

1. Kaj je to radio?

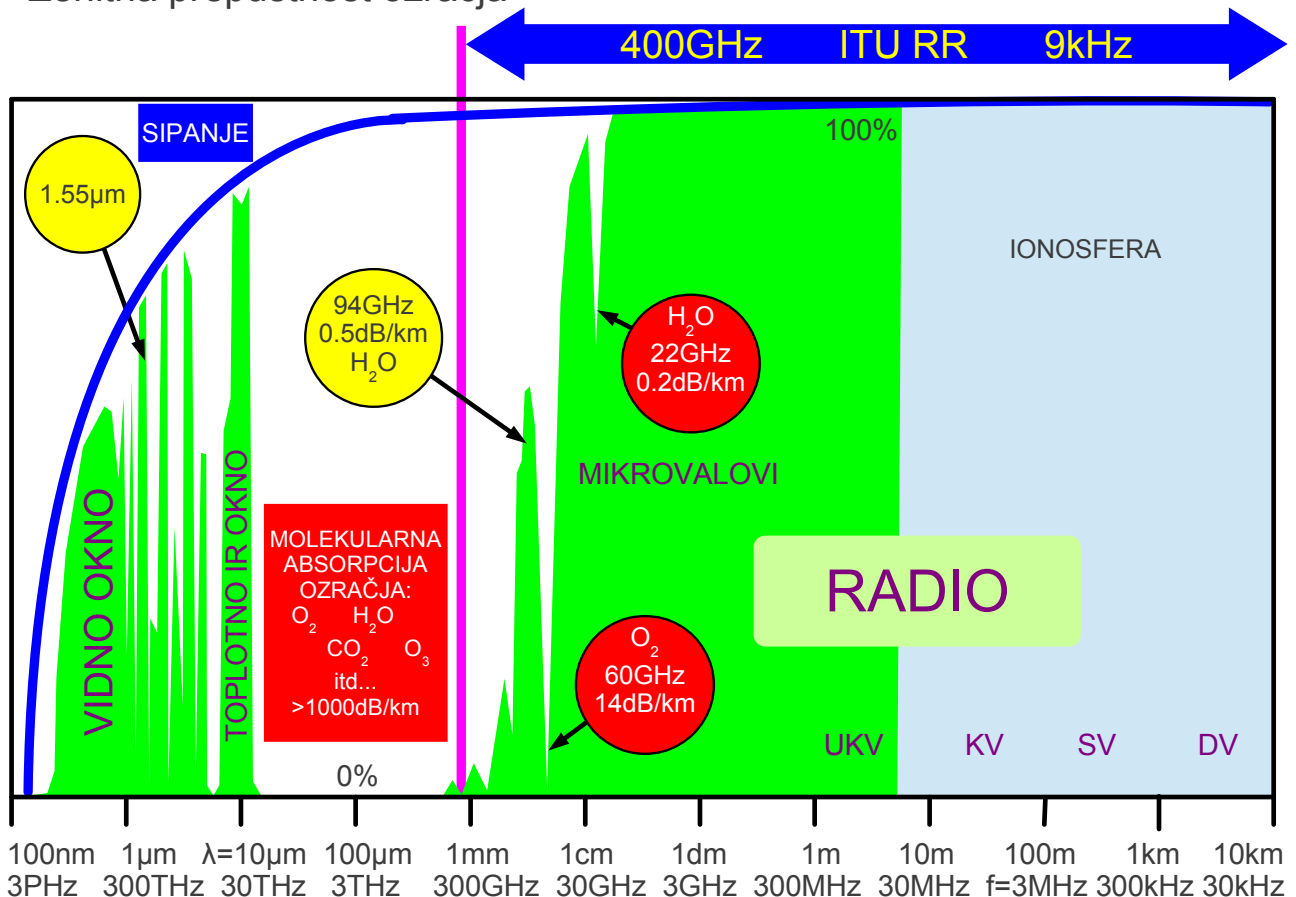
Biologija uči, da višje oblike življenja zmorejo poleg zmogljivejše obdelave podatkov tudi bolj izpopolnjeno daljinsko zaznavanje brez dotika in brezvrvično komunikacijo. Fizika postavlja obema, brezstičnemu daljinskemu zaznavanju in brezvrvični komunikaciji podobne omejitve. Največji domet obeh omogočajo 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 (relativno) 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. Hkrati nizke frekvence pomenijo zelo velike valovne dolžine, kjer je težko doseči pravo elektromagnetno sevanje, pač pa naprave izkoriščajo kapacitivni ali induktivni sklop bližnjega statičnega polja, kar ni ravno radio v ožjem pomenu besede.

Kljub temu se področje uporabnih radijskih frekvenc razprostira čez več kot sedem velikostnih razredov oziroma dosti več kot marsikateri 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 skalarne 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 magnetne poljske jakosti povsem enakovredno kompleksni električni moči $P = 1/2 U I^*$!

Hkrati z osnovnimi enačbami elektromagnetnega polja so bila razvita tudi računska orodja. Čeprav je skalarni potencial in vektorski potencial vpeljal že Maxwell, šele premišljena izbira izvornosti vektorskega potenciala (Ludvig Lorenz 1888) omogoča uporaben zapis enačb zakasnenjenih potencialov. Skalarni potencial $V(\vec{r})$ in vektorski potencial $\vec{A}(\vec{r})$ omogočata izračun

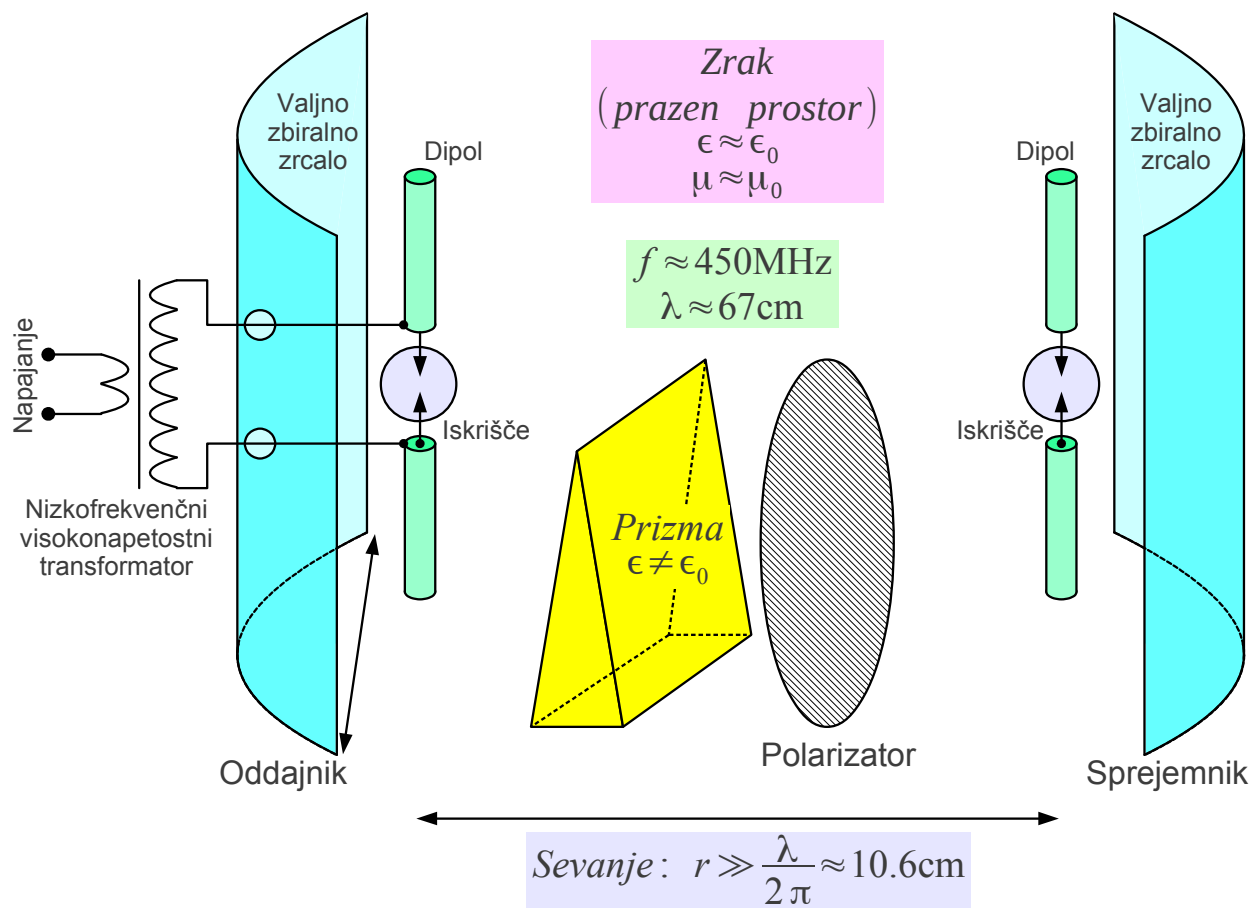
električnega polja $\vec{E}(\vec{r})$ in magnetnega polja $\vec{H}(\vec{r})$ v točki \vec{r} iz znanih virov, elektrin $\rho(\vec{r}')$ in tokov $\vec{J}(\vec{r}')$ na koordinatah \vec{r}' .

Končno so Maxwellove enačbe napovedale tudi elektromagnetno valovanje oziroma povezavo med električnimi in magnetnimi pojavi ter svetlobo, kar je Heinrich Rudolf Hertz potrdil z različnimi poskusi v obdobju 1886-1889. 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 energije v visokofrekvenčno energijo je sicer slab. Ustvarjeno visokofrekvenčno nihanje je močno dušeno, torej kratkotrajno. Hertz je uporabil iskrišče tudi kot visokofrekvenčni detektor v rezonatorju (dipolu) sprejemnika. Domet svoje naprave je močno izboljšal z valjnima zbiralnima zrcaloma velikosti $2\text{m} \times 1.2\text{m}$ v oddajniku in sprejemniku ter tako pokazal odboj in razširjanje elektromagnetnega valovanja frekvence okoli $f \approx 450\text{MHz}$.

Hertzovi poskusi so vsebovali pomembno podrobnost, ki je večina ni opazila. Hertz je kot prvi opazil elektromagnetno sevanje na dovolj velikih razdaljah $r \gg \lambda/2\pi$, ki se obnaša drugače od kapacitivnega oziroma induktivnega sklopa na nižjih frekvencah oziroma manjših razdaljah:



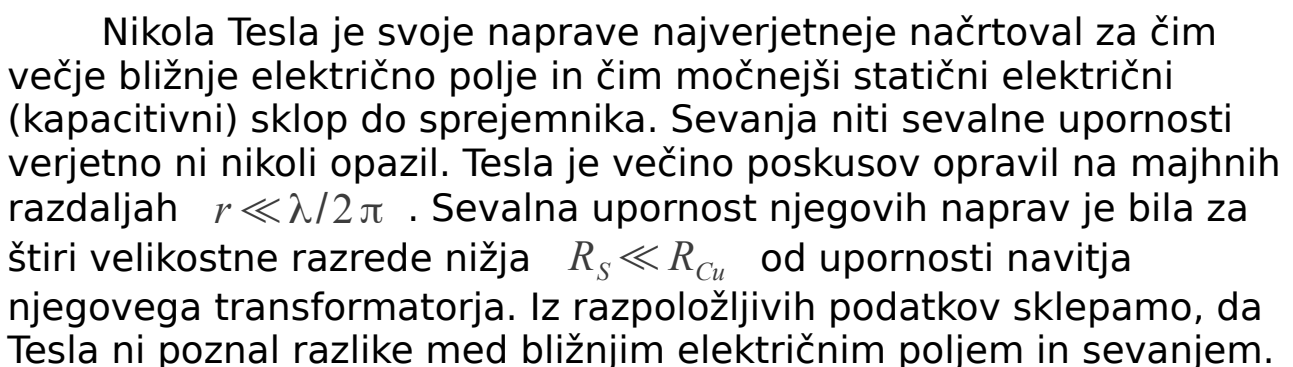
Z obračanjem sprejemnika in oddajnika ter vstavljanjem različnih ovir (prizma iz dielektrika, polarizator iz vzporednih kovinskih žic) v radijsko pot je Hertz pokazal še polarizacijo in lom elektromagnetnega valovanja. Vsi Hertzovi poskusi so se natančno ujemali z Maxwellovo teorijo na eni strani ter 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 takratnih 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

Praktične izvedbe kratkih električnih dipolov so Teslovi transformatorji 1891-1900. Čeprav natančni podatki niso znani, iz razpoložljivih virov sklepamo, da je Nikola Tesla izdelal naprave vse do višine $h \approx 30\text{m}$, ki so proizvajale izredno visoke napetosti na frekvencah pod $f \leq 30\text{kHz}$:



Daljijsko vodena ladjica Nikole Tesle iz leta 1898 je sicer

predstavljala izum daleč pred svojim časom, ki pa je bil podobno kot ostali Teslovi poskusi zelo omejen z dometom. Nikola Tesla je sicer že uporabljal občutljivejši visokofrekvenčni sprejemnik: koherer. Koherer, ki ga je izumil Eduard Branly leta 1890, izkorišča preboj oksidirane površine med zrnca kovine, kar se zgodi pri več kot desetkrat nižji napetosti od preboja iskrišča v zraku $U \approx 100V$.

Še občutljivejši detektor je izdelal indijski znanstvenik Jagdish Chandra Bose s kristalom svinčevega galenita PbS leta 1894 in z njim uspešno zaznal frekvence, ki jih danes imenujemo mikrovalovi. Tehnika na koncu 19. stoletja sicer ni bila naklonjena mikrovalovom in Bosejev polprevodniški detektor je moral počakati še pol stoletja do uporabe v radarju v drugi svetovni vojni. Nizozemec Christian Hülsmeijer je leta 1906 sicer uspešno zaznal ladjo skozi gosto meglo s pomočjo kohererja, kar velja za prvi uspešen poskus radarja.

Od vseh izumiteljev na prelomu iz 19. v 20. stoletje je bil daleč najuspešnejši italijanski inženir Gulielmo Marconi. Marconi je že od začetka izbral pravi cilj, vzpostaviti radijsko zvezo (komunikacijo) na čim večji razdalji. Brezžični prenos energije niti drugi fizikalni pojavi (iskre v velikem električnem polju) Marconija niso zanimali. Podobno kot drugi izumitelji tistega časa (Tesla) je tudi Marconi iskal svoj cilj z vztrajnim poizkušanjem brez globljega teoretskega predznanja. Povrhu je Marconi znal združiti najboljše dosežke številnih drugih izumiteljev (tudi Tesle) v delujočo in praktično uporabo napravo.

Vztrajni poskusi s pravim ciljem so se obrestovali. Kmalu po prelomu stoletja je Gulielmo Marconi uspel vzpostaviti prvo prekooceansko radijsko zvezo. Pri tem je z manjšimi in cenejšimi napravami prehitel tudi ogromi, dragi, nikoli dokončani in neuspešni veliki oddajnik Nikole Tesle, stolp Wardenclyffe višine kar $h=57m$. Marconi je za svoje dosežke prejel leta 1909 Nobelovo nagrado iz fizike. V javnosti je bolj odmevala vloga Marconijevih naprav v brodolomu ladje Titanic leta 1912, kjer je izgubil življenje tudi tesni Marconijev sodelavec.

Gulielmo Marconi je utemeljil tudi elektrotehnični izraz "antena". Antena je ime za napravo, ki pretvarja vodeno elektromagnetno valovanje v sevanje ali obratno. Marconi je novo napravo poimenoval iz podobnosti s tipalkami žuželk in drugih živali, ki se v latinščini imenujejo antene. Za razliko od Nikole Tesle, ki v svojih napravah ni videl sevanja, pač pa le statično polje kondenzatorja in je napravo poimenoval elektroda oziroma priključek (terminal).

Istočasno z Marconijevimi uspehi se je menjalo tudi ime valovanja in pripadajočih naprav. Izraz Hertzovi valovi je okoli leta 1910 zamenjal izraz radijski valovi. Pripadajoče naprave so dobile novo ime radio. Radijsko zvezo so poimenovali tudi brezvrvična zveza (wireless).

Nadaljnji razvoj radia je zaznamoval razvoj elektronike. Leta 1904 je John Ambrose Fleming razvil vakuumsko diodo, ki je občutljiv in zanesljiv detektor radijskih signalov. Lee De Forest je leta 1906 izumil vakuumsko triodo, prvi elektronski ojačevalnik. Američan Edwin Howard Armstrong in Avstrijec Alexander Meissner sta leta 1912 skoraj istočasno izdelala prve elektronske oscilatorje s triodo, ki se jih da uporabiti učinkovit radijski oddajnik oziroma kot izredno občutljiv regenerativni sprejemnik.

V obdobju druge svetovne vojne se je radijska tehnika tako razvila, da je poleg brezvrvične komunikacije omogočala tudi daljinsko zaznavanje, radiolokacijo in radijsko navigacijo. Vse velesile druge svetovne vojne: Velika Britanija, ZDA, Nemčija, Sovjetska Zveza, Japonska, Nizozemska, Francija, Italija so poznale bolj ali manj uspešen radar.

Po koncu druge svetovne vojne je radio izgledal najboljše sredstvo za komunikacijo velike zmogljivosti na velike razdalje, še posebno z izstrelitvijo prvega umetnega Zemljinega satelita in začetkom vesoljske tekme leta 1957. Radio je dobil pomembnega tekmeca pri visokih zmogljivostih na velikih razdaljah šele leta 1970 z izdelavo uporabnega svetlobnega vlakna v tovarni Corning. Končno predstavlja pomemben mejnik še prvo radijsko paketno omrežje ALOHAnet Univerze Hawaii leta 1971.

Danes (2017) je svetlobno vlakno izpodrinilo radio na srednjih razdaljah pri najvišjih zmogljivostih. Eno samo svetlobno vlakno omogoča zvezo večje zmogljivosti od vsote zmogljivosti vseh do danes izstreljenih telekomunikacijskih umetnih satelitov. Radio ostaja nenadomestljiv pri največjih razdaljah v vesolju. Hkrati radio pridobiva na pomenu neodvisno od razdalje povsod tam, kjer je kakršnakoli vrstica nezaželjena oziroma neuporabna.

Poštena primerjava razvoja radia upošteva teorijo informacije, ki jo je razvil Claude Shannon leta 1948. Poleg zmogljivosti zveze $C[\text{bit/s}=\text{bps}]$ je pomembna tudi spektralna učinkovitost $C/B[\text{bit/s/Hz}=\text{bit}]$, saj je radiofrekvenčni spekter omejena

naravna dobrina:

Zmogljivost radijske zveze

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

$W_s \equiv$ energija signala

$W_N \equiv$ energija šuma

$T \equiv$ perioda signala

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

$P_s \equiv$ moč signala

$P_N \equiv$ moč šuma

$N_0 \equiv$ spektralna gostota šuma

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

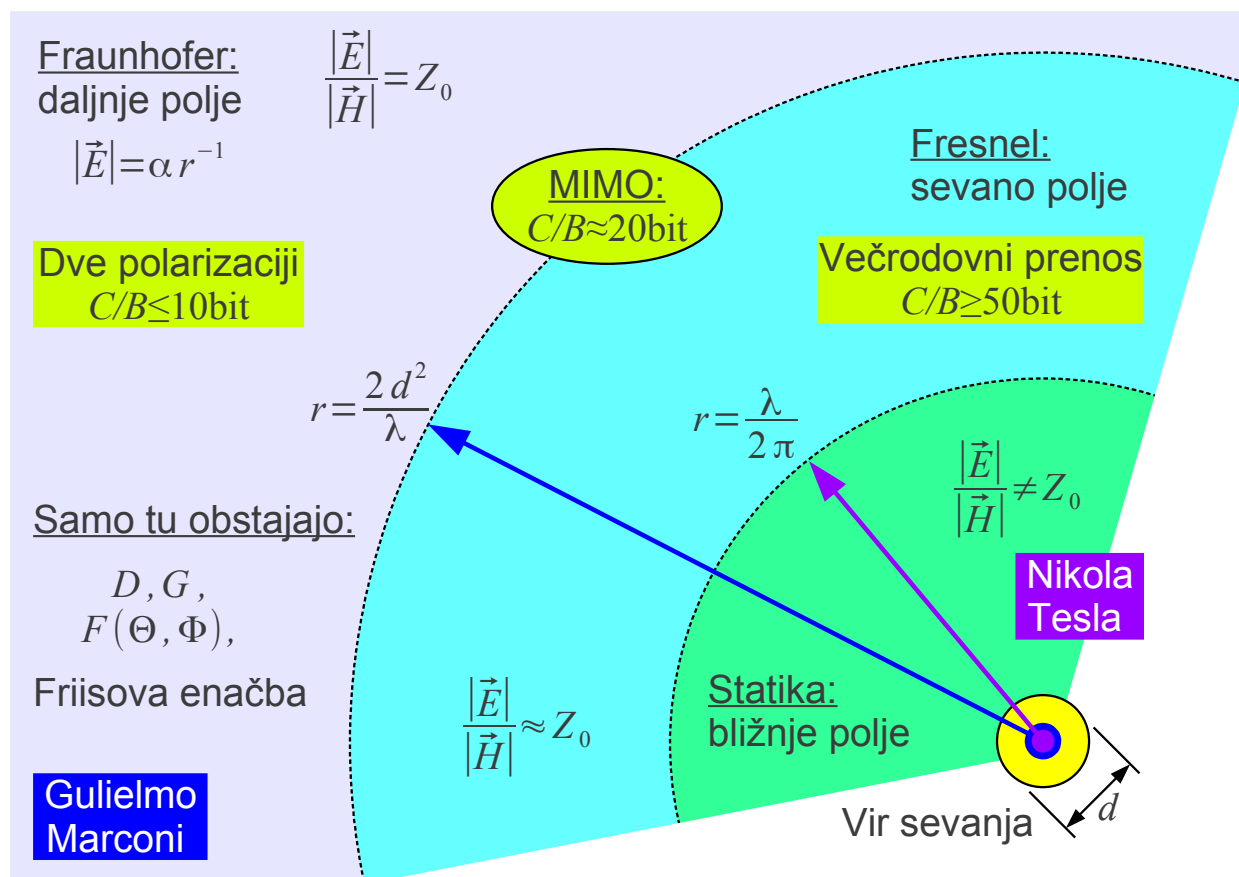
$m \equiv$ število rodov

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

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

Brezstično daljinsko zaznavanje oziroma brezvrvično komunikacijo s pomočjo elektromagnetnih pojavov lahko razdelimo po načinu delovanja v tri velike skupine:

- (1) statika oziroma bližnje polje (angleško: near-field region, reactive),
- (2) Fresnelovo področje oziroma sevano polje (angleško: near-field region, radiating) in
- (3) Fraunhoferjevo področje oziroma daljnje polje (angleško: far-field region):



Statika, Fresnel in Fraunhofer

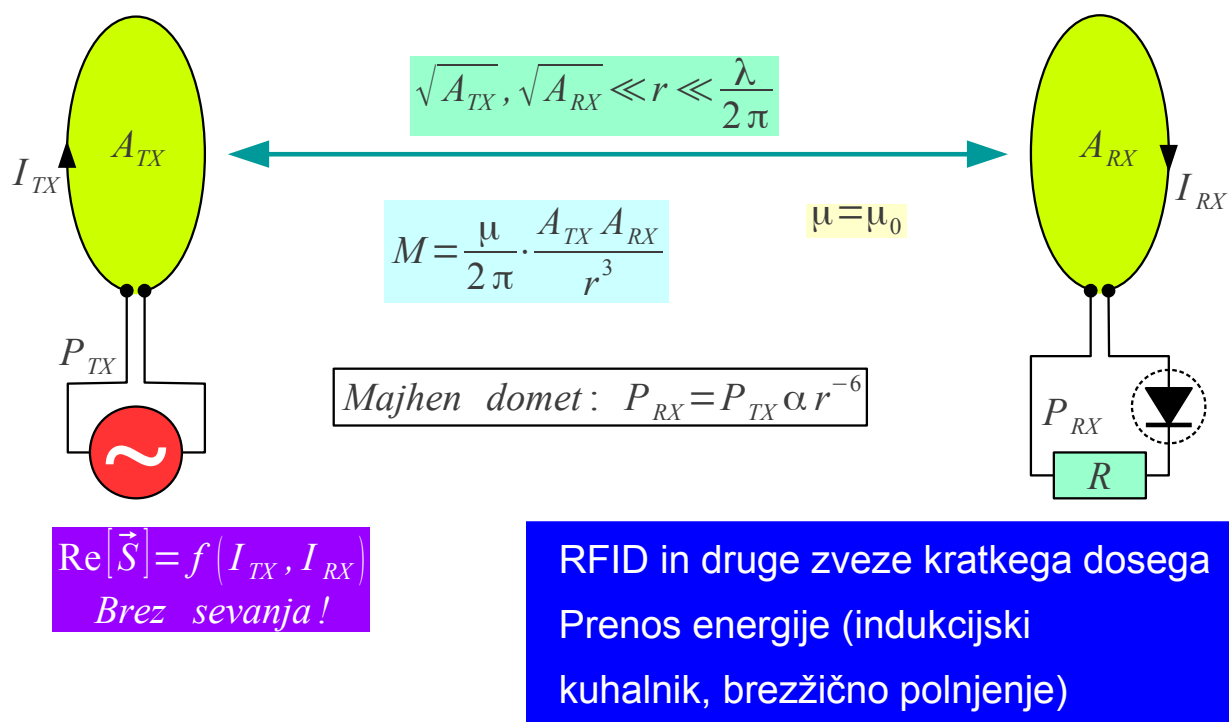
Bližnje polje prevladuje na razdaljah $r \ll \lambda/2\pi$, ki so dosti manjše od valovne dolžine. V bližnjem polju sta električno polje \vec{E} in magnetno polje \vec{H} dve neodvisni veličini. Elektromagnetno sevanje je v bližnjem polju zanemarljivo $|\vec{E}_{\text{sevani}}| \ll |\vec{E}_{\text{statični}}|$ in $|\vec{H}_{\text{sevani}}| \ll |\vec{H}_{\text{statični}}|$ v primerjavi s statičnim elektromagnetnim poljem. Bližnje polje upada s tretjo potenco razdalje $|\vec{E}_{\text{statični}}| = \alpha r^{-3}$ oziroma $|\vec{H}_{\text{statični}}| = \alpha r^{-3}$.

Zvezo v bližnjem polju popolnoma opiše kapacitivni oziroma induktivni sklop med oddajnikom in sprejemnikom. Na majhnih razdaljah $r \ll \lambda/2\pi$ je kakršenkoli fazni zasuk $\Delta\phi = 2\pi r/\lambda \ll 1 \text{rd}$ izredno majhen, zato ne moremo govoriti o valovanju. Ker sta bližnje električno in magnetno polje v kvadraturi, ima bližnje polje skoraj popolnoma jalov Poyntingov vektor $\text{Re}[\vec{S}] \rightarrow 0$. Brez prenosa delovne moči prav tako ne moremo govoriti o valovanju.

Nikola Tesla je v svojih poskusih večinoma uporabljal kapacitivni sklop v praznem prostoru med oddajnikom in sprejemnikom. Sodobne naprave, RFID in druge zveze kratkega

dosega, uporabljajo v bližnjem polju večinoma induktivni sklop. S stališča teorije sta to sicer dva različna pojava, ki pa imata enako omejitev. Na velikih razdaljah $r \gg \sqrt{A_{TX}}, \sqrt{A_{RX}}$ sprejeta moč upada s šesto potenco razdalje $P_{RX} = P_{TX} \propto r^{-6}$, zato je domet takšnih naprav majhen:

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



Induktivni sklop v bližnjem polju

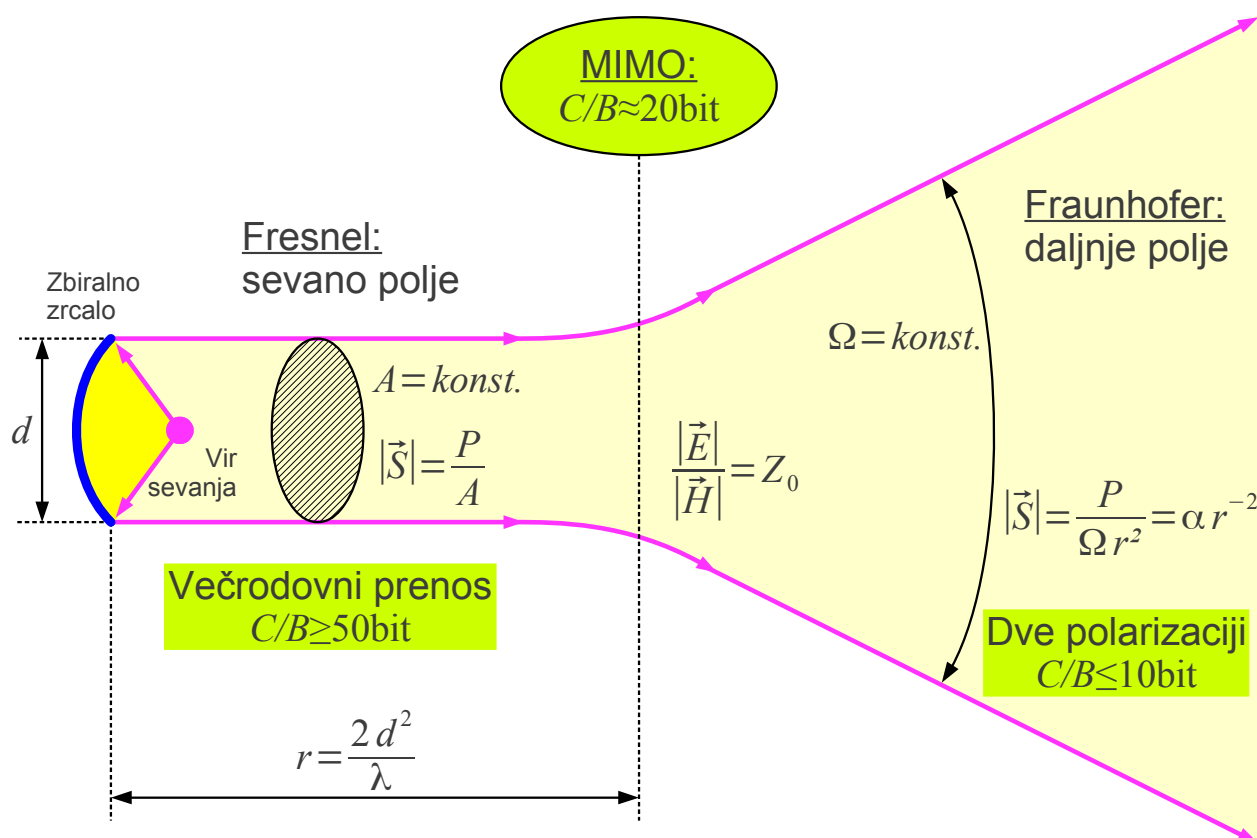
Ker je Poyntingov vektor samega oddajnika skoraj popolnoma jalov $\text{Re}[\vec{S}] \rightarrow 0$, oddajnik skoraj nič ne seva. Delovna komponenta Poyntingovega vektorja $\text{Re}[\vec{S}] \neq 0$ se pojavi šele takrat, ko sta tokova prisotna v obeh, I_{TX} v oddajniku in I_{RX} v sprejemniku in sta med sabo v kvadraturi! Ker se pri induktivnem oziroma kapacitivnem sklopu nič moči ne izgublja v prostor, je takšen prenos energije lahko zelo učinkovit, na primer v indukcijskem kuhalniku oziroma v brezžičnem polnilcu.

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

koordinatnem izhodišču. Statično polje $\vec{E}_{\text{statični}}$ oziroma $\vec{H}_{\text{statični}}$ lahko ima tudi vzdolžno komponento $\vec{1}_r$ v krogelnih koordinatah, vendar to ni valovanje. 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!

Na večjih razdaljah $r \gg \lambda/2\pi$ postaneta električno in magnetno polje med sabo pravokotna, sofazna in njuno razmerje se približuje točni vrednosti $|\vec{E}|/|\vec{H}| \rightarrow Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$. Poyntingov vektor postane realen $\text{Im}[\vec{S}] \rightarrow 0$ in predstavlja delovno moč, ki se iz oddajnika širi v neskončnost v isti smeri, kamor valovanje potuje.

Elektromagnetno sevanje antene običajno dodatno razdelimo na dve področji: Fresnelovo področje in Fraunhoferjevo področje. V obeh področjih bližnje statično polje izgine. Razliko med Fresnelovim in Fraunhoferjevim področjem najlažje opišemo z zgledom zrcalne antene:



Rayleighjeva razdalja

Vir sevanja postavimo v gorišče zbiralnega zrcala. Takoj po

odboju valovanja od zrcala so žarki vzporedni. Valovanje najprej potuje po snopu konstantnega preseka $A = konst.$. Na določeni razdalji se začne snop širiti. Na velikih razdaljah se valovanje širi naprej v stožcu s konstantnim prostorskim kotom $\Omega = konst.$.

Mejo med geometrijsko (žarkovno) optiko in razširjanjem valovanja je postavil Lord Rayleigh leta 1891. Ker je prehod med obema področjema zvezen in zelo blag, je izbira meje odvisna od dopustne napake. Pri radijskih antenah običajno uporabljamo zelo strogo mejo za napako faze $\Delta\phi < \pi/8$, kar določa Rayleighovo razdaljo $r = 2d^2/\lambda$.

Radijske antene običajno uporabljamo v Fraunhoferjevem področju daljnega polja $r > 2d^2/\lambda$. V Fraunhoferjevem področju se valovanje razširja v konstanten prostorski kot $\Omega = konst.$. Gostota pretoka moči upada s kvadratom razdalje $|\vec{S}| = \alpha r^{-2}$. V daljnem polju lahko z anteno vzbudimo samo dva neodvisna rodova, dve med sabo pravokotni polarizaciji prečnega elektromagnetnega valovanja.

Fresnelovo področje $r < 2d^2/\lambda$ si najlažje predstavljamo z žarkovno optiko. V Fresnelovem področju lahko s parom zrcal prenašamo sliko, sestavljeno iz mnogih neodvisnih slikovnih točk (pikslov). Vsaka neodvisna slikovna točka podpira še dve neodvisni, med sabo pravokotni polarizaciji.

V Fresnelovem področju je torej možen prenos množice med sabo neodvisnih rodov, ki prenašajo neodvisne informacije. Spektralna učinkovitost večrodovnega prenosa C/B je lahko izredno visoka. Ker se v Fresnelovem področju snop valovanja še ne razširja, lahko sprejemnik ujame večino moči oddajnika.

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.

* * * * *