}}/\text{m}$ od naravnega sevanja Sonca se smatra povsem varna in neškodljiva meja za neionizirajoče sevanje.

Fotoni neionizirajočega sevanja imajo dovolj majhno energijo $W = h f$, kjer je $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ Planckova konstanta, da je sproščena toplota edini učinek elektromagnetnega sevanja. Praktično to pomeni, da so vidna svetloba in vsa elektromagnetna sevanja z valovno dolžino večjo od $\lambda > 400 \text{ nm}$ oziroma s frekvenco nižjo od $f < 750 \text{ THz}$ neionizirajoča sevanja. Zakonodajalec je predpisal mejo neionizirajočih sevanj z električno poljsko jakostjo $|\vec{E}_{\text{eff}}| \leq 6 \text{ V}_{\text{eff}}/\text{m}$, kar je desetkrat nižja poljska jakost od varne meje oziroma deset-tisočkrat nižja gostota pretoka moči $|\vec{S}| \approx 0.1 \text{ W}/\text{m}^2$ od sončne svetlobe:



Prazen prostor
 $\mu_0 \quad \epsilon_0$
brez izgub!

Učinek sevanja	Gostota pretoka moči $ \vec{S} $		Jakost polja $ \vec{E}_{\text{eff}} $
Sončna svetloba	1 kW/m ²	100 mW/cm ²	614 V _{eff} /m
Zaznaven učinek	100 W/m ²	10 mW/cm ²	194 V _{eff} /m
Varna meja	10 W/m ²	1 mW/cm ²	61 V _{eff} /m
Zakonska omejitev	0.1 W/m ²	10 μW/cm ²	6 V _{eff} /m

$$|\vec{E}| = \sqrt{2 Z_0} |\vec{S}|$$

$$|\vec{E}_{\text{eff}}| = \sqrt{Z_0} |\vec{S}|$$

$$|\vec{S}| \approx 1 \text{ kW}/\text{m}^2$$

(na površini Zemlje)

$$P_{RX} = \vec{S} \cdot \vec{1}_n A_{\text{maček}} (1 - |\Gamma|^2)$$



$$A_{\text{maček}} \approx 0.05 \text{ m}^2$$

$$P_{RX} \approx 50 \text{ W}$$

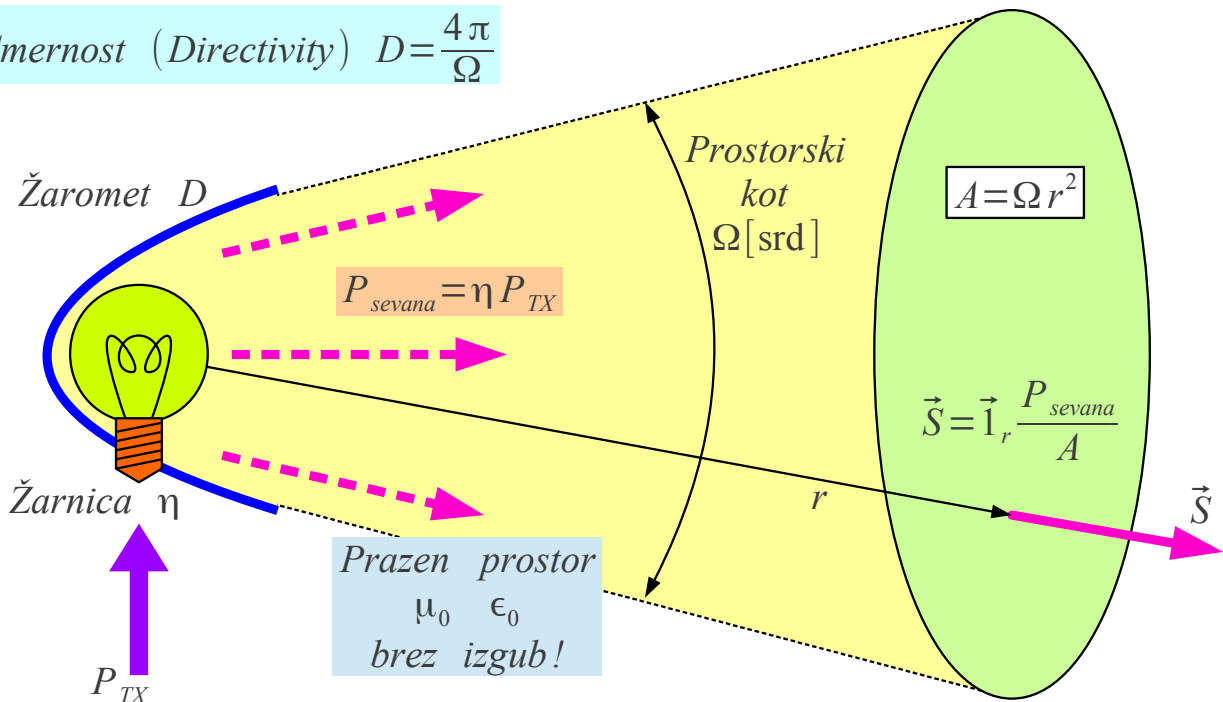
Toplotni učinki sevanja

Domači maček nima preglavic s človeškimi predpisi. Maček črne barve skoraj ne odbija $\Gamma \approx 0$ svetlobe Sonca, pač pa črna dlaka vso prispelo moč elektromagnetnega valovanja pretvori v toploto. Prispela moč je sorazmerna projekciji površine mačka na smer vpadne svetlobe. Maček torej dobro razume brezžični prenos električne energije, ko se na Soncu greje!

Sonce je neusmerjen naravni vir elektromagnetnega sevanja zelo velike

moči. Moč umetnih virov, radijskih oddajnikov, je zelo omejena. Domet brezvrvične zveze skušamo povečati tako, da oddajnik ne seva v vse smeri, pač pa sevanje oddajnika usmerimo proti sprejemniku. Na primer, žaromet usmeri sevanje žarnice v prostorski kot $\Omega < 4\pi$, ki je manjši od polnega prostorskega kota:

$$\text{Smernost (Directivity)} \quad D = \frac{4\pi}{\Omega}$$



$$\text{Dobitek (Gain)} \quad G = \eta D$$

$$EIRP = D P_{sevana} = G P_{TX}$$

Sevanje usmerjenega izvora

$$\vec{S} = \vec{r}_r \frac{\eta P_{TX}}{\Omega r^2} = \vec{r}_r \frac{\eta D P_{TX}}{4\pi r^2} = \vec{r}_r \frac{G P_{TX}}{4\pi r^2}$$

Učinkovitost žarometu opisuje pojem smernost (angleško: directivity). Smernost $D = \frac{|\vec{S}_{usmerjen}|}{|\vec{S}_{neusmerjen}|} \geq 1$ je razmerje med gostoto moči usmerjenega vira v primerjavi z gostoto moči neusmerjenega vira, ko oba vira sevata enako moč. Usmerjen vir osvetljuje z enako močjo na isti razdalji manjšo površino $A = \Omega r^2$ od neusmerjenega vira, kar daje višjo gostoto moči. Smernost preprosto zapišemo s prostorskim kotom sevanja vira $D = 4\pi / \Omega$.

V izračunu gostote pretoka moči nastopata električni izkoristek oddajne antene in smernost iste naprave v produktu. $G = \eta D$ je zato smiselna definicija dobika (angleško: gain) antene. Slednjo pogosto napačno prevajajo v ojačanje antene. Antena ničesar ne ojačuje, pač pa samo pretvarja vodeno elektromagnetno valovanje v sevanje in usmerja nastalo sevanje.

Sevanje radijskega oddajnika pogosto navajamo kot efektivno izotropno sevano moč $EIRP = G P_{TX}$ (angleško: Effective Isotropic Radiated Power), to je zmnožkom dobitka antene in moči oddajnika. Vse veličine pogosto navajamo v logaritemskih merskih enotah. Neimenovana razmerja D in G pogosto navajamo v [dBi], decibeli glede na neusmerjeno (izotropno) anteno. Moč oddajnika P_{TX} in efektivno sevano moč $EIRP$ pogosto navajamo v [dBm], decibelih glede na 1mW.

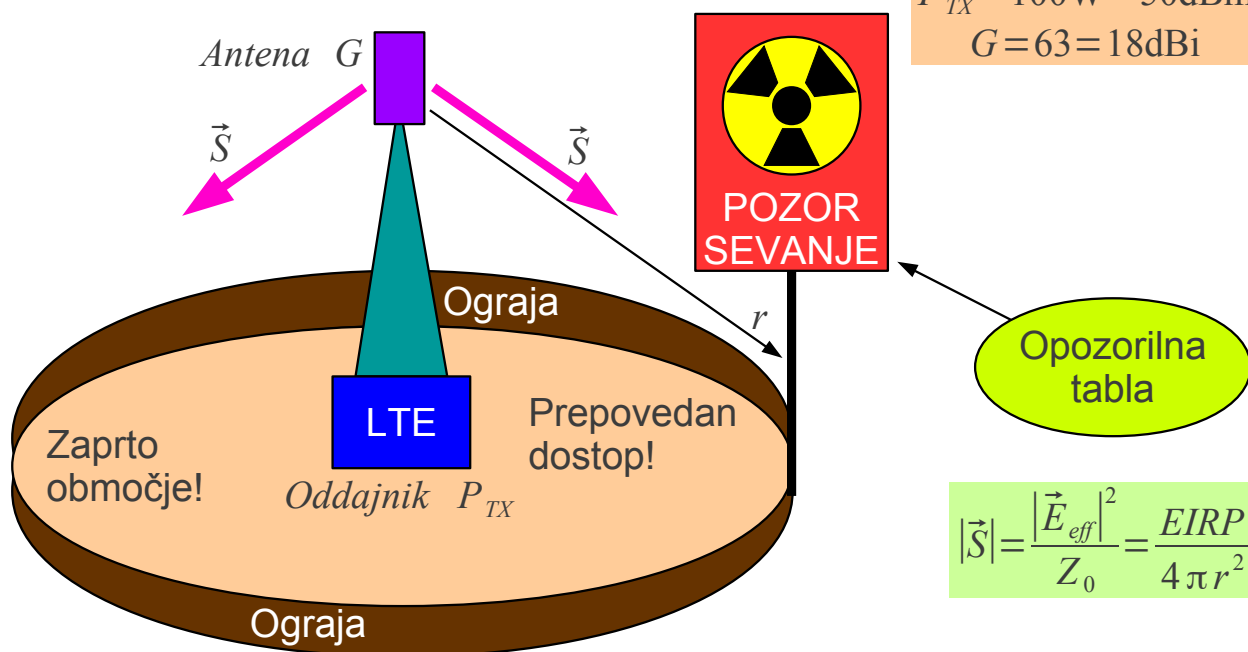
Praktičen zgled je bazna postaja omrežja LTE. Izhodna moč oddajnika lahko doseže $P_{TX} = 100\text{W} = 50\text{dBm}$. Antena pokriva sektor v vodoravni ravnini in njen dobitek lahko doseže $G = 63 = 18\text{dBi}$. Efektivna sevna moč doseže $EIRP = 6.3\text{kW} = 68\text{dBm}$:

$$EIRP = +68\text{ dBm} = 10^{(68/10)} \cdot 1\text{ mW} = 6.3\text{ kW}$$

Zgled

$$P_{TX} = 100\text{W} = 50\text{dBm}$$

$$G = 63 = 18\text{dBi}$$



EU zakonodaja

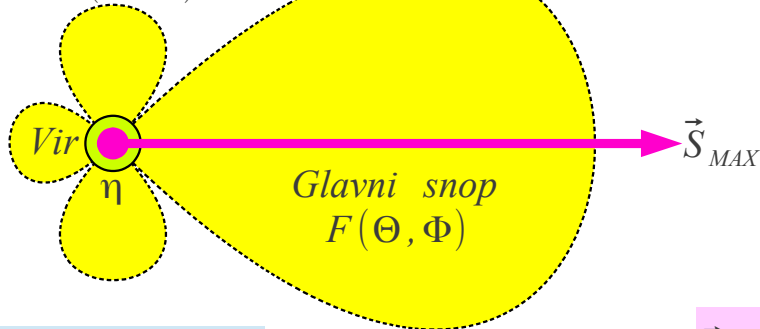
$$|\vec{E}_{eff}| \leq 6\text{ V}_{eff}/\text{m}$$

$$r \geq \sqrt{\frac{Z_0 EIRP}{4\pi |\vec{E}_{eff}|^2}} = 72.5\text{ m}$$

Ograja okoli vira sevanja

Iz podatkov o moči oddajnika in dobitku antene lahko izračunamo razdaljo $r = 72.5\text{m}$, kjer efektivna električna poljska jakost doseže zakonsko določeno mejo $|\vec{E}_{eff}| = 6\text{V}_{eff}/\text{m}$. Če spoštujemo zakon, moramo javnosti preprečiti dostop do antene oddajnika na izračunani razdalji od antene $r = 72.5\text{m}$ s primerno ograjo in postaviti opozorilne table.

Stranski snopi
 $F(\Theta, \Phi)$



Prazen prostor
 $\mu_0 \quad \epsilon_0$
 brez izgub!

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{1}_E \alpha \frac{e^{-jkr}}{r} F(\Theta, \Phi)$$

$F(\Theta, \Phi) \equiv$ smerni diagram

$$\vec{S} = \vec{1}_r \frac{|\vec{E}|^2}{2 Z_0}$$

$$\vec{S}(\vec{r}) = \vec{1}_r \frac{|\alpha|^2}{2 Z_0 r^2} |F(\Theta, \Phi)|^2$$

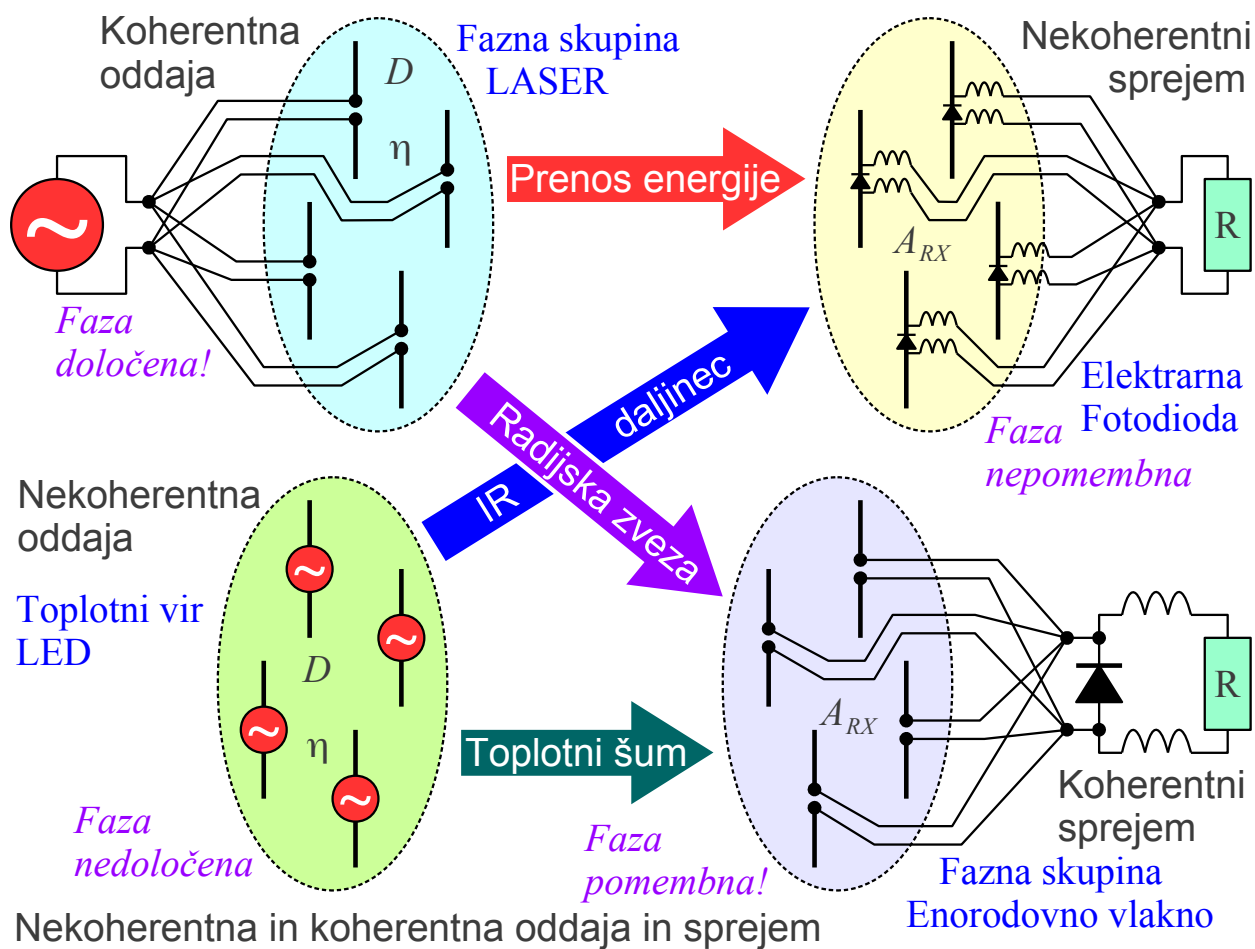
$$\vec{S}_{MAX} = \vec{1}_r \frac{|\alpha|^2}{2 Z_0 r^2} |F(\Theta_{MAX}, \Phi_{MAX})|^2$$

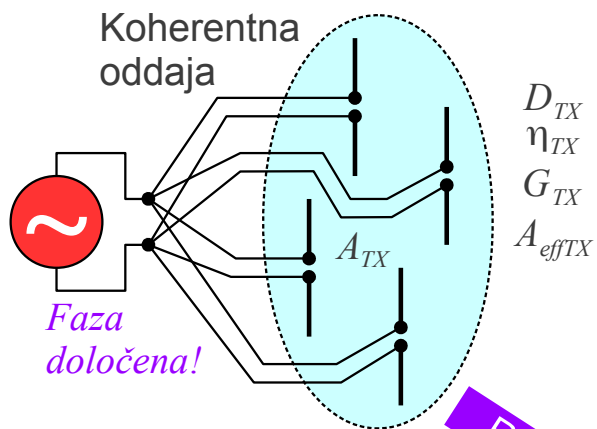
$$P_{sevana} = \oint\oint_{4\pi} \vec{S}(\vec{r}) \cdot \vec{1}_r r^2 d\Omega = \frac{|\alpha|^2}{2 Z_0} \oint\oint_{4\pi} |F(\Theta, \Phi)|^2 d\Omega$$

$$D = \frac{|\vec{S}_{MAX}|}{\left(\frac{P_{sevana}}{4\pi r^2} \right)} = \frac{\frac{|\alpha|^2}{2 Z_0 r^2} |F(\Theta_{MAX}, \Phi_{MAX})|^2}{\frac{1}{4\pi r^2} \frac{|\alpha|^2}{2 Z_0} \oint\oint_{4\pi} |F(\Theta, \Phi)|^2 d\Omega}$$

$$D = \frac{4\pi |F(\Theta_{MAX}, \Phi_{MAX})|^2}{\oint\oint_{4\pi} |F(\Theta, \Phi)|^2 d\Omega}$$

Smernost oddajne antene





$$A_{effTX} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_{TX} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{G_{TX}}{\eta_{TX}}$$

$$A_{eff} = A \cdot \eta_o \equiv \text{efektivna površina}$$

$$\eta_o \equiv \text{izkoristek osvetlitve}$$

$$\eta_o \approx 50\% \dots 80\%$$

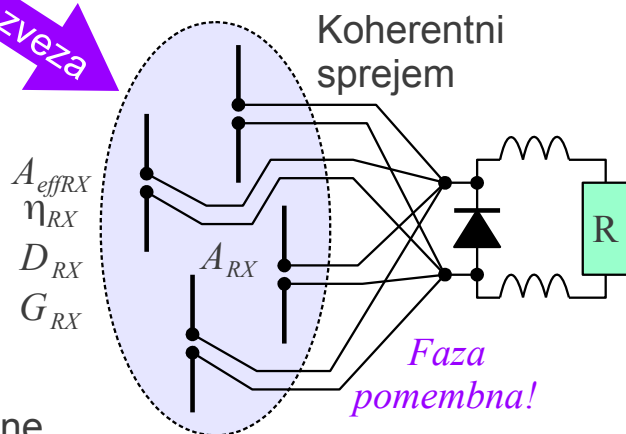
Recipročnost !

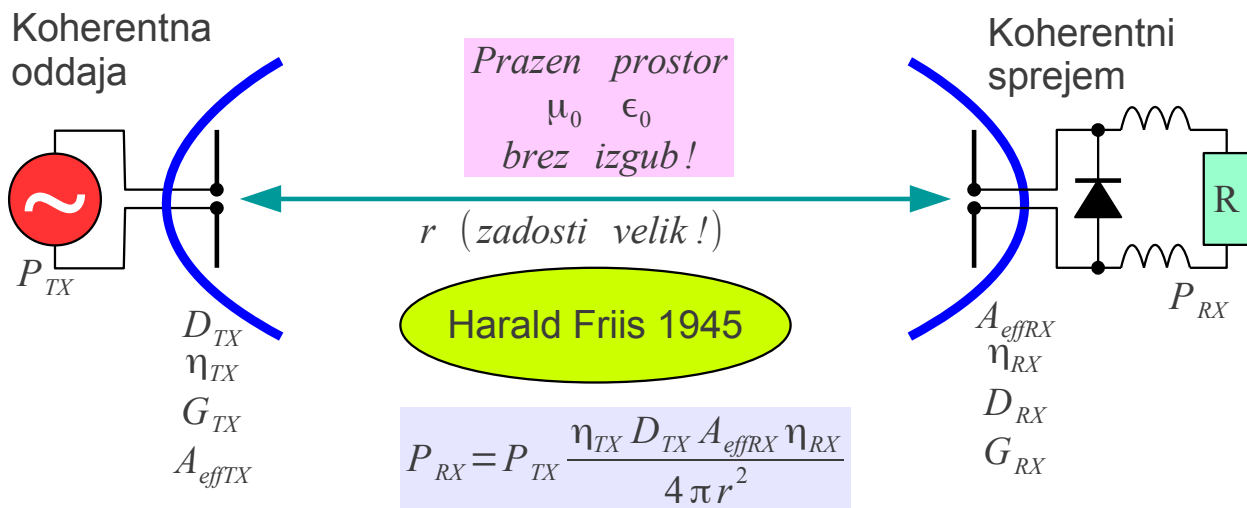
$$D_{RX} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{effRX}$$

$$G_{RX} = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{effRX} \eta_{RX}$$

Efektivna površina koherentne antene

Radijska zveza





Zapis z dobitki anten:
$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$$

Recipročnost !

Zapis s površinami anten:
$$P_{RX} = P_{TX} \frac{\eta_{TX} A_{effTX} A_{effRX} \eta_{RX}}{\lambda^2 r^2}$$

Friisova enačba za domet koherentne zveze

$$P[\text{dBm}] = 10 \log_{10}(P/1\text{mW}) = P[\text{dBW}] + 30\text{dB}$$

$$P[\text{dBW}] = 10 \log_{10}(P/1\text{W}) = P[\text{dBm}] - 30\text{dB}$$

dBm \equiv dB glede na 1mW

dBW \equiv dB glede na 1W

$$D[\text{dBi}] = 10 \log_{10} D$$

$$G[\text{dBi}] = 10 \log_{10} G$$

dBi \equiv dB glede na neusmerjen (izotropni) vir

$$D[\text{dBd}] = D[\text{dBi}] - 2.15\text{ dB}$$

$$G[\text{dBd}] = G[\text{dBi}] - 2.15\text{ dB}$$

dBd \equiv dB glede na polvalovni dipol

Friisova enačba

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

$$P_{RX}[\text{dBm}] = P_{TX}[\text{dBm}] + G_{TX}[\text{dBi}] + G_{RX}[\text{dBi}] + 20\log_{10}\lambda[\text{m}] - 20\log_{10}r[\text{m}] - 21.98\text{ dB}$$

$$20\log_{10}(4\pi) = 21.98\text{ dB}$$

Slabljenje praznega prostora

$$a[\text{dB}] = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)$$

$$P_{RX}[\text{dBm}] = P_{TX}[\text{dBm}] + G_{TX}[\text{dBi}] + G_{RX}[\text{dBi}] - 20\log_{10}f[\text{MHz}] - 20\log_{10}r[\text{m}] + 27.55\text{ dB}$$

Logaritemske merske enote

$$\lambda[\text{m}] \approx 299.7/f[\text{MHz}] \quad (\text{zrak } n=1.0003)$$

* * * * *