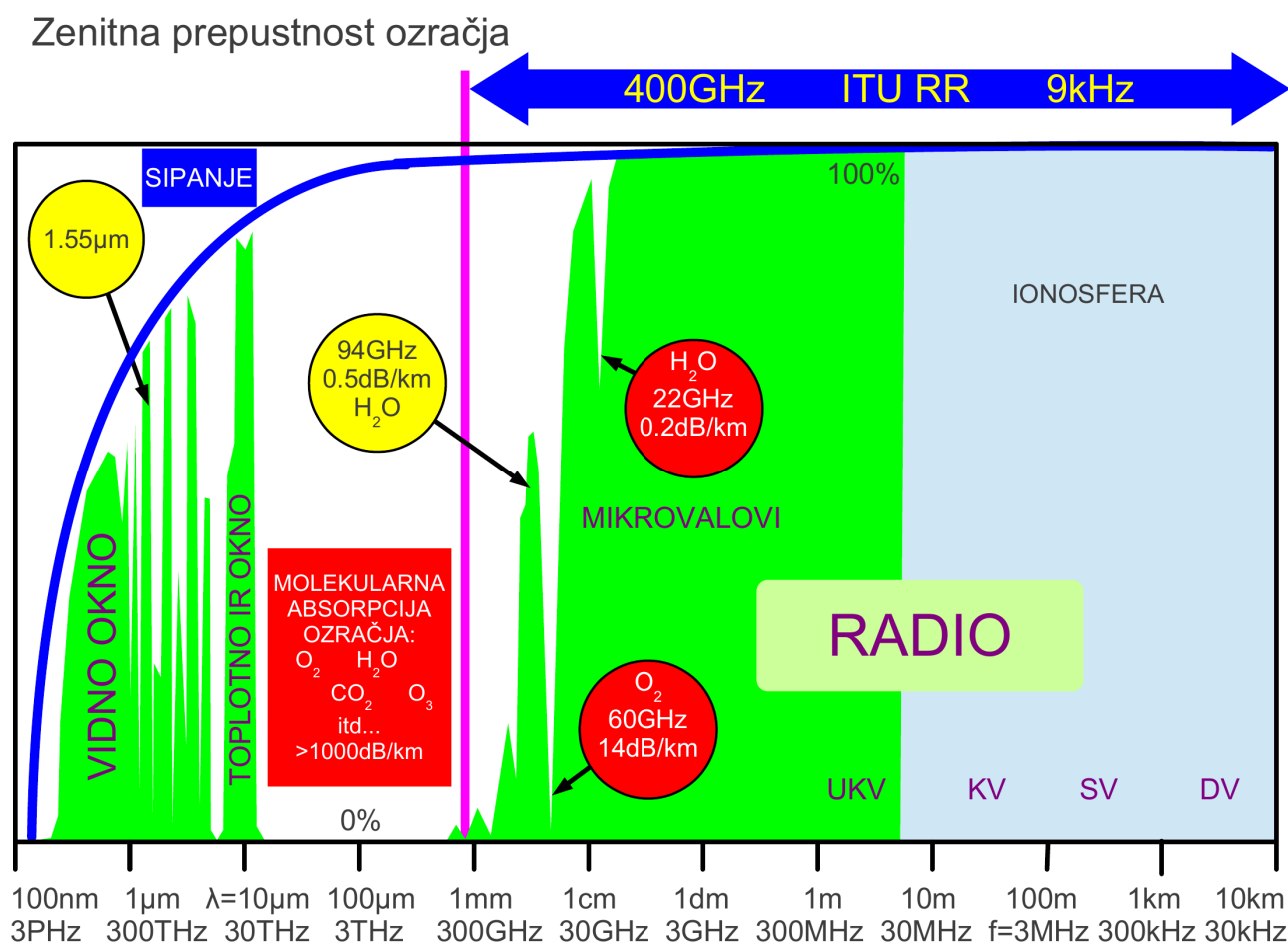


# 1. Kaj je to radio?

Radio je običajno ime za elektromagnetno valovanje določenih frekvenc oziroma valovnih dolžin. Mednarodni predpisi, bolj točno ITU Radio Regulations, zahtevajo navajanje frekvenc in ne dovoljujejo uporabe valovnih dolžin. Po ITU Radio Regulations je radio definiran kot elektromagnetno valovanje v frekvenčnem pasu od 9kHz do 400GHz:



Naravne omejitve so zagotovo bolj samoumevne od zakonskih predpisov. Na frekvencah nad 100GHz je zemeljsko ozračje neprozorno za elektromagnetno valovanje. Frekvence pod 100kHz so komaj uporabne za komunikacije zaradi izredno majhne razpoložljive pasovne širine.

Kljub temu se področje uporabnih radijskih frekvenc razprostira čez več kot sedem velikostnih razredov oziroma dosti več kot katerikoli drug fizikalni pojav. Končno postavljajo meje tudi praktične omejitve. Na spodnji frekvenčni meji radio potrebuje zelo velike

oddajnike in sprejemnike. Na gornji frekvenčni meji se radio obnaša podobno vidni svetlobi: zahteva natančno usmerjanje oddajnikov in sprejemnikov ter postane občutljiv na ovire.

Vse do 19. stoletja fizika ni poznala povezav med navidez različnimi električnimi pojavi, magnetnimi pojavi in svetlobo. V prvi polovici 19. stoletja sta André-Marie Ampère (1826) in Michael Faraday (1831) odkrila povezavi med električnimi in magnetnimi pojavi v obe smeri.

V drugi polovici 19. stoletja so fizikalna odkritja uredili matematiki. James Clerk Maxwell (1861) je vse dotedanje znanje o elektriki in magnetiki združil v slovite enačbe, ki danes nosijo njegovo ime, čeprav jih je v danes znani obliki zapisal šele Oliver Heaviside dve desetletji za Maxwellom:

Elektromagnetika

*Harmonske veličine:*

$$\partial/\partial t = j\omega$$

$$\omega \equiv \text{krožna frekvenca} \quad [\text{rd/s}]$$

$$\vec{H} \equiv \text{magnetna poljska jakost} \quad \left[ \frac{\text{A}}{\text{m}} \right]$$

$$\vec{J} \equiv \text{gostota toka} \quad \left[ \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\text{Ampère: } \text{rot } \vec{H} = \vec{J} + j\omega \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{E} \equiv \text{električna poljska jakost} \quad \left[ \frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

$$\text{Faraday: } \text{rot } \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H}$$

$$\rho \equiv \text{gostota elektrine} \quad \left[ \frac{\text{As}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\text{Gauss: } \text{div } \epsilon \vec{E} = \rho$$

$$\epsilon \equiv \text{dielektričnost} \quad \left[ \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \right] \rightarrow \vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\mu \equiv \text{permeabilnost} \quad \left[ \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \right] \rightarrow \vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\text{Poynting: } \vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^* \equiv \text{gostota pretoka moči} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dV' \equiv \text{vektorski potencial} \quad \left[ \frac{\text{Vs}}{\text{m}} \right]$$

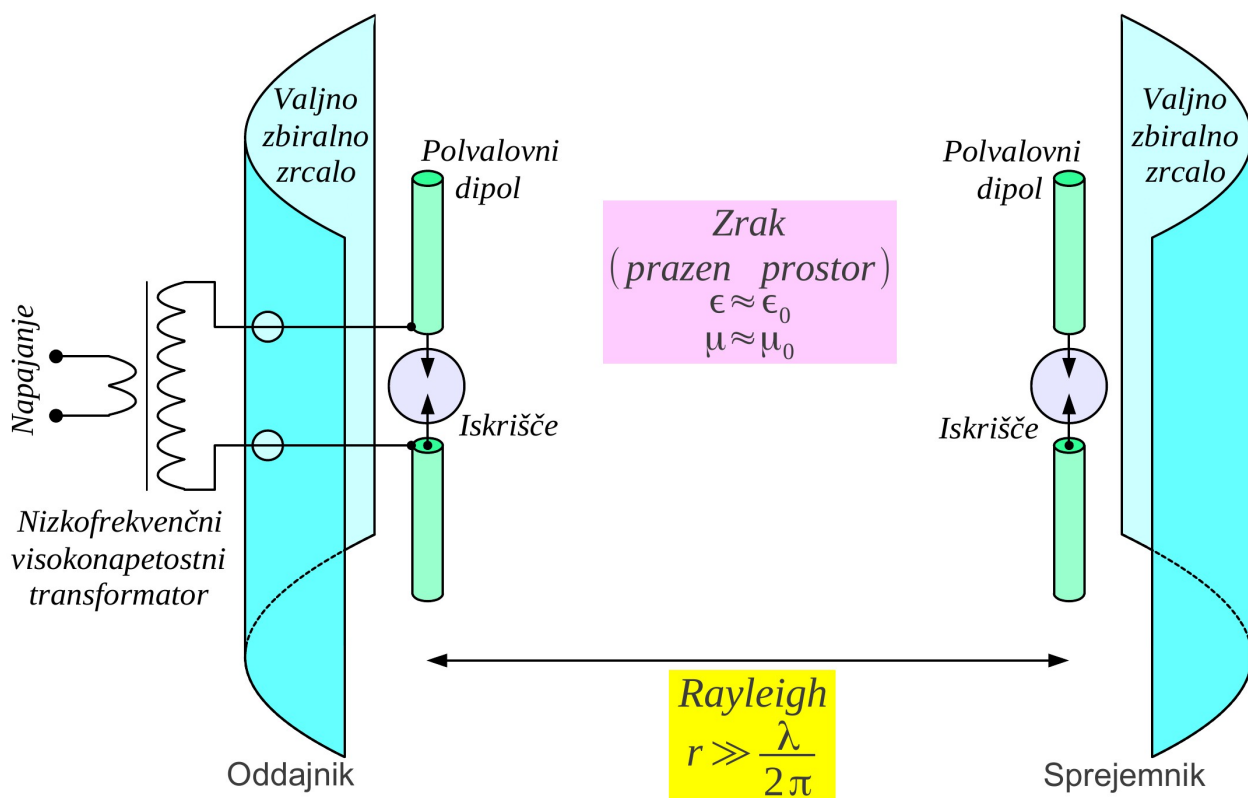
$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A}$$

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{V'} \rho(\vec{r}') \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dV' \equiv \text{skalarni potencial} \quad [\text{V}] \quad \vec{E} = -j\omega \vec{A} - \text{grad } V$$

Maxwellov učenec John Henry Poynting je leta 1884 opisal pretok elektromagnetne moči. Hkrati z osnovnimi enačbami elektromagnetnega polja so bila razvita tudi računska orodja, skalarni potencial  $V(\vec{r})$  in vektorski potencial  $\vec{A}(\vec{r})$ , ki

omogočata izračun električnega polja  $\vec{E}(\vec{r})$  in magnetnega polja  $\vec{H}(\vec{r})$  v točki  $\vec{r}$  iz znanih virov, elektrin  $\rho(\vec{r}')$  in tokov  $\vec{J}(\vec{r}')$  na koordinatah  $\vec{r}'$ .

Končno so Maxwellove enačbe napovedale tudi elektromagnetno valovanje oziroma povezavo med električnimi in magnetnimi pojavi ter svetlobo, kar je Heinrich Rudolf Hertz potrdil s poskusi (razširjanje, lom, odboj, polarizacija) leta 1889:

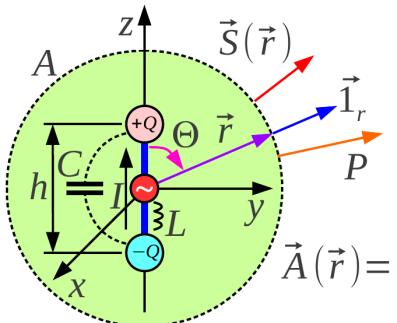


### Hertzov poskus

Heinrich Rudolf Hertz je umrl razmeroma mlad. Na prelomu stoletja so se številni izumitelji širom sveta lotili najrazličnejših poskusov s tako imenovanimi "Hertzovimi valovi", čeprav pogosto ni šlo za elektromagnetno valovanje v strogem pomenu besede. Izvirni Hertzovi poskusi so delovali na frekvencah vse do približno  $f \approx 450\text{MHz}$ , večina izumiteljev, tudi Nikola Tesla in Gulielmo Marconi, pa je v svojih poskusih uporabljala dosti nižje frekvence večinoma pod  $f < 100\text{kHz}$ .

Nikola Tesla, Gulielmo Marconi in številni drugi izumitelji so v svojih poskusih uporabljali električno majhne naprave  $h \ll \lambda$  v

primerjavi z valovno dolžino. V takšnih napravah ima elektromagnetno polje hkrati statične komponente, sevanje in še druge dinamične člene podobnih velikostnih razredov. Izumitelji niso imeli niti teoretskega znanja niti primernih merilnih instrumentov, s katerimi bi lahko ločili med različnimi členi električnega in magnetnega polja kratkega električnega dipola:



$\omega \neq 0$

$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$

$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{V'} \vec{J}(\vec{r}') \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dV' \approx (\vec{1}_r \cos \Theta - \vec{1}_\Theta \sin \Theta) \frac{\mu I h}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r}$

$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A} = \vec{1}_\Phi \frac{I h}{4\pi} e^{-jkr} \left( \frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin \Theta$

$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{j\omega\epsilon} \text{rot } \vec{H} = \frac{I h}{4\pi j\omega\epsilon} e^{-jkr} \left[ \vec{1}_r \left( \frac{jk}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) 2\cos \Theta + \vec{1}_\Theta \left( -\frac{k^2}{r} + \frac{jk}{r^2} + \frac{1}{r^3} \right) \sin \Theta \right]$

$\vec{S}(\vec{r}) = \frac{1}{2} \vec{E}(\vec{r}) \times \vec{H}(\vec{r})^* = \frac{|I|^2 h^2}{32\pi^2 \omega \epsilon} \left[ \vec{1}_r \left( \frac{k^3}{r^2} - \frac{j}{r^5} \right) \sin^2 \Theta + \vec{1}_\Theta \left( \frac{jk^2}{r^3} + \frac{j}{r^5} \right) 2\cos \Theta \sin \Theta \right]$

$P = \oint_{r \rightarrow \infty} \vec{S}(\vec{r}) \cdot \vec{1}_r r^2 \sin \Theta d\Theta d\Phi \approx \frac{|I|^2 h^2 Z k^2}{12\pi}$

$R_s = \frac{2P}{|I|^2} = \frac{h^2 Z k^2}{6\pi} = \frac{2\pi Z}{3} \left( \frac{h}{\lambda} \right)^2$

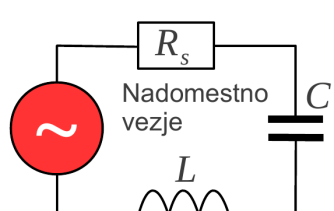
Sevanje kratkega dipola

**Poenostavitve:**

(1)  $h \ll r$

(2)  $h \ll \lambda$

$\frac{1}{\omega \epsilon} = \frac{1}{\omega \sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z}{k}$



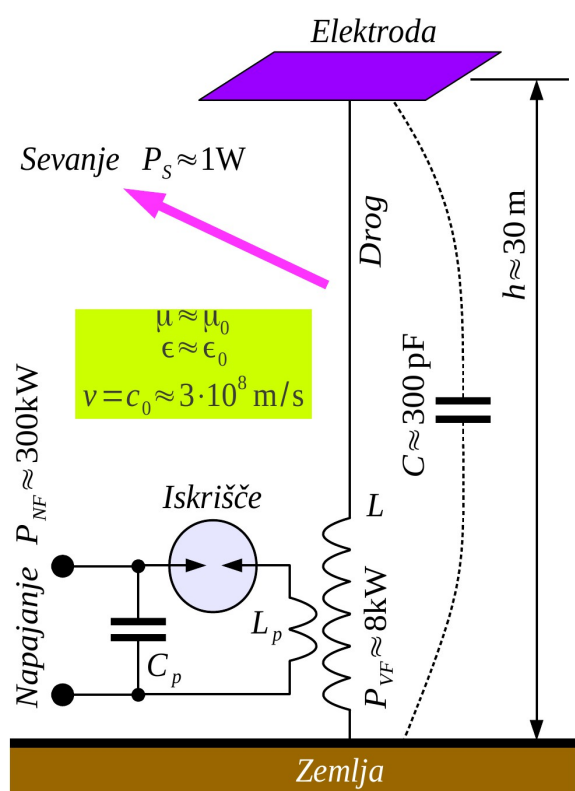
Pravo elektromagnetno valovanje je prečno (transverzalno) valovanje, torej imata v krogelnih koordinatah električno polje  $\vec{E}$  in magnetno polje  $\vec{H}$  samo prečne komponente  $\vec{1}_\Theta$  in  $\vec{1}_\Phi$ , ko se nahaja vir v koordinatnem izhodišču. Statično in bližnje dinamično polje lahko imata tudi vzdolžno komponento  $\vec{1}_r$  v krogelnih koordinatah. Zabloda o "vzdolžnem (longitudinalnem) elektromagnetnem valovanju" je živa še danes kljub temu, da ga fizikalni zakoni niti Maxwellove enačbe ne dopuščajo niti ga do danes ni še nihče zares izmeril!

Praktična izvedba kratkega električnega dipola je Teslov transformator. Čeprav natančni podatki niso znani, iz razpoložljivih virov sklepamo, da je Nikola Tesla izdelal naprave vse do višine

približno  $h \approx 30\text{m}$ , ki so proizvajale izredno visoke napetosti na frekvencah pod  $f \leq 30\text{kHz}$ . Nikola Tesla je svoje naprave najverjetneje načrtoval za čim večje bližnje električno polje in čim močnejši statični električni sklop do sprejemnika. Sevanja niti sevalne upornosti verjetno ni nikoli opazil, saj je bila sevalna upornost njegovih naprav za štiri velikostne razrede nižja

$R_S \ll R_{Cu}$  od upornosti navitja transformatorja:

Teslov transformator



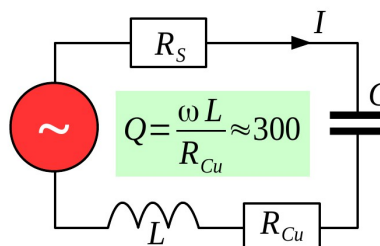
$$f \approx 30 \text{ kHz}$$

$$\omega = 2\pi f \approx 1.885 \cdot 10^5 \text{ rd/s}$$

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \approx 10 \text{ km}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120 \pi \Omega$$

$$R_s = \frac{2\pi Z_0}{3} \left( \frac{h}{\lambda} \right)^2 \approx 80 \pi^2 \Omega \left( \frac{h}{\lambda} \right)^2 \approx 7.1 \text{ m}\Omega$$



$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \approx 17.68 \text{ k}\Omega$$

$$R_{Cu} = \frac{\omega L}{Q} \approx 58.9 \Omega$$

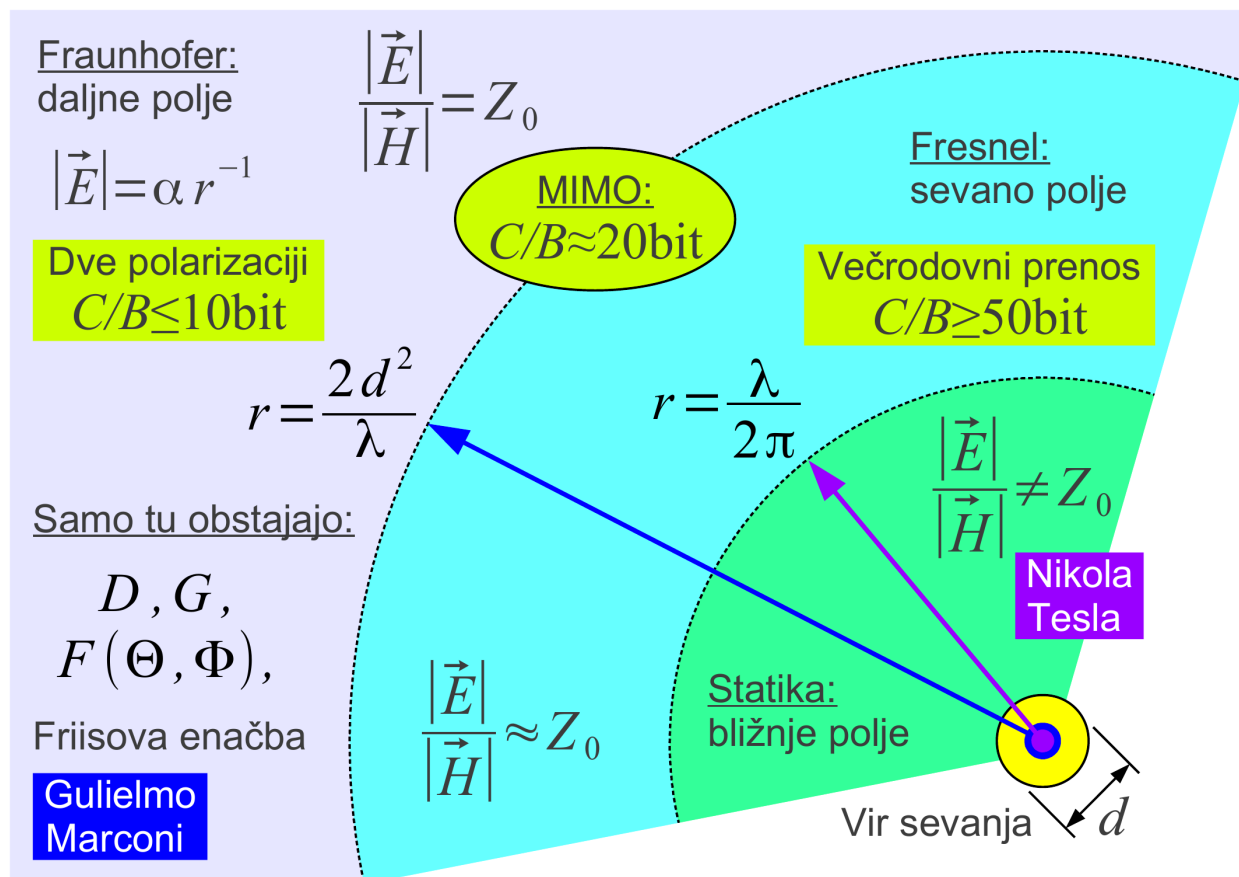
$$\eta = \frac{P_s}{P_{VF}} = \frac{P_s}{P_s + P_{Cu}} = \frac{R_s}{R_s + R_{Cu}} \equiv \text{sevalni izkoristek}$$

$$\eta \approx \frac{0.0071 \Omega}{0.0071 \Omega + 58.9 \Omega} \approx 1.2 \cdot 10^{-4}$$

Iz razpoložljivih podatkov sklepamo

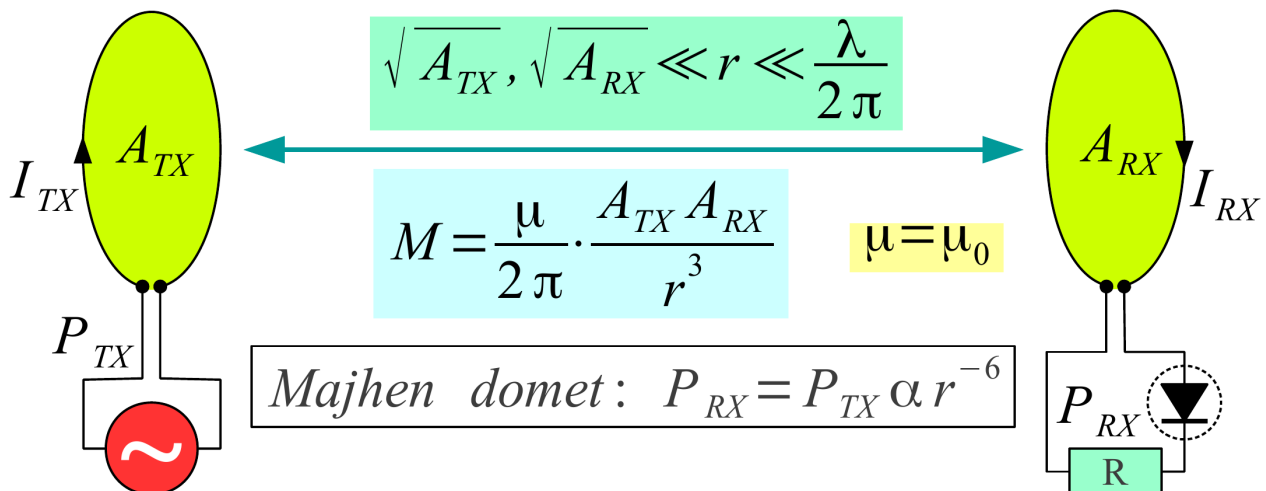
antena

radio 1910



Statika, Fresnel in Fraunhofer

$\frac{E}{H} \neq Z_0 \rightarrow$  Potrebna ločena meritev  $\vec{E}$  ter  $\vec{H}$



$\text{Re}[\vec{S}] = f(I_{TX}, I_{RX})$   
Brez sevanja!

Uporaba:

RFID in druge zveze kratkega dosega  
Prenos energije (brezžično polnjenje)

Induktivni sklop v bližnjem polju

## Zmogljivost radijske zveze

$$\text{Informacija} \quad I = \frac{1}{2} \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{W_s}{W_N} \right) \quad [\text{bit}] \quad (\text{Claude Shannon 1948})$$

$W_s \equiv \text{energija signala}$

$W_N \equiv \text{energija šuma}$

$T \equiv \text{perioda signala}$

$$\text{Pasovna širina} \quad B = \frac{1}{2T} \quad [\text{Hz}] \quad (\text{Harry Nyquist 1924})$$

$P_s \equiv \text{moč signala}$

$P_N \equiv \text{moč šuma}$

$N_0 \equiv \text{spektralna gostota šuma}$

$$\text{Zmogljivost} \quad C = m \cdot B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{P_N} \right) = m \cdot B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{B \cdot N_0} \right) \quad [\text{bit/s} = \text{bps}]$$

$m \equiv \text{število rodov}$

$$\text{Spektralna učinkovitost} \quad C/B = m \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_s}{B \cdot N_0} \right) \quad [\text{bit/s/Hz} = \text{bit}]$$

Leto	Vrsta radijske zveze	Pasovna širina $B$	Zmogljivost $C$	Spektralna učinkovitost $C/B$
~1910	Telegrafija s sprejemom na sluh	500Hz	10bit/s	0.02bit/s/Hz
~1950	Radioteleprinter	250Hz	50bit/s	0.2bit/s/Hz
~1990	GSM telefon	200kHz	271kbit/s	1.355bit/s/Hz
~2010	WiFi 802.11n ( $m=2$ )	40MHz	300Mbit/s	7.5bit/s/Hz

Z odkritjem novih pojavov so se pojavila tudi nova vprašanja. Kaj poganja električno polje? Kaj poganja magnetno polje? Po kakšni snovi potuje elektromagnetno valovanje? Delce, ki poganjajo polja in skrivnostno snov, poimenovano »eter«, po kateri potuje elektromagnetno valovanje, so iskali številni znanstveniki. Albert Abraham Michelson je v iskanju skrivnostne snovi napravil številne poskuse. Najbolj znan je njegov poskus z interferometrom iz leta 1887, ki je bil zadosti natančen, da je dokazal, da skrivnostni »eter« ne obstaja. Danes ta poskus velja kot najbolj znan »neuspeli« poskus v fiziki, ki je v resnici sprožil razvoj teorije relativnosti.

Dokončno je vse tri pojave razložil Albert Einstein v posebni teoriji relativnosti (1905). Električna sila je ena od štirih osnovnih fizikalnih sil, ki nastane med dvema elektrinama (električnima naboje) tudi v popolnoma praznem prostoru (vakuumu), je premo sorazmerna velikosti obeh nabojev in obratno sorazmerna kvadratu razdalje. Relativistika z zahtevo po končni hitrosti svetlobe razloži še dva pojave. Gibajoče elektrine ustvarjajo magnetno polje, kar nakazujejo že relativistični skrčki dolžin (Hendrik Lorentz 1892).



Pospešene elektrine sevajo elektromagnetno valovanje. Podobne zakonitosti veljajo tudi za težnost, kjer mase nadomeščajo elektrine.

Inženirji elektrotehnike skušamo zahtevno relativistiko v primeru električne sile poenostaviti. Ko so pojavi počasni in razdalje majhne, so zakasnitve zaradi končne hitrosti svetlobe nepomembne. Opazimo le električne in magnetne pojave. Sevanje elektromagnetnega valovanja smemo tedaj zanemariti.

Ker je hitrost gibanja elektronov običajno zelo majhna v primerjavi s hitrostjo svetlobe, so magnetne sile zelo majhne v primerjavi z električnimi. Magnetne pojave opazimo samo zato, ker se velika večina električnega polja premikajočih elektronov v prevodniku (gibljivi elektroni v kovini) odšteje od polja nepremičnih elektronov obratnega predznaka (kristalna mreža kovine). Magnetni pojavi so tista majhna sprememba polja gibajočih elektronov, ki jo zahteva relativistika.

Ta učbenik skuša odgovoriti na izziv, kako poučevati elektrodinamiko na sodoben način, izpustiti manj pomembna področja in dodati vse tisto, kar uporablja sodobna telekomunikacijska tehnika. Kljub temu, da so izpeljave v tem učbeniku skrčene na najmanjšo možno mero, elektrodinamika še

vedno zahteva dobro poznavanje matematike in osnov elektrotehnike. Kjer je le možno, je poleg poštene a zahtevne rešitve Maxwellovih enačb navedena tudi preprosta razlaga pojavov s pojmi električnih vezij.

Elektrodinamika je osnova za razumevanje delovanja gradnikov terminalne opreme, sprejemnikov in oddajnikov ter vseh prenosnih poti v telekomunikacijah, tako brezvrvičnih radijskih in svetlobnih zvez kot vrvičnih zvez po kovinskih vodnikih in steklenih (ali dielektričnih) svetlobnih vlaknih.

\* \* \* \* \*