

1. Kaj je to radio?

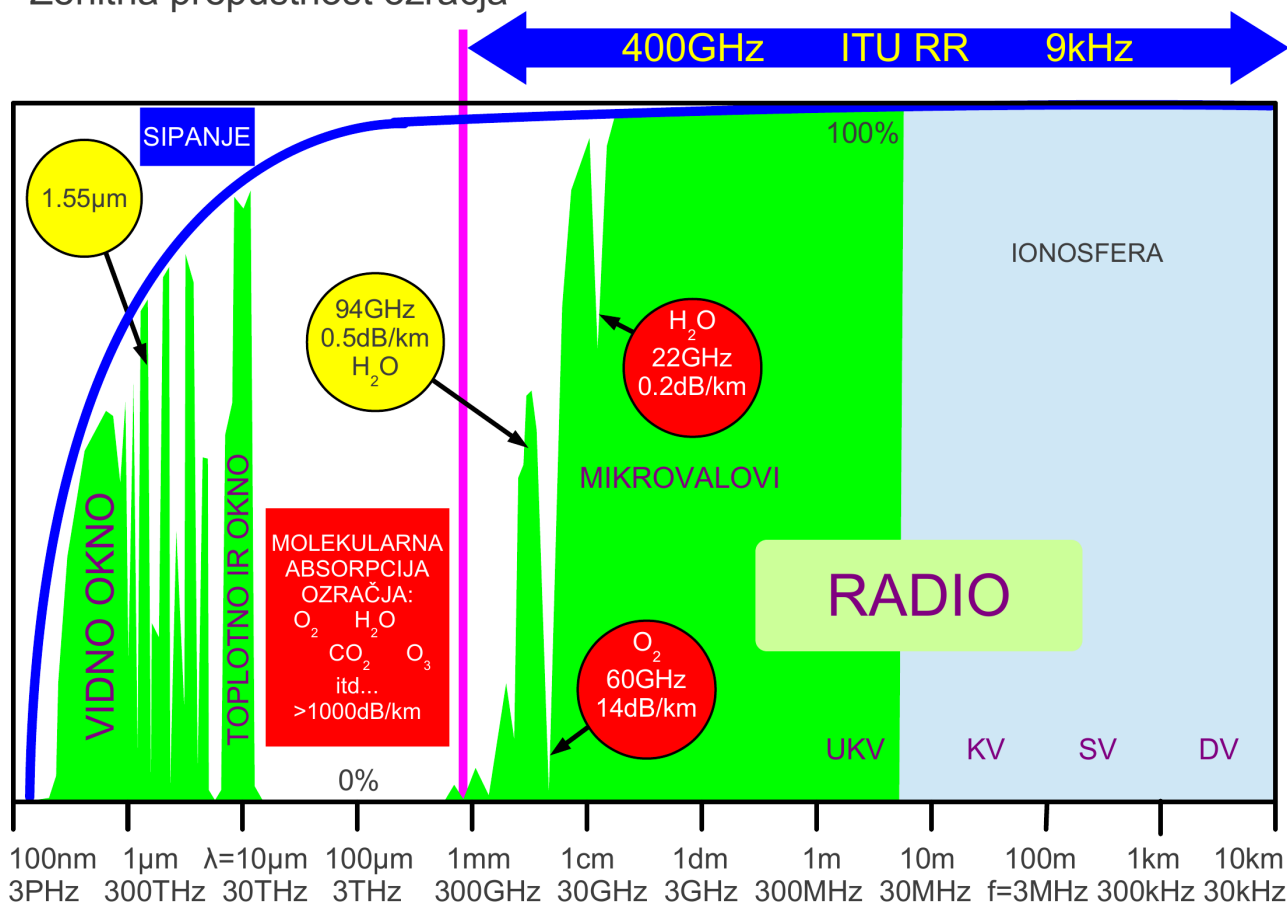
Biologija uči, da višje oblike življenja zmorejo poleg zmogljivejše obdelave podatkov tudi bolj izpopolnjeno daljinsko zaznavanje brez dotika in brezvrvično komunikacijo. Fizika postavlja obema, brezstičnemu daljinskemu zaznavanju in brezvrvični komunikaciji podobne omejitve. Največji domet obeh omogočajo valovanja: zvočno valovanje v trdnih snoveh, tekočinah in plinih ter elektromagnetno valovanje v povsem praznem prostoru. Različne oblike življenja sicer uporabljajo tudi statične fizikalne pojave za zaznavanje in komunikacijo, a je njihov domet občutno manjši od valovanj.

Za elektromagnetno valovanje je prisotnost snovi kvečjemu ovira. Naravni razvoj oblik življenja je izbral takšno elektromagnetno valovanje, kjer sta ozračje in morska voda razmeroma prozorna, primerna tipala in celo viri valovanja pa biološko izvedljivi: vidna svetloba in bližnja infrardeča svetloba. Nekatere oblike življenja uporabljajo tudi toplotno infrardeče valovanje v ozračju.

Čeprav so dosežki stotine milijonov let trajajočega naravnega razvoja zavidanja vredni, živa bitja uporabljajo le ozek del spektra elektromagnetnega valovanja. Nekateri deli spektra elektromagnetnega valovanja so sicer popolnoma neuporabni za zaznavanje in komunikacijo. Nekateri so lahko življenju celo škodljivi, na primer ultravijolična svetloba, rentgenski in gama žarki. Končno, nekatere sicer uporabne dele spektra elektromagnetnega valovanja je naravni razvoj oblik življenja spregledal!

Radio je običajno ime za elektromagnetno valovanje določenih frekvenc oziroma valovnih dolžin, ki ga uporabljamo za brezstično daljinsko zaznavanje in brezvrvično komunikacijo. Radio je plod človeškega duha, ki ga je naravni razvoj oblik življenja spregledal. 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:

Zenitna prepustnost ozračja



Naravne omejitve so zagotovo bolj samoumevne od zakonskih predpisov. Na frekvencah nad 100GHz je zemeljsko ozračje skoraj neprozorno za elektromagnetno valovanje. Frekvence pod 100kHz so komaj uporabne za komunikacije oziroma daljinsko zaznavanje 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. Končno, v razponu sedmih velikostnih razredov frekvenc oziroma valovnih dolžin se lastnosti radia zelo spremenijo!

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. Matematik Carl Freidrich Gauss je zakonitosti

dopolnil z električnim pretokom.

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.

Radio uporabljamo na velikih razdaljah, kjer ne smemo zanemariti relativistike. Maxwellove enačbe zato zapišemo v obliki diferencialnih enačb, ki vsebujejo diferencialne operacije odvajanja v prostoru: vrtinčenje vektorskega polja rot in izvornost vektorskega polja div . Reševanje enačb lahko zahteva še smerni odvod skalarnega polja grad .

Radio običajno deluje z razmeroma ozkopasovnimi signali $B \ll f$, ki jih v izračunih lahko ponazorimo s harmonskim signalom ene same krožne frekvence $\omega = 2\pi f$. To dodatno poenostavi enačbe z zamenjavo časovnih odvodov $\partial/\partial t = j\omega$:

Elektromagnetika

Harmonske veličine:
 $\partial/\partial t = j\omega$
 $\omega \equiv \text{krožna frekvenca} \text{ [rd/s]}$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Radio večinoma uporabljamo v zemeljskem ozračju na

frekvencah, kjer se zemeljsko ozračje obnaša skoraj kot prazen prostor $\epsilon \approx \epsilon_0$ in $\mu \approx \mu_0$. Ker sta dielektričnost in permeabilnost preprosti skalarni konstanti, gostote električnega pretoka $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ in gostote magnetnega pretoka $\vec{B} = \mu \vec{H}$ pri radiu v enačbah posebej ne navajamo, saj sta preprosto izračunljivi.

Maxwellov učenec John Henry Poynting je leta 1884 opisal pretok elektromagnetne moči. Pripadajoči vektor gostote moči $\vec{S} = 1/2 \vec{E} \times \vec{H}^*$ vsebuje za vršne vrednosti harmonskih veličin v enačbi polovico in konjugirano-kompleksno vrednost povsem enakovredno kompleksni električni moči $P = 1/2 U I^*$!

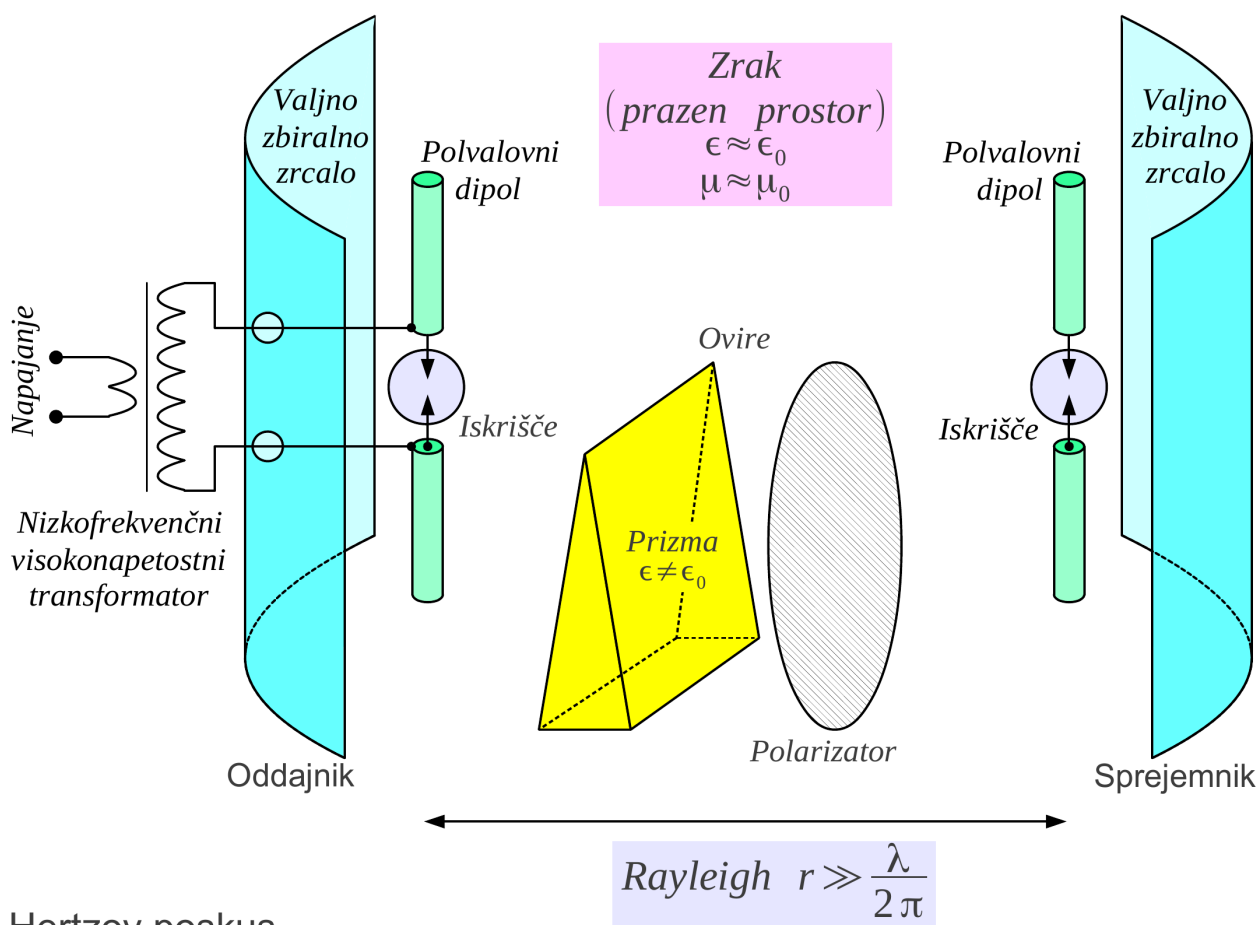
Hkrati z osnovnimi enačbami elektromagnetnega polja so bila razvita tudi računska orodja. Skalarni potencial $V(\vec{r})$ in vektorski potencial $\vec{A}(\vec{r})$ omogočata izračun električnega polja $\vec{E}(\vec{r})$ in magnetnega polja $\vec{H}(\vec{r})$ v točki \vec{r} iz znanih virov, elektrin $\rho(\vec{r}')$ 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 leta 1889. S tehniko 19. stoletja so mehanski stroji lahko kvečjemu naredili silno počasno elektromagnetno valovanje z valovno dolžino nekaj tisoč kilometrov, daleč preveč za kakršenkoli laboratorijski poskus. Prve žarnice so sicer proizvajale vidno svetlobo z valovno dolžino manj kot mikrometer, ampak povezava med električnimi in svetlobnimi pojavi v žarnici ni samoumevna.

Heinrich Rudolf Hertz je bil za svoj čas izredno inovativen, da je našel pot okoli opisane navidez nepremostljive ovire. Izdelal je več različnih električnih rezonatorjev (nihajnih krogov) za frekvence v pasu $50\text{MHz} < f < 500\text{MHz}$. Kapacitivnost rezonatorja je najprej naelektril z nizkofrekvenčnim visokonapetostnim virom in nato pognal nihanje rezonatorja z električno iskro, ki nastane ob preboju. Iskra se pri tem obnaša kot izredno hitro stikalo, ki požene nihanje na več kot šest velikostnih razredov višji frekvenci.

Izkoristek takšne pretvorbe nizkofrekvenčne v visokofrekvenčno energijo je sicer slab in ustvarjeno visokofrekvenčno nihanje je močno dušeno, torej kratkotrajno. Hertz je uporabil iskrišče tudi kot visokofrekvenčni detektor v rezonatorju sprejemnika. Domet svoje naprave je močno izboljšal z valjnima

zbiralnima zrcaloma v oddajniku in sprejemniku ter tako pokazal odboj in razširjanje elektromagnetnega valovanja frekvence okoli $f \approx 450\text{MHz}$:



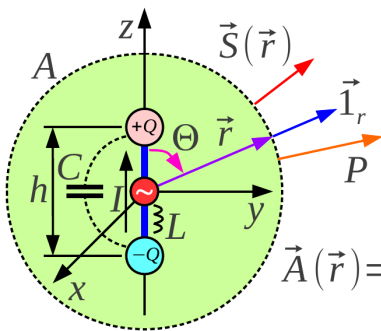
Hertzov poskus

Z obračanjem sprejemnika in oddajnika ter vstavljanjem različnih ovir (prizma iz dielektrika, polarizator iz vzporednih kovinskih žic) v radijsko pot je Hertz pokazal še polarizacijo in lom elektromagnetnega valovanja. Vsi Hertzovi poskusi so se natančno ujemali z Maxwellovo teorijo na eni strani ter z znanimi svetlobnimi pojavi na drugi strani. Povezava med svetlobo in električnimi pojavi ni bila več samo teorija, pač potrjena z laboratorijskim poskusom.

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 večinoma niso imeli niti teoretskega znanja niti primernih merilnih inštrumentov, s katerimi bi lahko ločili med različnimi členi električnega in magnetnega polja kratkega električnega dipola:



Sevanje kratkega dipola

$$\omega \neq 0$$

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

Poenostavitve:

$$(1) \quad h \ll r$$

$$(2) \quad h \ll \lambda$$

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

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

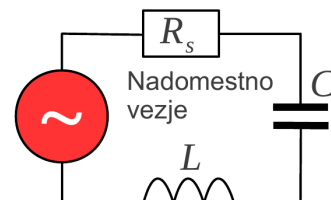
$$\frac{1}{\omega \epsilon} = \frac{1}{\omega \sqrt{\mu \epsilon}} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z}{k}$$

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

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

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

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

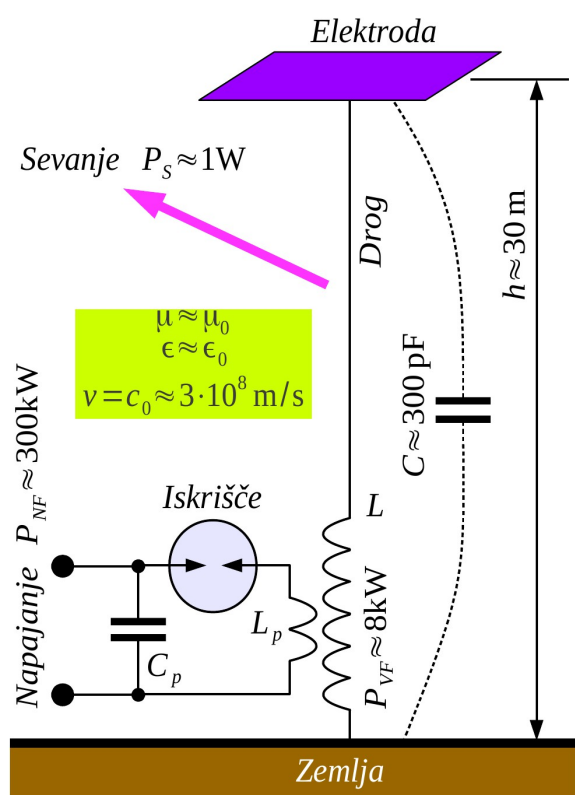


Pravo elektromagnetno valovanje je vedno prečno (transverzalno) valovanje, torej imata v krogelnih koordinatah električno polje \vec{E} in magnetno polje \vec{H} samo prečni komponenti $\vec{1}_\Theta$ in $\vec{1}_\Phi$, ko se nahaja vir v koordinatnem izhodišču. Statično in bližnje dinamično polje lahko 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



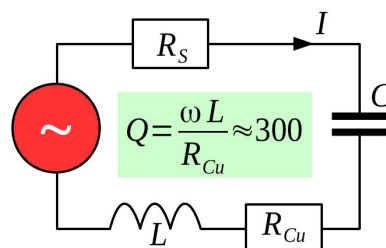
$$f \approx 30 \text{ kHz}$$

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

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

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

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



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

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

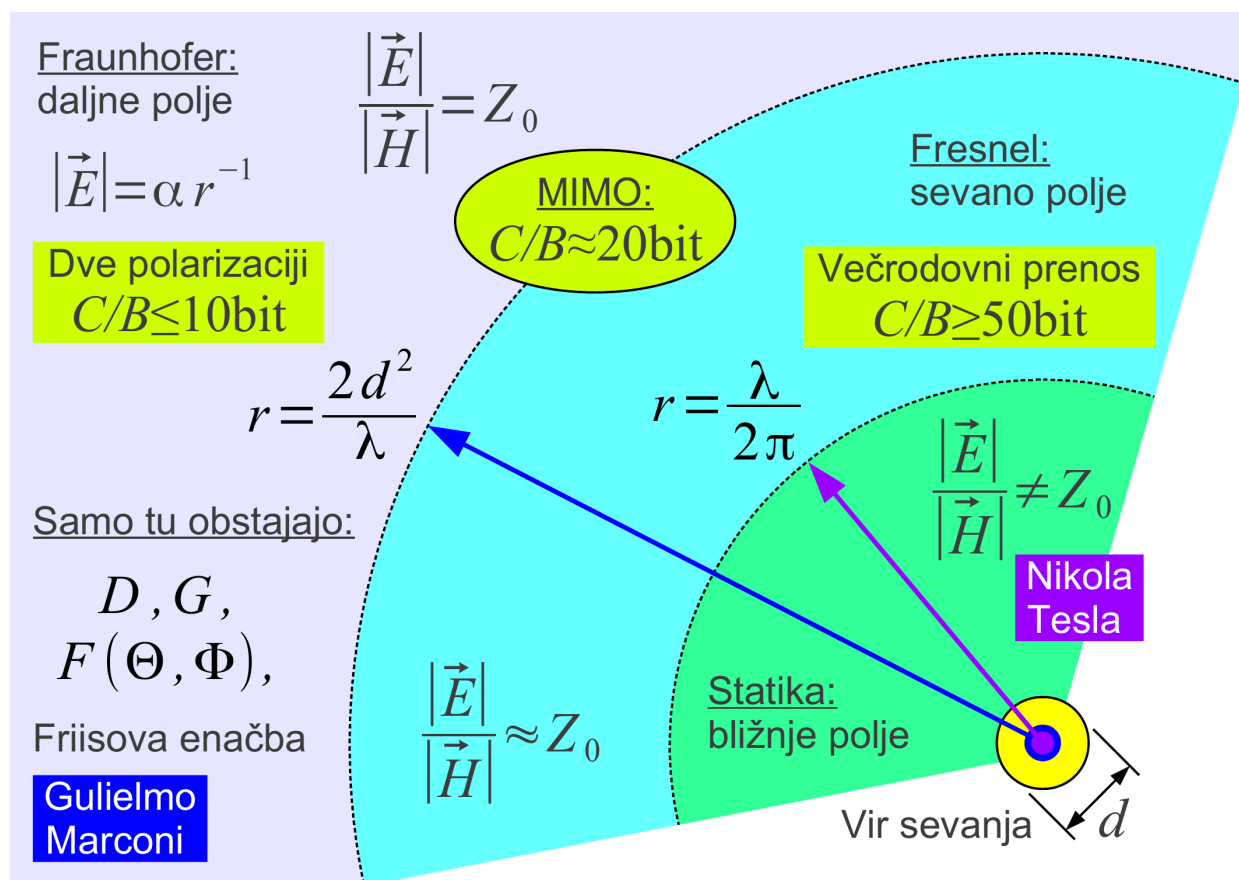
$$\eta = \frac{P_S}{P_{VF}} = \frac{P_S}{P_S + P_{Cu}} = \frac{R_S}{R_S + R_{Cu}} \equiv \text{sevalni izkoristek}$$

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

Iz razpoložljivih podatkov sklepamo

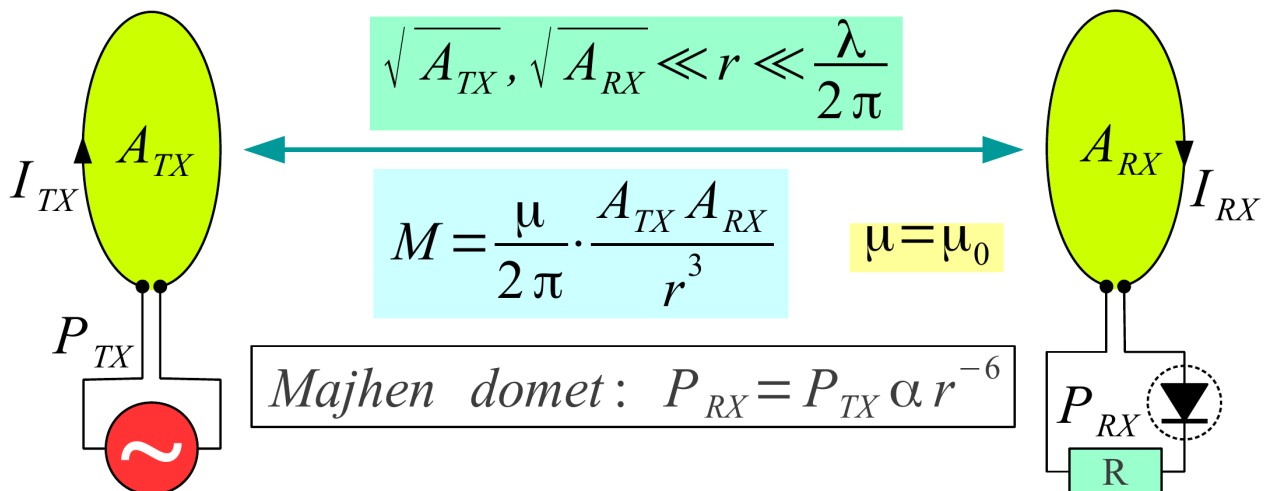
antena

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.

* * * * *