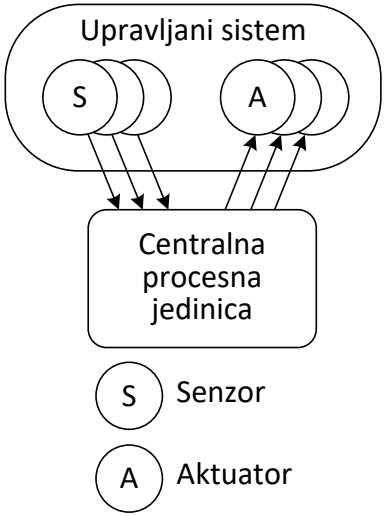
Bežični mreže i uređaji

VIII semestar

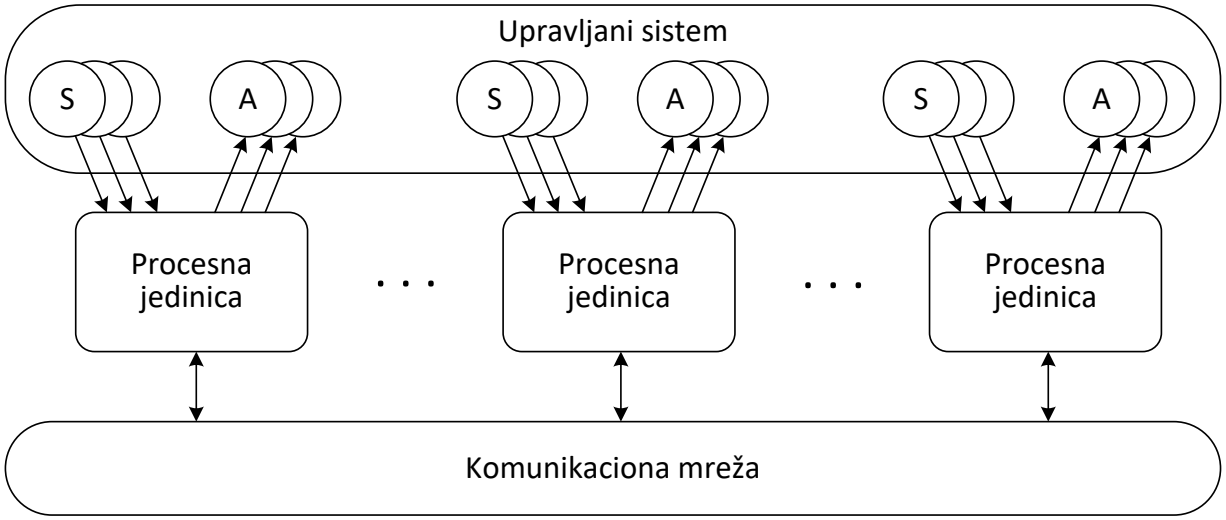
Elektronika

Bežični mreže i uređaji

- Predmet je mogao i ovako da se nazove: **Bežični distribuirani embeded sistemi**



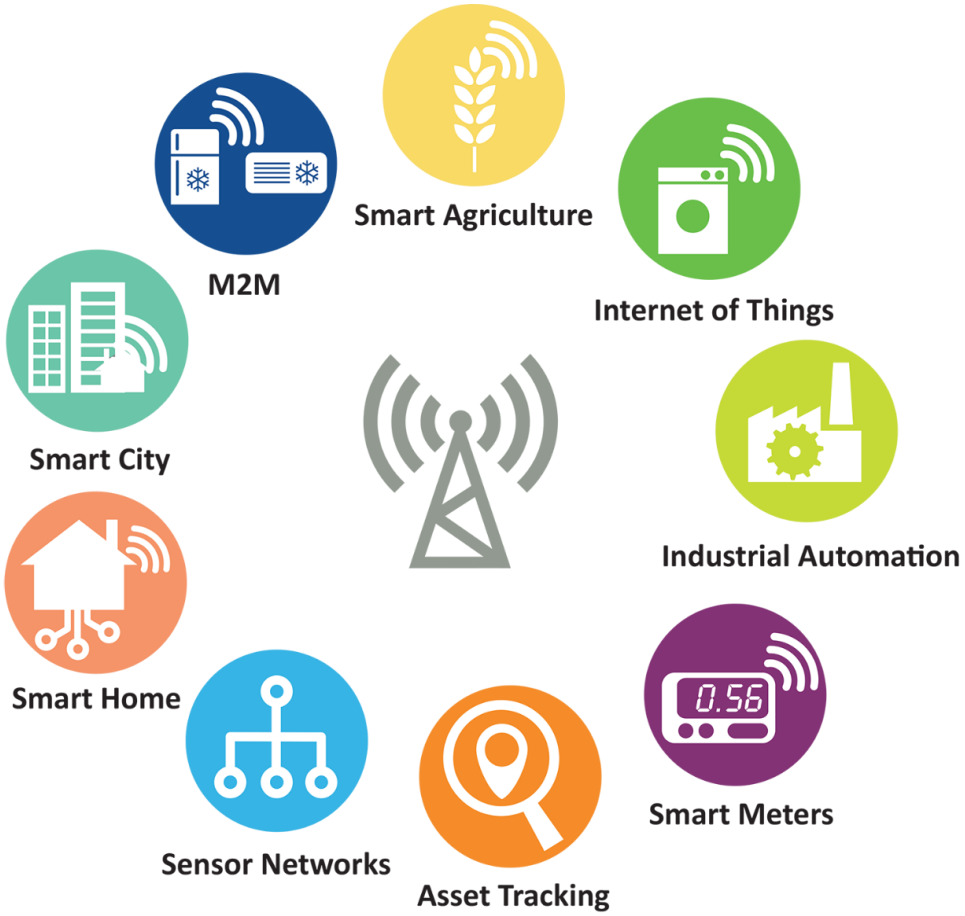
Centralizovani embeded sistem



Distribuirani embeded sistem

Komunikacija između čvorova – žičana ili **bežična**

Bežični mreže i uređaji



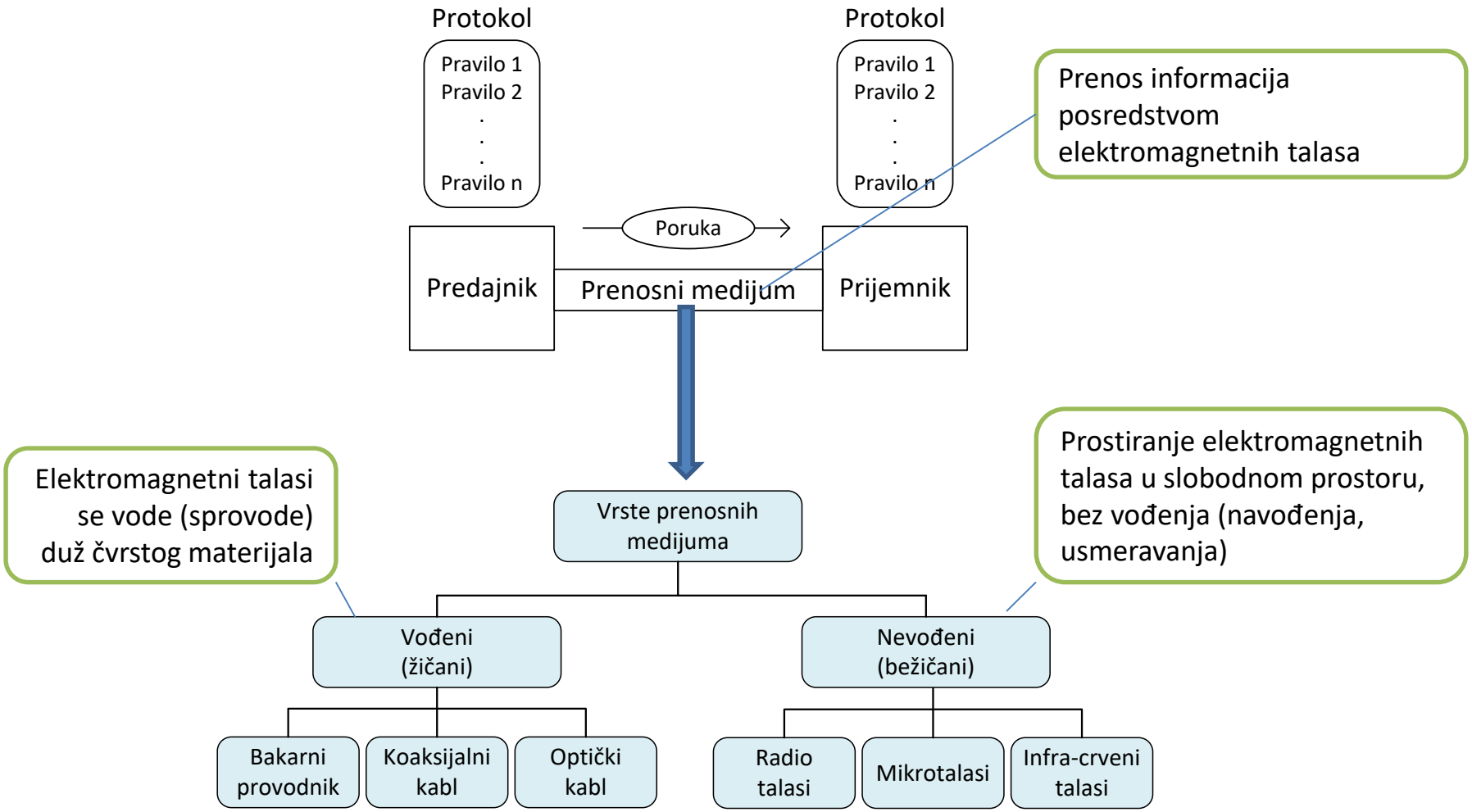
Sadržaj

- Bežična komunikacija (na fizičkom nivou)
- Pametni uređaji
- RFID/NFC
- Bežične mreže (arhitektura)
- WLAN (WiFi - 802.11)
- WPAN
  - 802.15.4
  - ZigBee
  - Bluetooth LE
- WAN (LPWAN)
  - LoRa i LoRaWAN
- IoT
  - MQTT
- Radio lokalizacija
  - GPS
  - UWB

Bežična komunikacija

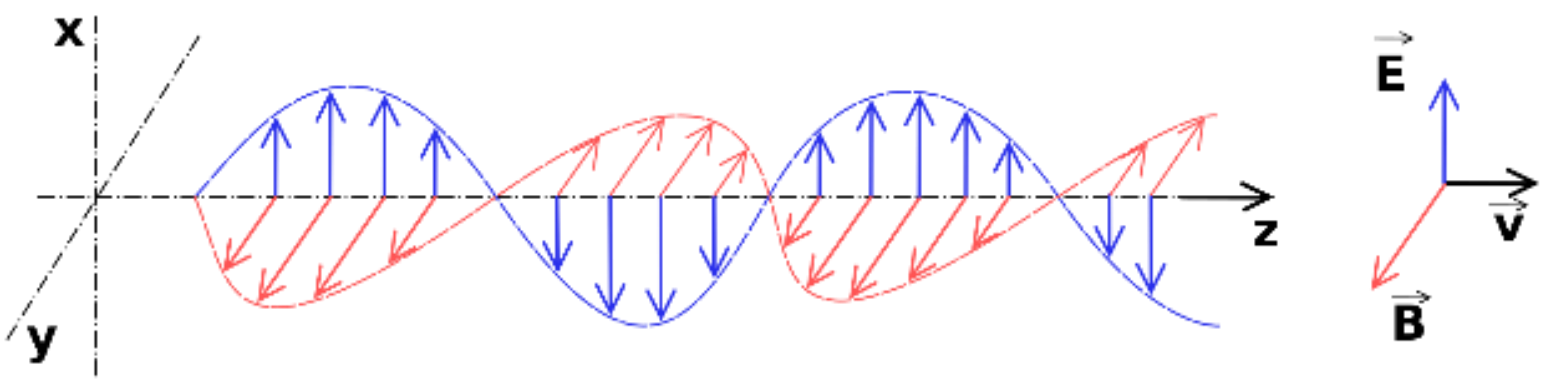
- Prenosi medijum
- Elektromagnetski spektar
- Antene
- Prostiranje radio talasa
- Prostiranje po više putanja
- Modulacija i demodulacija
- Kontrola ispravnosti prenosa

Prenosni medijum



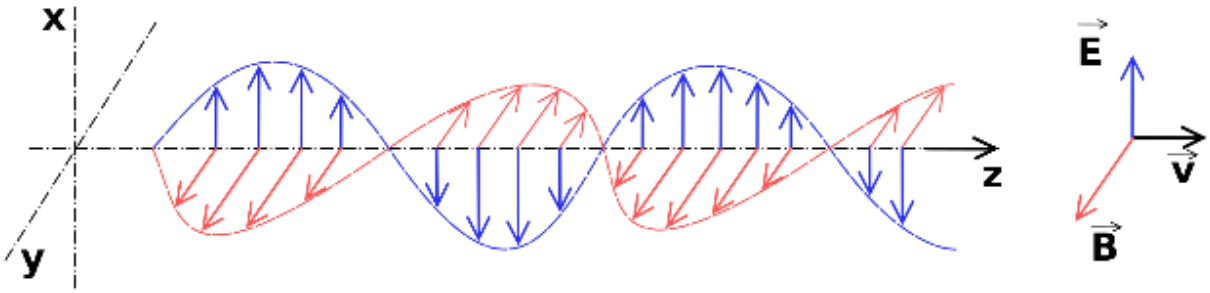
Elektromagnetsko zračenje

- Elektromagnetni talas (ili, zračenje) - kombinacija oscilujućeg električnog i magnetnog polja koja zajedno putuju kroz prostor u obliku međusobno upravnih talasa
- U svakoj tački prostora, električno polje, E, i magnetno polje, B, se neprekidno menjaju, tako da kad intenzitet električnog polja raste, magnetnog opada, i obrnuto - oba polja osciluju istom frekvencijom, ali oscilacije su fazno pomerene za 90^0.

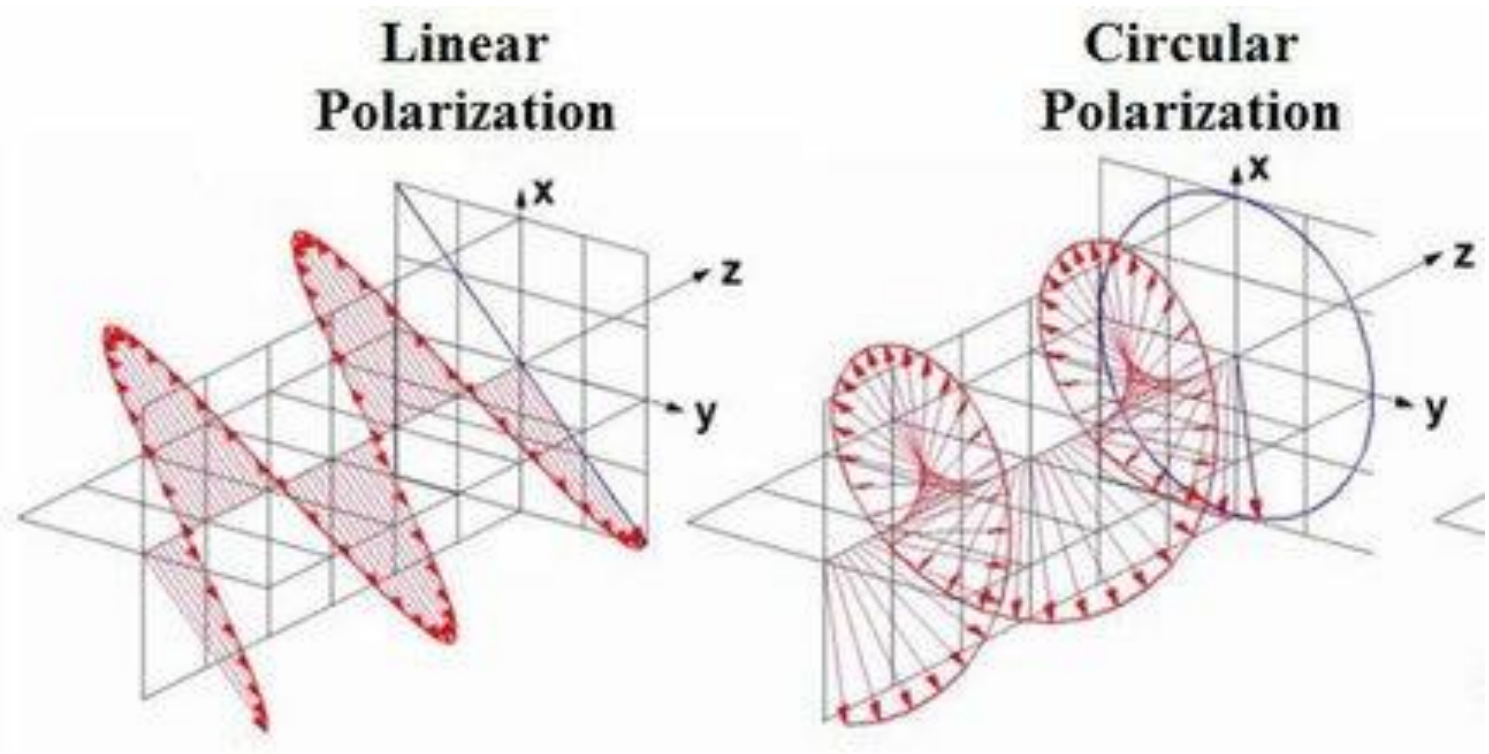


Elektromagnetsko zračenje

- Polarizacija elektromagnetnog talasa - Orijentacija vektora $\vec{E}$ i $\vec{B}$ u odnosu na pravac prostiranja ($\vec{v}$)
- Linearna polarizacija - $\vec{E}$ i $\vec{B}$ ne menjaju orijentaciju duže pravca prostiranja talasa. U odnosu na ugao između $\vec{E}$ i površine Zemlje:
  - Vertikalna polarizacija ($\vec{E}$ je upravan na površinu Zemlje - kao na slici ispod)
  - Horizontalna polarizacije ($\vec{B}$ je upravan na površinu Zemlje)
- Cirkularna polarizacija: vektori $\vec{E}$ i $\vec{B}$ nemaju fiksnu orijentaciju, već rotiraju u ravni koja je upravna na pravac prostiranja.
- Polarizacija zavisi od tipa emisione antene



Elektromagnetsko zračenje



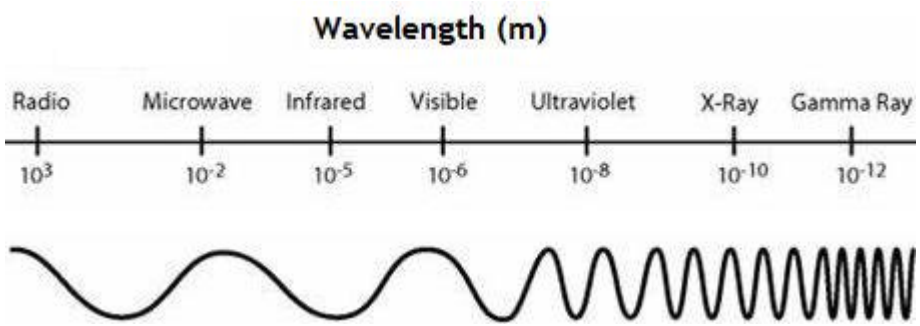
Prikazano je samo električno polje ($\vec{E}$)

Elektromagnetni spektar

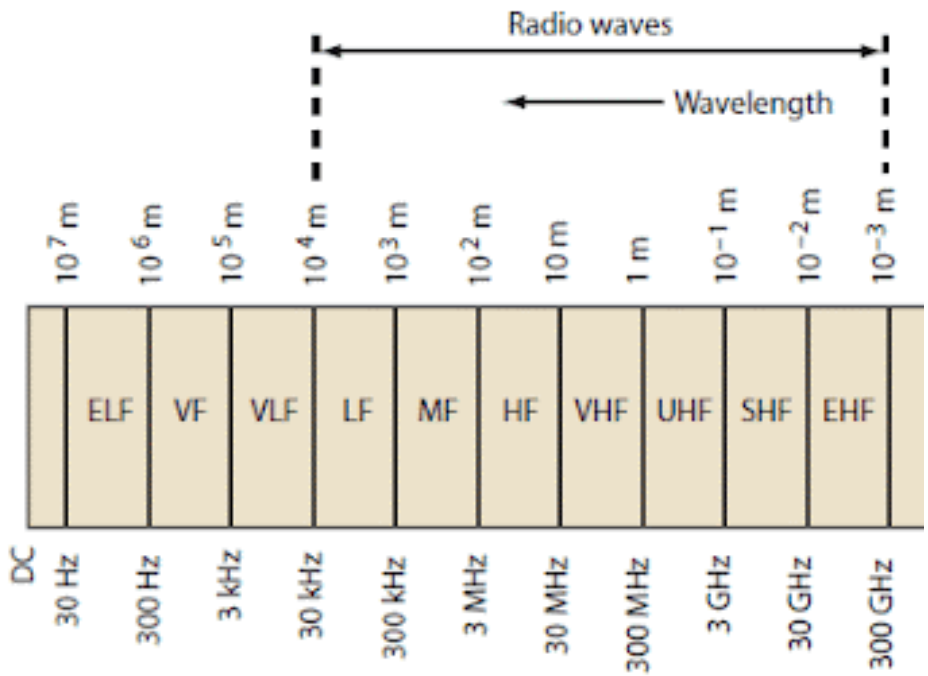
- Elektromagnetni spektar: obuhvata sve tipove elektromagnetnog zračenja u prirodi
- Podela prema frekvenciji (talasnoj dužini) →

	Frekventni opseg
Gama zračenje	$> 3 \times 10^{19} Hz$
X-zračenje	$3 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}\ Hz$
Ultraljubičasta radijacija	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{16}\ Hz$
Vidljiva svetlost	$400 - 700\ GHz$
Infracrvena radijacija	$300 - 400\ GHz$
Mikrotalasi	$\mathbf{1 - 300\ GHz}$
Radio talasi	$\mathbf{< 1\ GHz}$

- U bežičnim komunikacijama, od interesa su:
  - Radio talasi: neusmereno zračenje, veliki domet
  - Mikrotalasi: usmereno zračenje, manji domet



Elektromagnetni spektar u telekomunikacijama



ELF	Extremely low frequency
VF	Voice frequency
VLF	Very low frequency
LF	Low frequency
MF	Medium frequency
HF	High frequency
VHF	Very high frequency
UHF	Ultrahigh frequency
SHF	Superhigh frequency
EHF	Extremely high frequency

Upravljane elektromagnetnim spektrom (kao prirodnim resursom) je u nadležnosti je regulatornih tela (nacionalnih i međunarodnih), čiji je zadatak da obezbede fer korišćenje raspoloživog spektra na dobrobit celog društva.

Upotreba spektra

- *Spektar dodeljen operateru*:
  - Određeni deo radio spektra se dodeljuje na ekskluzivno korišćenje provajderu komunikacionih usluga (npr. mobilna telefonija).
- *Spektar dodeljen servisu*:
  - Delovi spektra rezervisani za određene servise
  - Korisnici servisa (ili uređaja) mogu da koriste (sertifikovanu) opremu bez traženja odobrenja od regulatornog tela.
  - Sistemi/uređaji autonomno sprečavaju interferenciju sa drugim sistemima u istom geografskom regionu.
  - Ograničenje u snazi zračenja
- *Slobodan spektar*:
  - Dostupan za slobodno korišćenje
  - ISM band na frekvenciji $2.45\ GHz$ je najpoznatiji primer slobodnog spektra (mikrotalasne pećnice, WiFi i Bluetooth).
  - Međutim, emitovanje u ISM bendu je podložno striktnoj regulativi, u smislu maksimalne snage zračenja, vremena emitovanja i sl.

Upotreba spektra

$< 100\ MHz$	Amaterski radio; pejdžeri i analogni bežični telefoni
$400 - 500\ MHz$	Zemaljski radio i televizija
$800 - 1000\ MHz$	Mobilna telefonija (analogna i 2G); komunikacioni sistemi za hitne slučajeve
$1.8 - 2.1\ GHz$	Uglavnom za mobilnu telefoniju (2G i 3G)
$2.4 - 2.5\ GHz$	ISM bend. Bežični telefoni; WLAN, bežični PAN, i mnogi drugi uređaji i sistemi
$3.3 - 3.8\ GHz$	Rezervisano za fiksne bežične sisteme
$4.8 - 5.8\ GHz$	Većina WLAN
$11 - 15\ GHz$	Satelitski TV servisi

Upotreba spektra

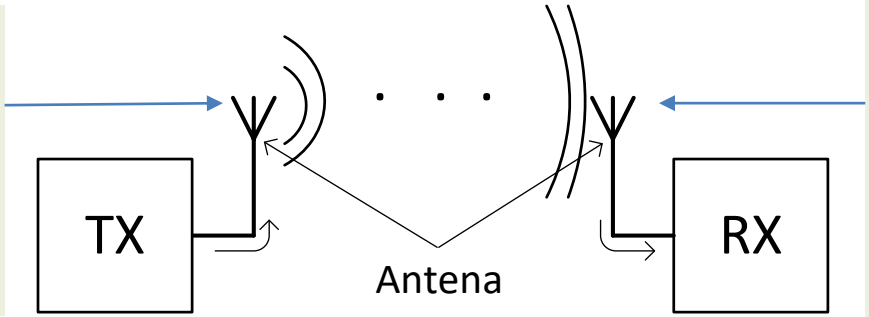
- **Radio talasi (< 1GHz)**:
  - Prostiranje sa manjim slabljenjem, neusmereno prostiranje - mogućnost da se pokrije veća oblast nego talasima viših frekvencija
  - Ponovna upotreba istog frekventnog opsega (u prostornom smislu) nije efikasna (zbog prethodnog)
  - Apsolutni propusni opseg (razlika između najviše i najniže frekvencije bandu/kanalu) je manji na nižim frekvencijama, što znači da nije moguće ostvariti veliku brzinu prenosa podataka.
  - Za servise koji zahtevaju dobru pokrivenost, ali malu zbirnu brzinu prenosa informacije

- **Mikrotalasi (> 1GHz):**
  - Veće slabljenje – manji domet
  - Usmereno zračenje – optimalno za komunikaciju „tačka-tačka“
  - Mogućnost ponovne upotrebe istog frekventnog opsega u drugom geografskom području
  - Veći propusni opseg – veća brzina prenosa podataka
  - Za servise koji zahtevaju veliku brzinu prenosa na manjim rastojanjima

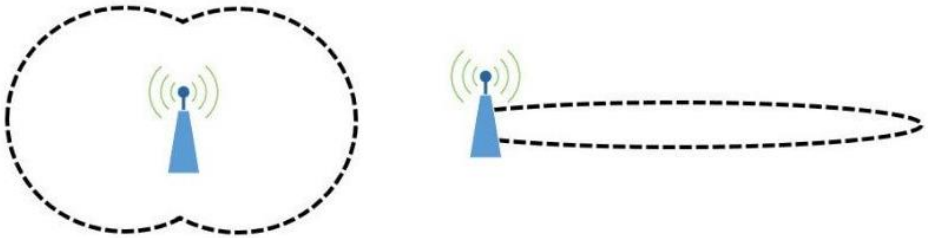
Antene

- **Antena** - električni provodnik ili sistem provodnika koji se koristi kako za emitovanje (zračenje) elektromagnetne energije tako i za prijem (prikupljanje) elektromagnetne energije

Predajna antena
Emituje (zrači) elektromagnetnu energiju u medijum



Prijemna antena
Prima (prikuplja, apsorbuje) elektromagnetnu energiju iz okruženja

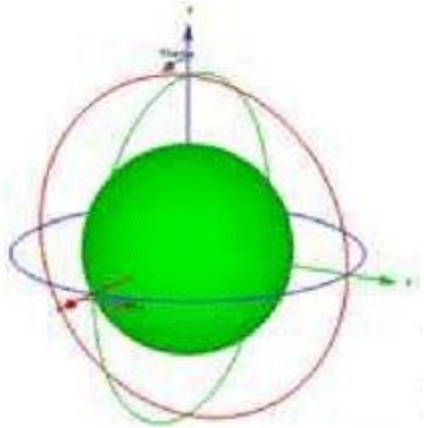


Neusmerene (*omnidirectional*) antene:
Emitovana energija se prostire u svim pravcima

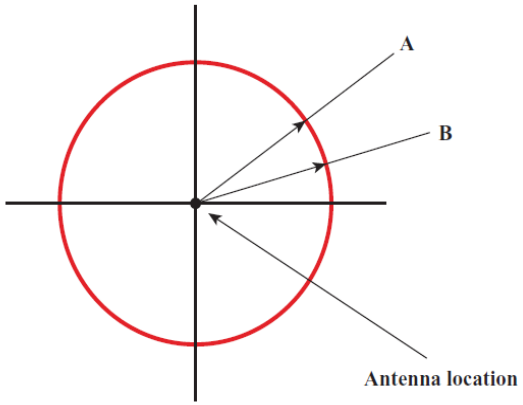
Usmerene (*directional*) antene:
Predajna antena fokusira energiju u elektromagnetni zrak

Dijagram zračenja

- Antena emituje elektromagnetnu energiju u svim pravcima, ali obično ne i sa podjednakim intenzitetom u svim pravcima
- Dijagram zračenja: grafički prikaz svojstava zračenja antene u funkciji prostornih koordinata
- *Izotropna antena*:
  - Podjednako zrači u svim pravcima
  - Idealizovan antena (ne postoji u stvarnosti), koristi se kao teorijska referenca za karakterizaciju performansi drugih tipova antena



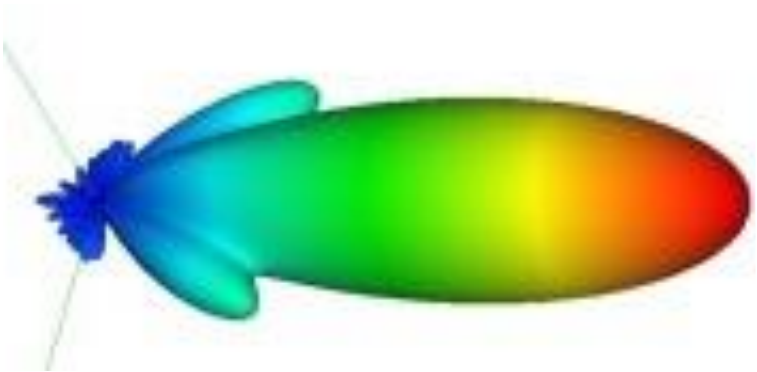
Dijagram zračenja izotropne antene: sfera sa centrom u anteni



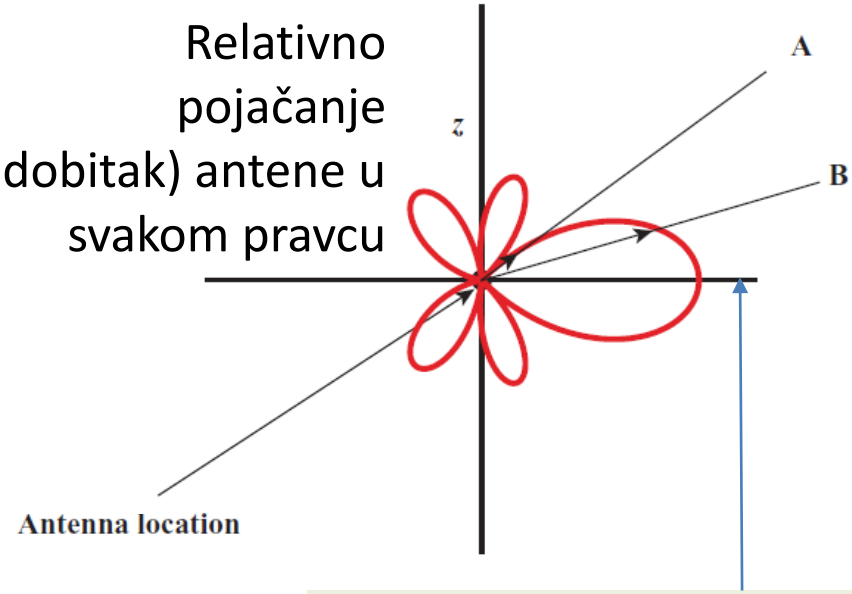
Dijagrami zračenja su prikazani kao dvodimenzionalni poprečni preseci trodimenzionalnog oblika u horizontalnoj i vertikalnoj ravni

Dijagram zračenja

- *Usmerena antena*: dijagram zračenja - glavni snop i više sporednih snopova (listova)



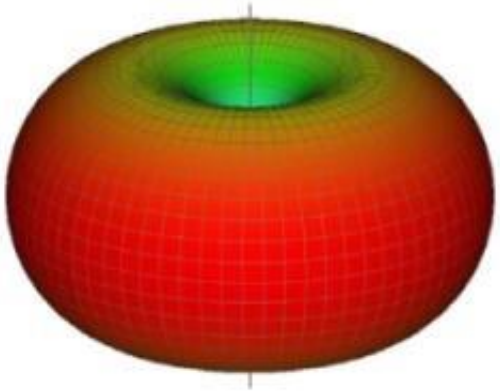
Relativno pojačanje (dobitak) antene u svakom pravcu

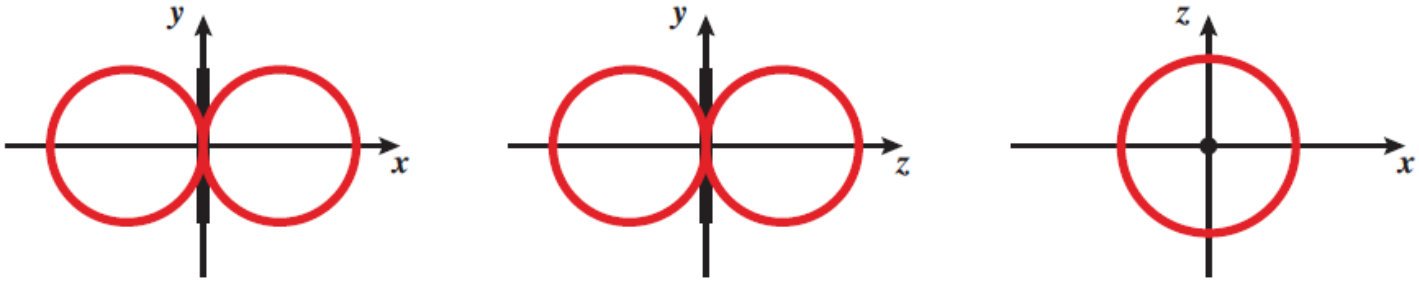


Osa maksimalnog zračenja

Dijagram zračenja

- *Omnidirekciona antena*: u nekim ravnima zračenje je izotropno (ili skoro izotropno), dok je u drugim usmereno.

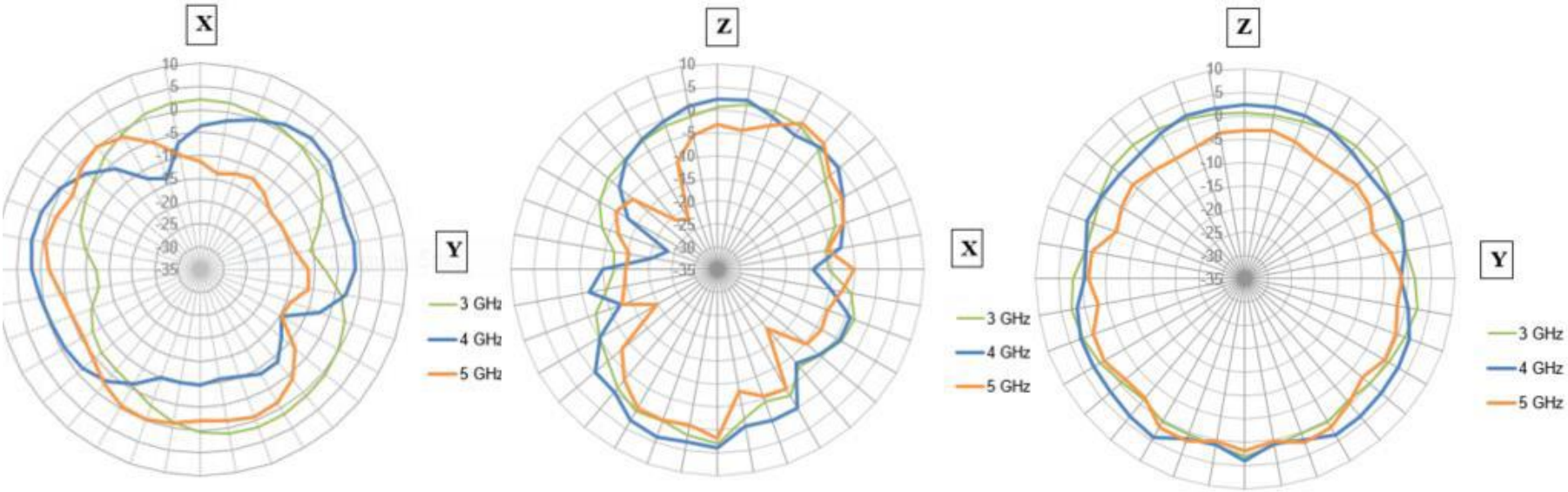




Side view (*xy*-plane) Side view (*zy*-plane) Top view (*xz*-plane)

Dijagram zračenja

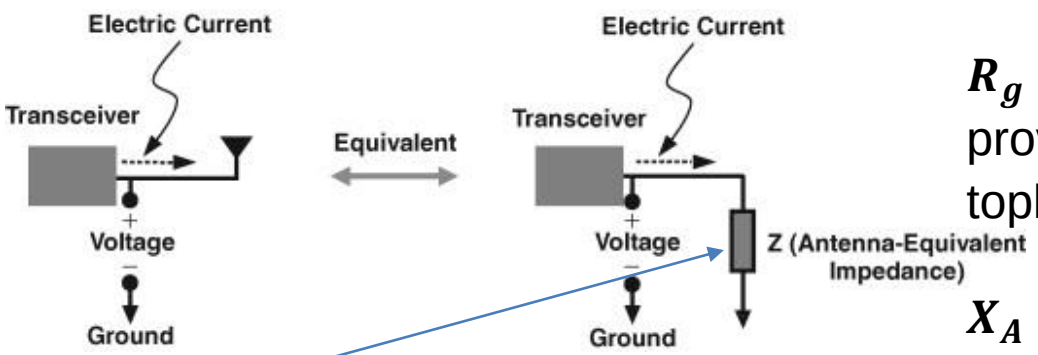
Primer dijagrama zračenja realne antene



Karakteristike antene

- *Impedanse antene*: odnos napona i struje na anteni
- Iz perspektive predajnika/prijemnika antena deluje kao pasivno RLC kolo

Antena kao ekvivalentna impedansa



$$Z_A = R_z + R_g + jX_A$$

$\boldsymbol{R_z}$ – otpornost zračenja ($R_z I^2$ - snaga koju antena zrači)

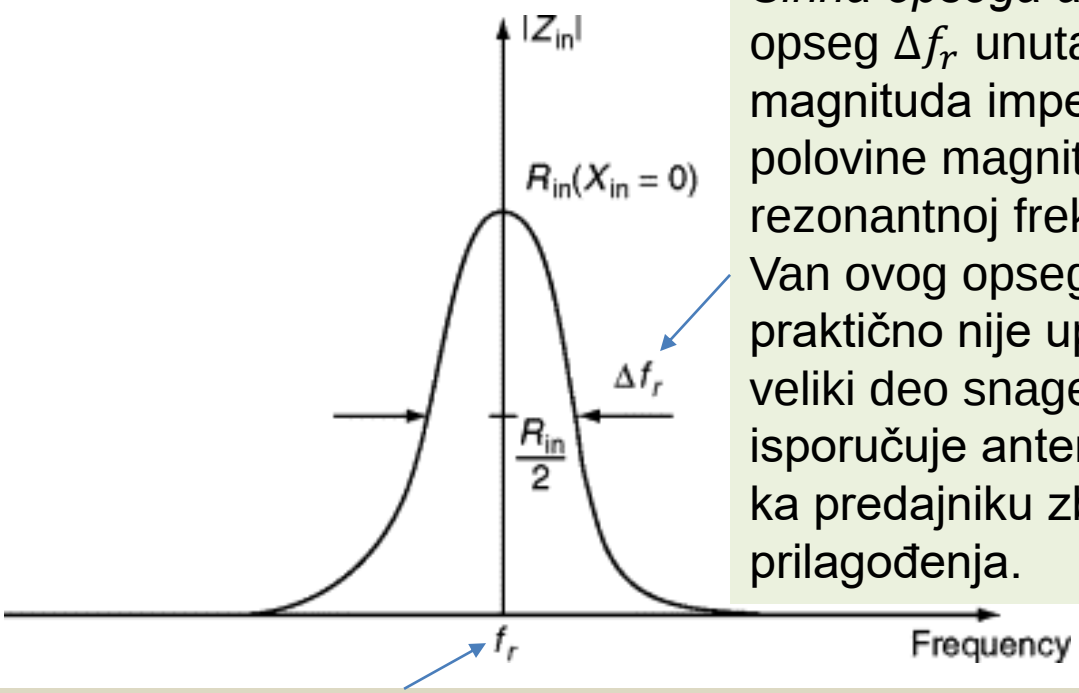
$\boldsymbol{R_g}$ – otpornost gubitaka (otpornosti provodnika antene - $R_g I^2$, pretvara se u toplotu)

$\boldsymbol{X_A}$ – reaktivna komponenta impedanse ($X_A I^2$ snaga koja se akumulira u samoj anteni, ne zrači se, već reflektuje nazad u napojni vod antene)

Na reaktivnu komponentu impedanse bitno utiče prisustvo i priroda predmeta u okolini antene

Karakteristike antene

Magnituda impedanse antene u funkciji frekvencije



Širina opsega antene. Frekventni opseg Δf_r unutar kojeg je magnituda impedanse veća od polovine magnitude na rezonantnoj frekvenciji.
Van ovog opsega, antena praktično nije upotrebljiva je se veliki deo snage koju predajnik isporučuje anteni reflektuje nazad ka predajniku zbog lošeg prilagođenja.

f_r *- rezonantna frekvencija antene*: reaktivni deo impedanse antene jednak nuli,

- Antena deluje kao čisto otporno opterećenje,
- Celokupna snaga koja se dostavlja anteni se zrači u prostor (+ gubici)
- Poželjno je da se antena koristi na svojoj rezonantnoj frekvenciji

Karakteristike antene

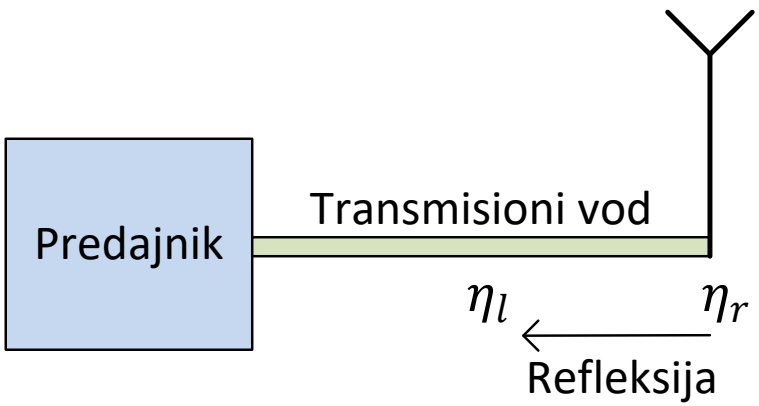
- *Efikasnost zračenja antene* (η_r): količnik snage koja se isporučuje anteni (P_{in}) i snage koja se zrači iz antene (P_{rad}):

$$\eta_r = \frac{P_{rad}}{P_{in}}$$

- Ukupna efikasnost antene: η_r pomonoženo faktorom neusklađenosti impedanse (η_l):

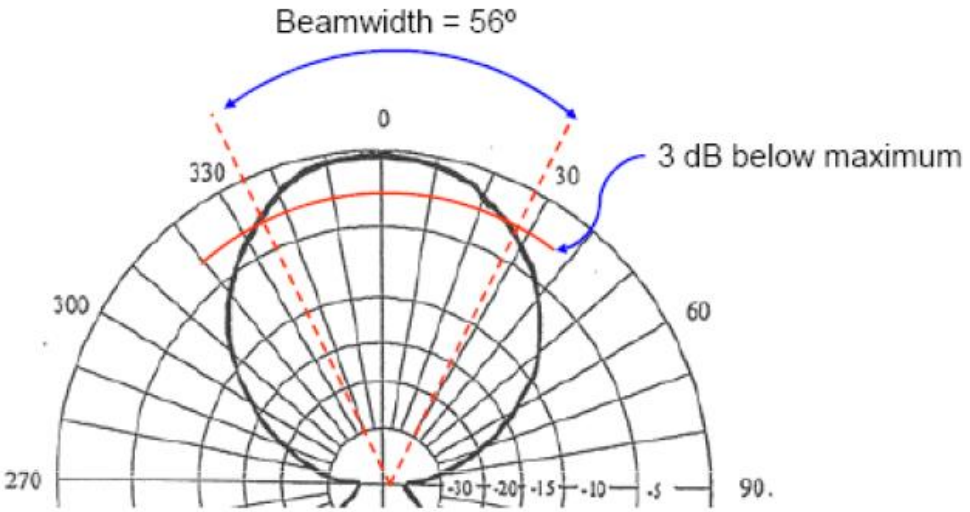
$$\eta_t = \eta_r \eta_l$$

U rasponu od 50 do 70%.



Karakteristike antene

- *Širina snopa zračenja* (*beam width*): određuje se na osnovu dijagrama zračenja, kao ugao unutar kojeg je snaga koju emituje antena najmanje upola manja, ili za $-3\ bB$ manja, od snage zračenja u pravcu ose maksimalnog zračenja



- *Uzak snop zračenja* – usmerene antene. Za velika rastojanja, jer se najveći deo energije usmerava u željenom pravcu
- *Širok snop zračenja* – neusmerene antene. Za kraća rastojanja, u slučajevima kada relativna pozicija predajnika i prijemnika unapred nije poznata ili kada su predajnik/prijemnik pokretni

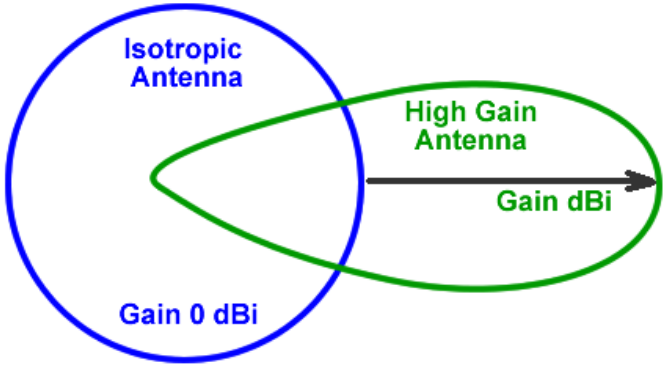
Karakteristike antene

- *Direktivnost antene*:
  - Odnos između gustine snage zračenja u posmatranom pravcu i srednje guste snage po svim pravcima na fiksiranoj udaljenosti od antene.
  - Stepen koncentracije zračenja u posmatranom pravcu.
  - Najčešće se direktivnost definiše za pravac maksimalnog zračenja i izražava se u decibelima.
  - Direktivnost izotropne antene je $D = 1$

- *Direktivnost antene* (alternativna definicija):
  - Koliko puta ukupna snaga zračenja izotropne antene mora biti veća od ukupne snage zračenja posmatrane antene da bi se sa izotropnom antenom na određenoj udaljenosti postigla jednaka gustina snage kao sa posmatranom antenom.

Karakteristike antene

- *Dobit*, ili *pojačanje* (*gain*) *antene*, G:
  - (Za prijemnu antenu) - odnos između snage, P_o, elektromagnetnog zračenja koje antena prima iz određenog pravca i snage, P_{iso}, koju bi primila idealna izotropna antena: $G = \frac{P_o}{P_{iso}}$
  - (Za predajnu antenu) - odnos između snage elektromagnetnog zračenja koje generiše antena u određenom pravcu i snage zračenja izotropne antene, pod uslovom da se obe antene pobuđuju iz predajnika istom snagom
  - Dobit je proizvod direktivnosti i efikasnosti antene
  - Izražava u jedinicama dBi (*decibel isotropic*). *„i“* naglašava da se kao referenca koristi izotropna antena
  - $G = 3\ dBi$ znači da antena duž svoje ose maksimalnog zračenja emituje 2 puta veću snagu u odnosu na izotropnu antenu.

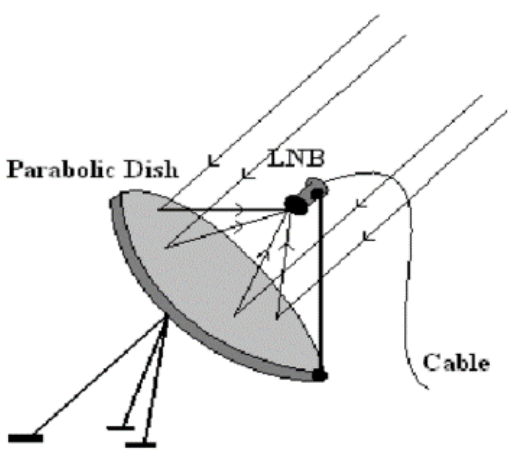


Karakteristike antene

- Efektivna površina antene:
  - Ako je antena izložena dejstvu elektromagnetnog talasa gustine snage S i na svom izlazu generiše snagu P_r, tada je njena efektivna površina:

$$A_{eff} = \frac{P_r}{S}$$

  - A_{eff} se izražava u jedinicama m^2 i može se zamisliti kao površina, upravna na pravac dolaznog talasa, iz koje antena „upija“ svu dostupnu elektromagnetnu energiju



Efektivna površina izotropne antene: $A_{iso} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$.

Dobit antene se može izraziti u obliku: $G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}$.

Karakteristike antene

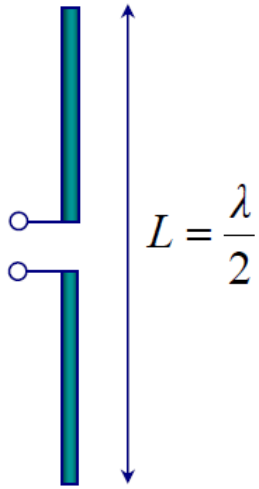
- Polarizacija antene:
  - Polarizacija elektromagnetnog talasa koji antena emituje, odnosno polarizacija talasa koji antena može da primi
  - (Teorijski) Horizontalno polarizovana prijemna antene na može da primi talas emitovan od strane vertikalno polarizovane emisione antene
  - Zbog refleksija u prenosu talasa, prenos, mada sa manjom efikasnošću, je moguć i kada polarizacije nisu usaglašene
  - *Međusobna polarizacija* definiše stepen do kog se signal emitovan antenom jedne polarizacije može primiti antenom suprotne polarizacije
  - Kružno (cirkularno) polarizovana antena može se koristiti kada polarizacija antene na drugom kraju linka nije poznata.

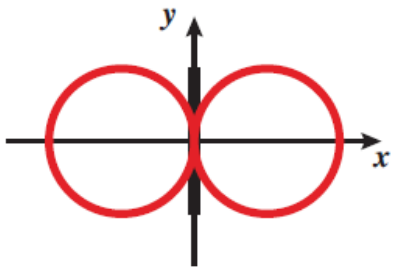
Tipovi antena

- **Dipol antena**
  - Dva pravolinijska kolinearna provodnika jednake dužine, odvojena malim razmakom i sa pristupnim tačkama na sredini
  - Ukupna dužina antene jednaka je polovini talasne dužine signala koji antena najefikasnije emituje/prima ($\lambda/2$ dipol antena)
  - Nije praktična (zbog velike dužine) za frekvencije manje od 1 GHz
- *Kratka dipol antena* - dipol čija je dužina mnogo manja od talasne dužine prijemnog talasa, tipično $L < \lambda/10$. (kraća, ali manje efikasna od $\lambda/2$ dipla).

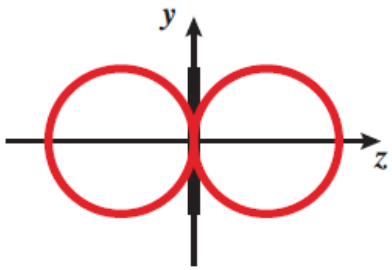
$$f = 900\ MHz \Rightarrow \lambda = 33.3\ cm \Rightarrow L = 16.67\ cm$$

$$f = 2.4\ GHz \Rightarrow \lambda = 12.5\ cm \Rightarrow L = 6.25\ cm$$

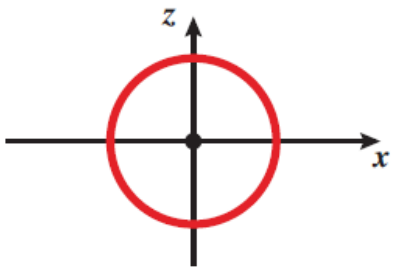




Side view (*xy*-plane)



Side view (*zy*-plane)

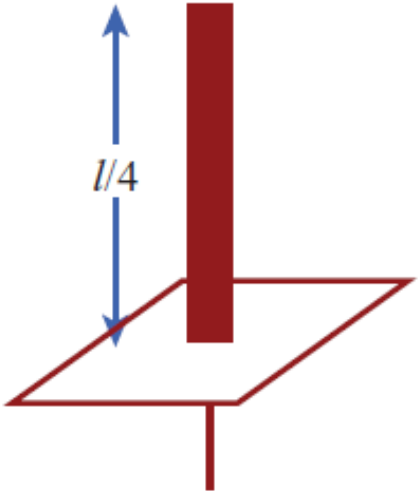


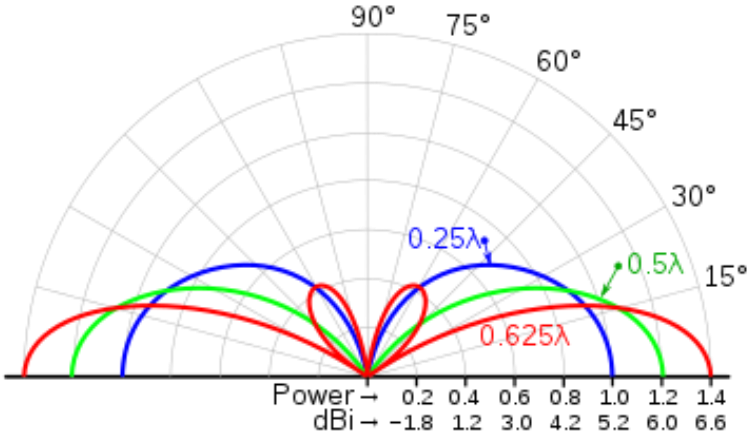
Top view (*xz*-plane)

Ako je postavljena vertikalno, zračenje antene je omnidirekciono u horizontalnoj ravni

Tipovi antena

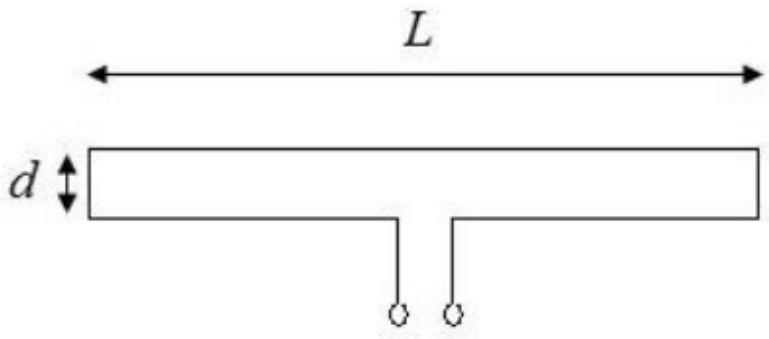
- **Monopol antena** ($\lambda/4$ antena):
  - Jedan krak dipol antene sa reflektujućom (metalnom) podlogom ispod kraka
  - U poređenju sa dipolom, monopol antena je manje dužine, ali i manje efikasnosti.





Tipovi antena

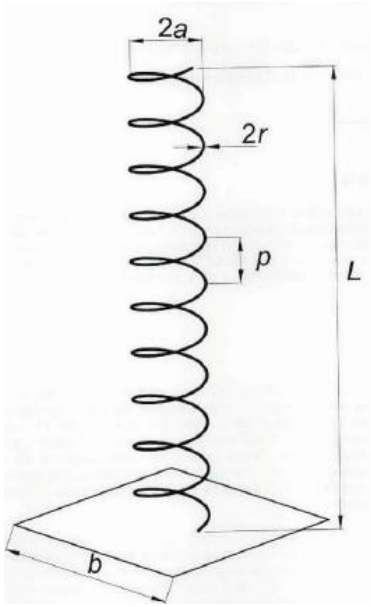
- **Savijeni dipol** (*folded dipole antenna*):
  - Provodnik koji je savijen, obično u pravougaoni oblik, gde je d manje od L
  - Ima pikove efikasnosti kada je dužina L jednaka neparnom umnošku $\lambda/2$.
  - Dijagram zračenja je sličan osnovnom dipolu, s tim što je efikasnost savijenog dipola nešto veća.

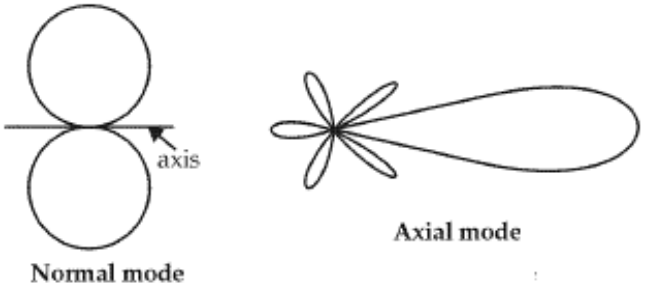


Tipovi antena

Helikoidna (spiralna) antena (*helical antenna*):

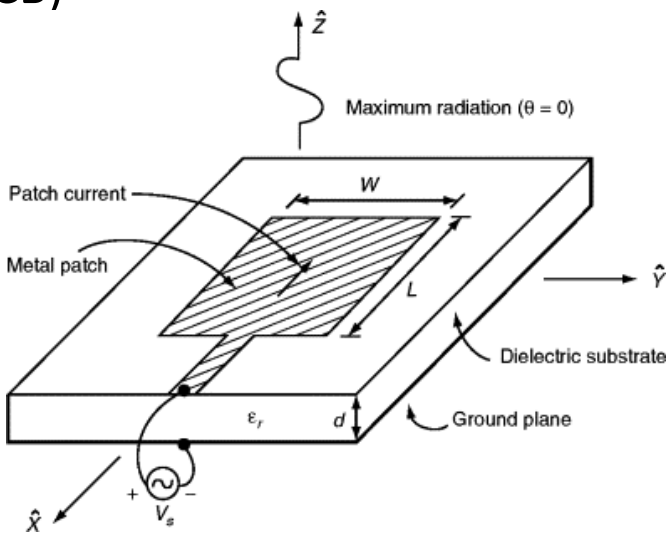
- Oblika obmotane spirale
- Performanse zavise od vrednosti konstrukcionih parametra:
  - Poluprečnik (debljina) žice (r),
  - Poluprečnik zamišljenog valjka oko kojeg je žica namotana (a),
  - Rastojanje između dva koraka spirale (p) i
  - Broja namotaja (N)
- Za optimalne performanse, potrebno je i metalna podloga (uzemljena ravan)
- Koristi se u dva režima:
  - Normalni:
    - Dužina žice antene mnogo manja od talasne dužine
    - Maksimalno zračenje u pravcu koja je normalna na osu spirale (slično kratkom dipolu)
    - Mala efikasnost
  - Aksijalni:
    - Dužina žice antene približna talasnoj dužini.
    - Zračenje usmereno duž ose spirale.
- Cirkularno polarizovana antena. (Korisna kao prijemna antena jer može da primi signale proizvoljne ili promenljive polarizacije, naravno, sa izvesnim slabljenjem)





Tipovi antena

- **Mikrostrip antena:**
  - Antena izvedena direktno na štampanoj ploči (PCB)
  - Sastoji se iz dijalektričkog supstrata (izolatora) debljine, d, koji je sa jedne strane u potpunosti prekriven tankim uzemljenim metalnim slojem i metalnog *patch*-a (zakrpa) sa druge strane.
  - Obično:
    - $d \ll \lambda$
    - Patch je pravougaonog oblika (nije obavezno)
    - $L \approx \lambda/2$ - određuje radnu (rezonantnu) frekvenciju antene
    - W utiče na impedansu antene
    - Prednosti: Mala veličina i laka fabrikacija
    - Nedostaci:
      - Mala efikasnost (zbog gubitaka u dijalektriku),
      - Mala snaga zračenja (ako se koristi kao predajna antene) i
      - Mali propusni opseg, koji je reda $3 - 5\%$ radne frekvencije (usko-pojasna antena)

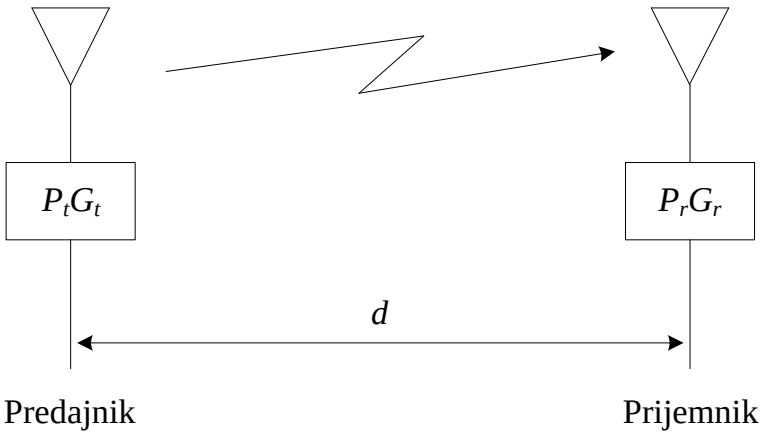


$$f_c = \frac{1}{2L\sqrt{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0}}$$

Propagacija u slobodnom prostoru

- Postavka:
  - Između predajnika i prijemnika postoji optička vidljivost (LoS – *Line of Sight*)
  - U prostoru između predajnika i prijemnika na postoje prepreke koje bi remetile propagaciju radio talasa

- Poznato je:
  - P_t – snaga zračenja predajnika
  - G_t – pojačanje (dobit) predajne antene
  - G_r – pojačanje (dobit) prijemne antene
  - d – rastojanje između predajnika i prijemnika
  - λ – talasna dužina emitovanog signala
- Kolika je snaga prijemnog signala, P_r?
- Odgovor na ovo pitanje daje Friis-ova formula:



$$P_r = \frac{G_r G_t P_t \lambda^2}{(4\pi d)^2}$$

Postupak izvođenja je dat u pratećem materijalu

Prijemna snaga, P_r:
- Opada sa kvadratom rastojanja
- Raste sa kvadratom talasne dužine (prenos na višim frekvencijama je manje efikasan od prenosa na nižim)

Propagacija u slobodnom prostoru

- Gubitak snage signala (*path-loss*) - odnos prijemne (P_r) i predajne snage (P_t) :

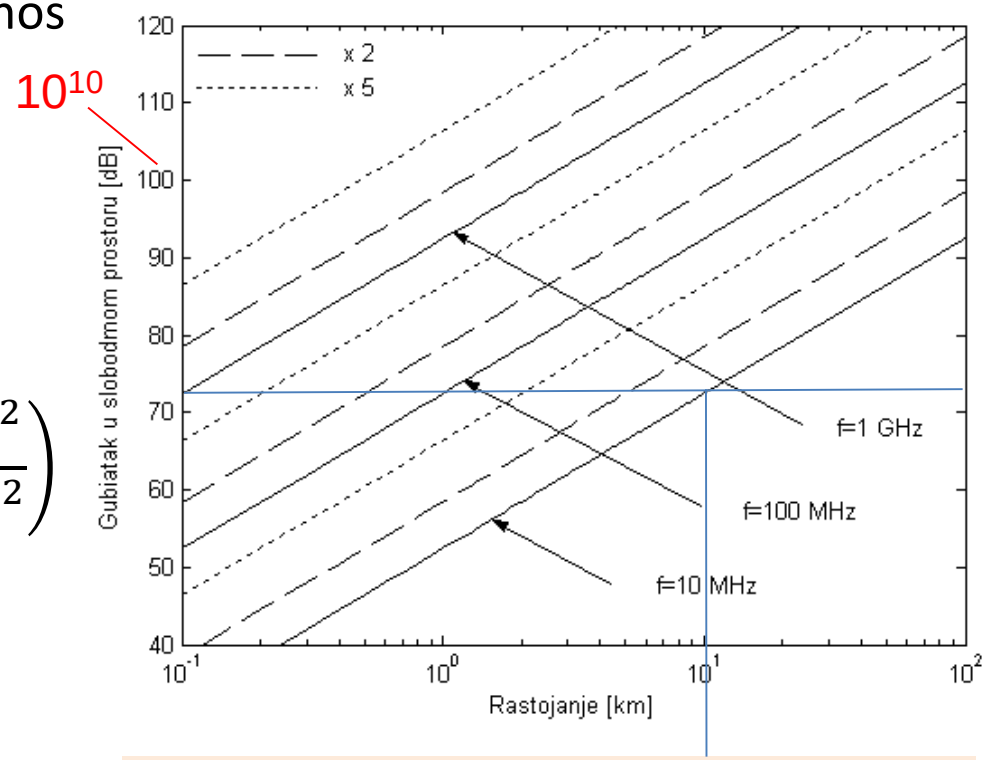
$$L = \frac{P_r}{P_t} = \frac{(4\pi d)^2}{G_t G_t \lambda^2}$$

- Obično se izražava u decibelima (dB):

$$L(dB) = 10\log\frac{P_t}{P_r} = -10log\left(\frac{G_t G_t \lambda^2}{(4\pi d)^2}\right)$$

- Za izotropne antene (G_t=G_r=1):

$$L(dB) = -20log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)$$



Gubitak snage signala 1GHz na 10cm je isti kao gubitak snage signala10MHz na 10 m

Propagacija u slobodnom prostoru

- Snaga prijemnog signala na rastojanju d od predajnika se često izražava preko snage prijemnog signala na referentnom rastojanju d_{ref}
- Za zatvoreni prostor se tipično usvaja $d_{ref} = 1m$,
- Za otvoreni prostor $d_{ref} = (100 - 1000)m$.

$$P_r(d) = P_r(d_{ref}) \times \left(\frac{d_{ref}}{d}\right)^2$$

$$P_r(d)(dB) = 10\log\left(P_r\left(d_{ref}\right)\right) + 20log\left(\frac{d_{ref}}{d}\right)$$

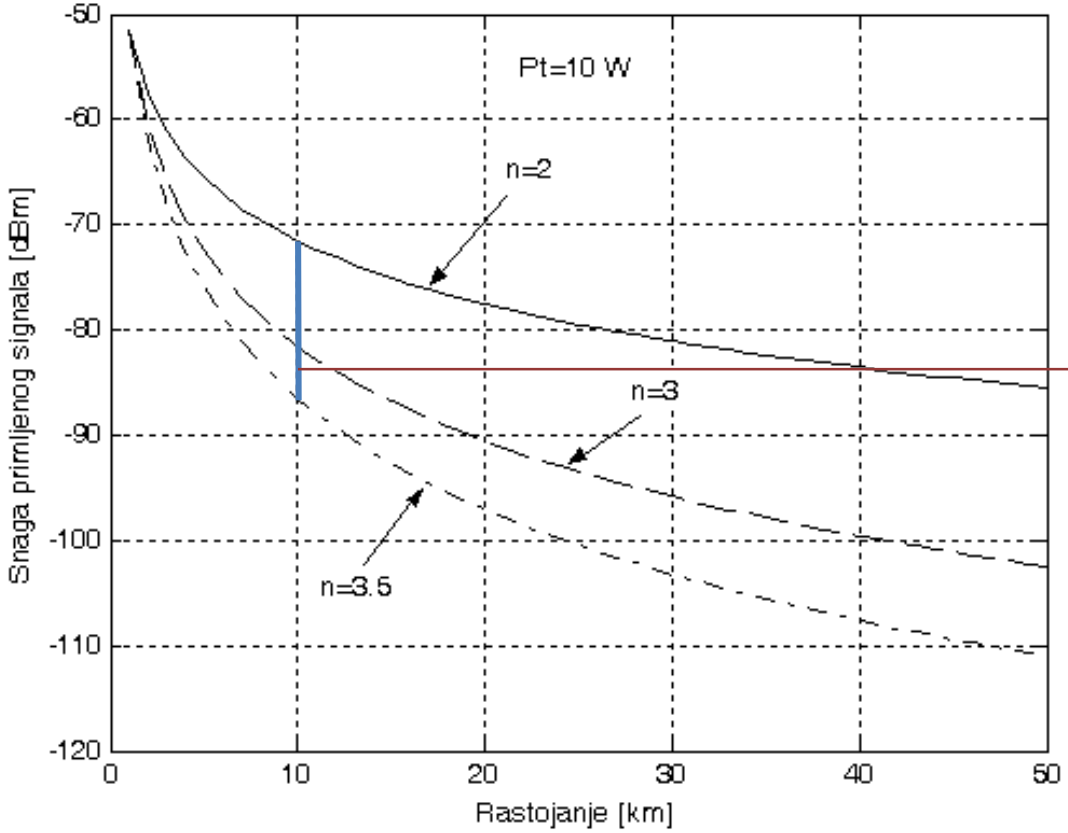
Propagacija u realnim uslovima

- U slobodnom prostoru, prijemna snaga opada sa kvadratom rastojanja, tj. $P_r \propto d^{-2}$.
- U realnim uslovima:$P_r \propto d^{-\nu}$
- ν – koeficijent slabljenja, koji se kreće u opsegu od
  - ν=2, za slobodan prostor, do
  - ν=6, gustom naseljen urbani prostor ili zatvorena sredina

$$P_r(d)(dB) = 10\log\left(P_r\left(d_{ref}\right)\right) + 10\boldsymbol{\nu} log\left(\frac{d_{ref}}{d}\right)$$

Propagacija u realnim uslovima

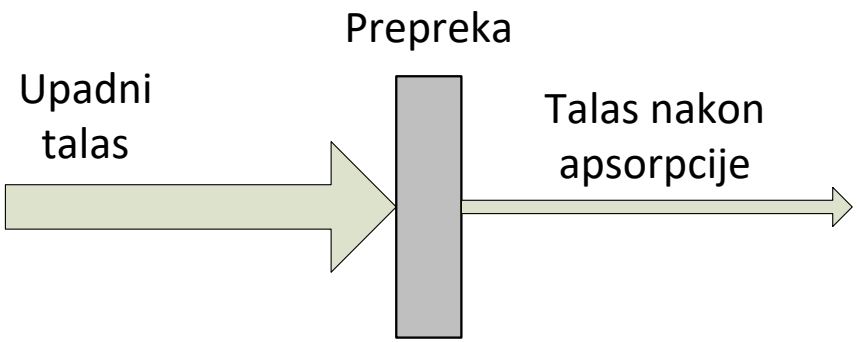
- Snaga prijemnog signala u zavisnosti od rastojanja i parametra ν (na slici je ν označeno sa n)



Snaga prijemnog signala na rastojanju 10 km od predajnika u sredini sa u=3.5 je 15 dB (32x) manja od snage na istom rastojanju u sredini sa u=2

Apsorpcija radio talas

- Prilikom prostiranja kroz materijalnu sredinu (vazduh, voda, građevinski materijal, ljudsko telo itd.) jedan deo elektromagnetne energije se apsorbuje u materijalu, odnosno konvertuje se u neki drugi oblik energije (toplotna, hemijska).
- Nivo apsorpcije određen je karakteristikama materijala:
  - μ_r - relativna magnetna permeabilnost i
  - ε_r - relativna dijalektrična permitivnost
- μ_r i ε_r zavise od nekoliko faktora uključujući i frekvenciju signala.



Apsorpcija radio talas

- Slabljenje radio signala prolaskom kroz različite materijale. **Napomena**: *Brick* – cigla; *Concrete* – beton; *Masonry* – kameni zid; *Drywall* – gipsani zid; *Glass* – staklo; *Plywood* – šperploča; *Reinforced concrete* – armirani beton

1.12x

40x

9.3x

600x

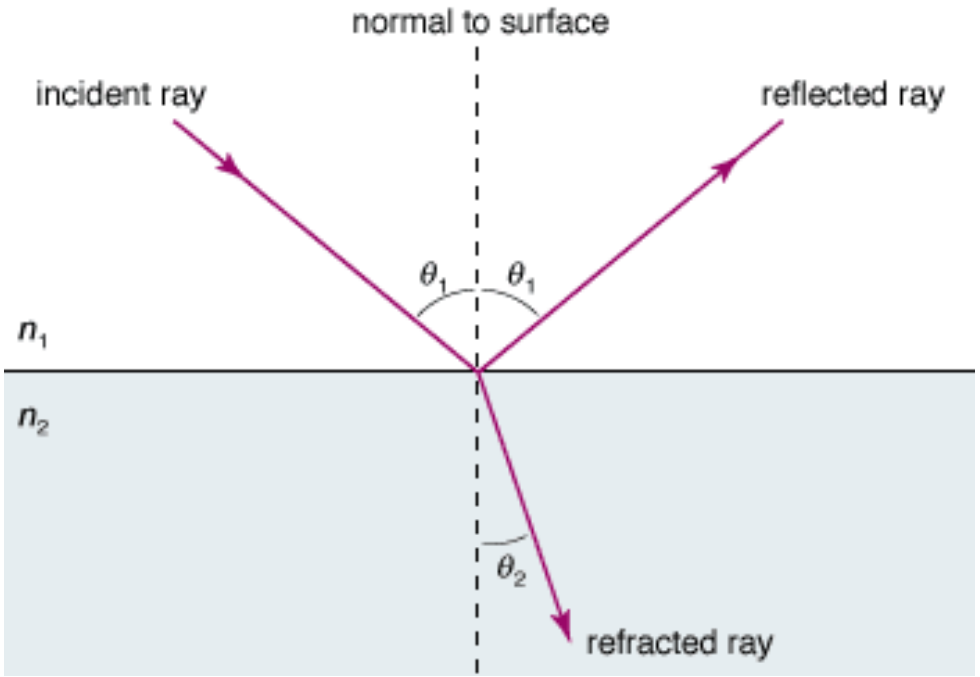
170x

8mil x

Materials	0.5 GHz (dB)	1 GHz (dB)	2 GHz (dB)	5.8 GHz (dB)	8 GHz (dB)
Brick 89 mm	−0.5	−3.7	−5.4	−15.5	−16.0
Brick 267 mm	−3.8	−6.9	−10.6	−38.0	−27.2
Composite Brick 90 mm/Concrete Wall 203 mm	−20.7	−25.0	−33.0	−73.8	−82.4
Masonry 203 mm	−9.5	−11.5	−11.3	−15.5	−18.4
Masonry 610 mm	−26.3	−28.0	−30.0	−47.2	−38.8
Drywall 16 mm	−0.1	−0.3	−0.6	−0.3	−1.0
Concrete 102 mm	−9.7	−12.2	−14.9	−24.1	−27.8
Concrete 305 mm	−32.3	−34.8	−36.0	−74.9	−90.0
Glass 6 mm	−0.2	−0.8	−1.4	−1.0	−1.5
Glass 19 mm	−2.3	−3.1	−3.9	−0.4	−1.0
Plywood (dry) 6 mm	−0.07	−0.49	−0.93	−0.1	−1.0
Plywood (dry) 32 mm	−0.73	−1.4	−2.0	−0.9	−1.0
Reinforced concrete 203 mm/1% steel	−22.3	−27.3	−31.0	−56.7	−69

Refleksija i refrakcija

- **Refleksija** je pojava odbijanja (reflektovanja) radio talasa od različitih materijala i površina. Nastaje kada radio talas stupi u kontakt sa površinom kroz koju ne može da prodre, ili ne može u potpunosti da prodre, a koja je velika u odnosu na talasnu dužinu talasa.
- **Refrakcija** (savijanje) je pojava promena pravca prostiranja talasa koji prelazi iz jedne u drugu sredinu

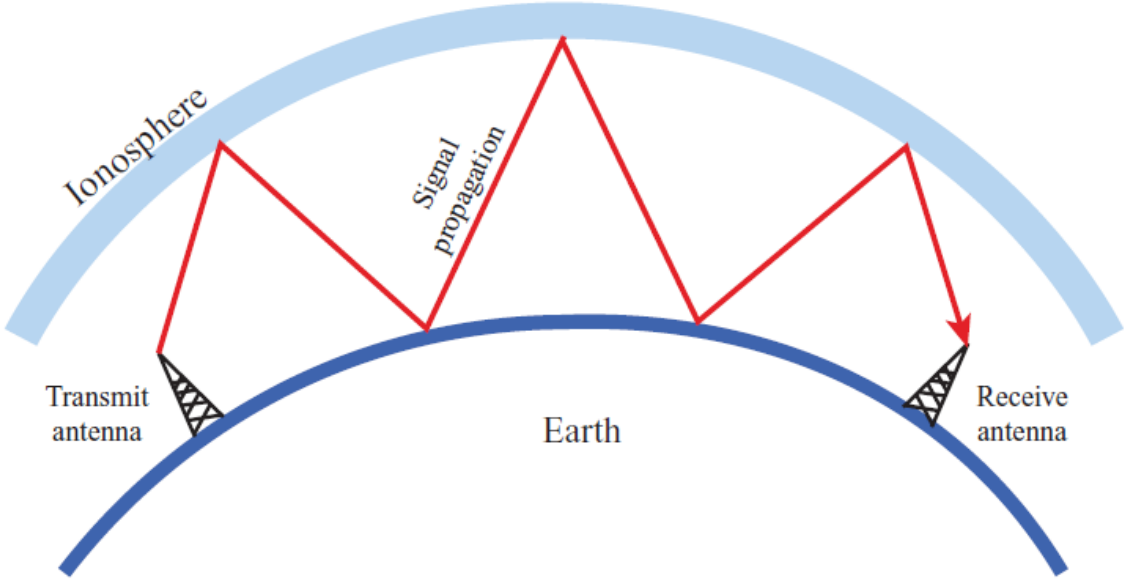


Senelov zakon:

$n1 \cdot sin(\theta 1) = n2 \cdot sin(\theta 2)$

Refleksija i refrakcija

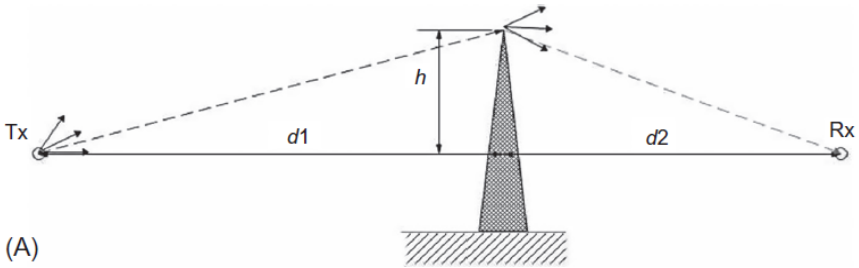
- Radio talasi se mogu prenositi na udaljenostima od više hiljada kilometara! (važi za frekvencije 2 – 30 MHz)
- Kako kad je Zemlja lopta?
  - Posledica refleksije i refrakcija
  - U jonosferi, talas se refaktuje, tj. postepeno savija i vraća ka zemlji od koje se odbija

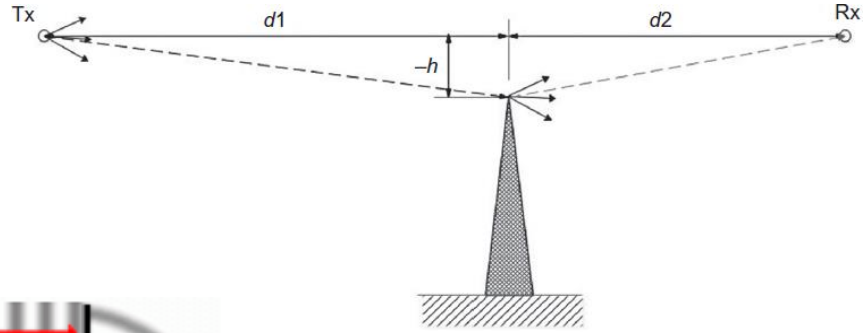


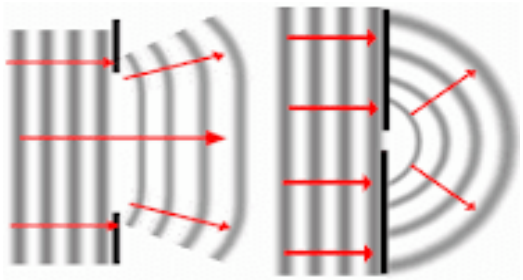
(b) Sky wave propagation (2 to 30 MHz)

Difrakcija

- Svojstvo elektromagnetnih talasa da se talasni front savija ili širi kada dođe u kontakt sa ivicom prepreke ili otvorom koji je po veličini uporediv sa talasnom dužinom talasa
- Fizika: „svaka tačka pogođena talasom postoje izvor novih (sfernih) talasa “
- Omogućava radio signalima da se savijaju oko prepreka i dosegnu područja koja bi inače bila blokirana preprekom.

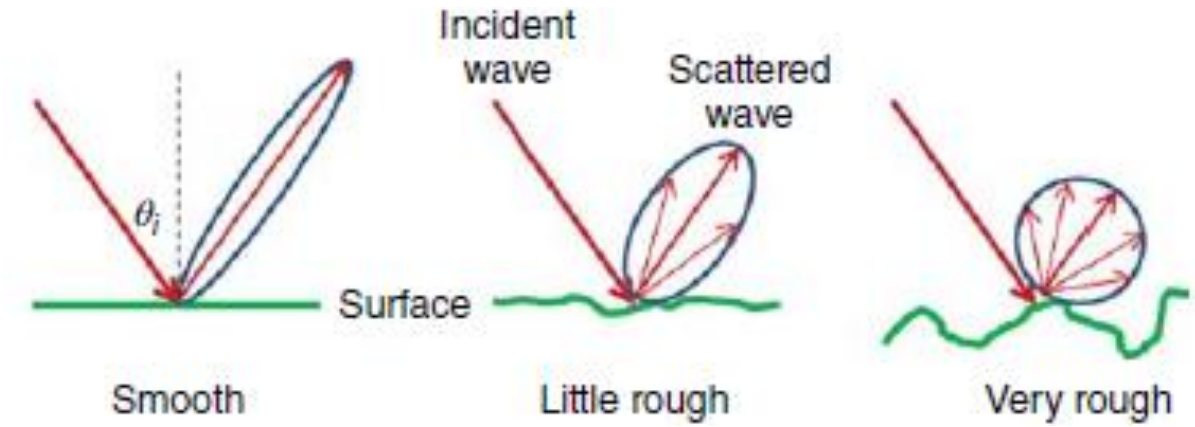






Rasipanje

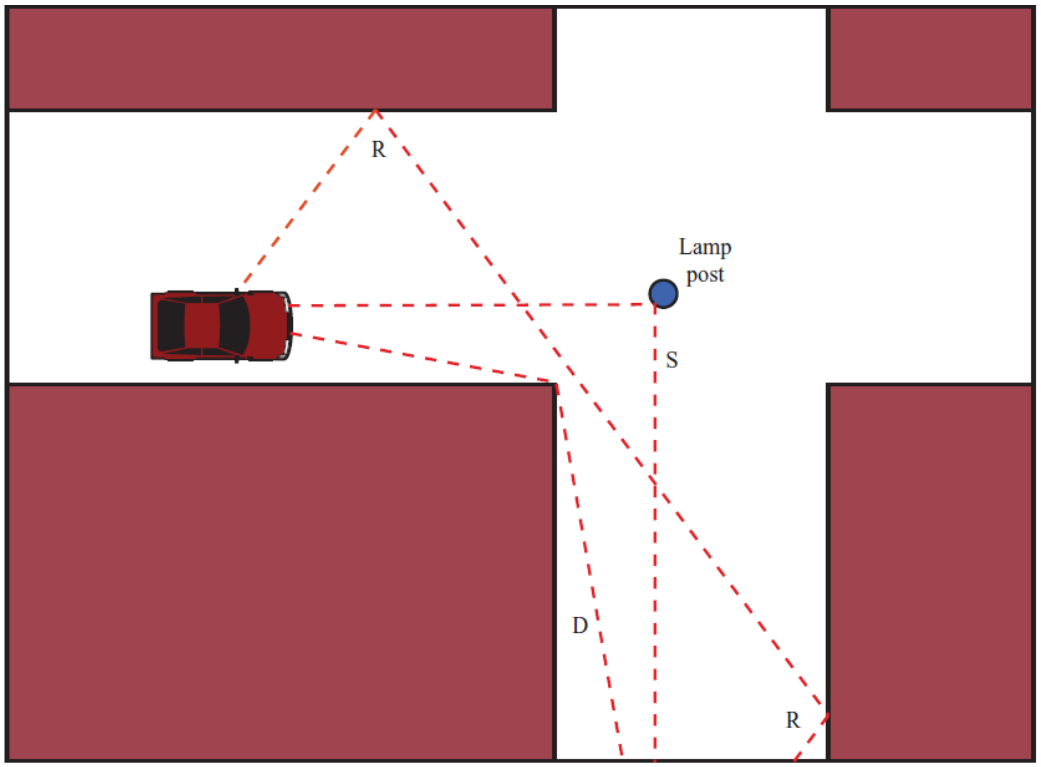
- **Rasipanje** (***Scattering***) - raspršivanje radio talasa nailaskom na veliki broj objekata malih dimenzija, reda talasne dužine talasa, ili manjih, kao što su neravne površine, lišće, saobraćajni znaci itd.
- Radio signal se raspršuje na nekoliko slabih odlaznih signala



Rasipanje radio talasa u zavisnosti od hrapavosti podloge

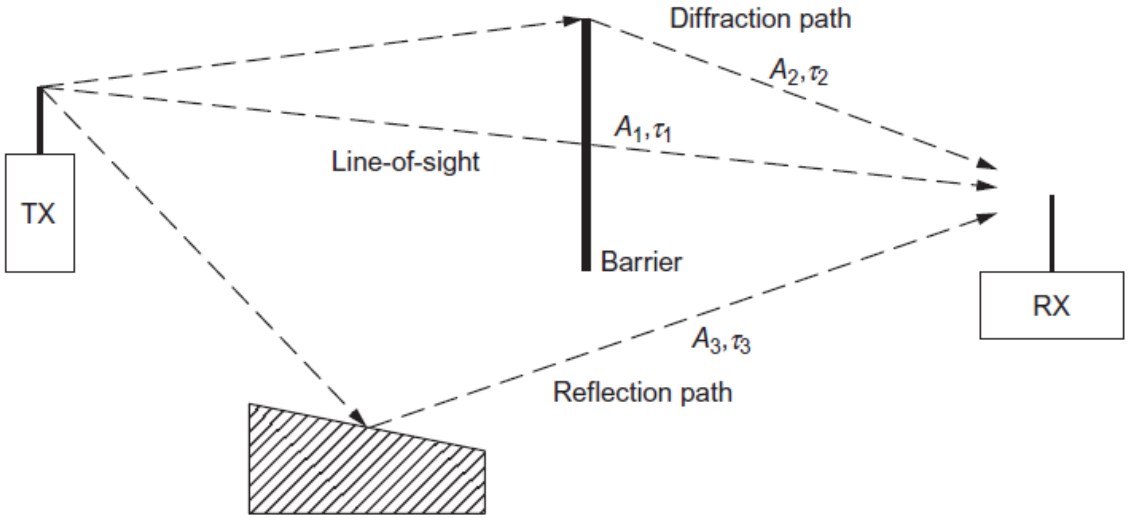
Refleksija, difrakcija i rasipanje

- Ilustracija tri načina interakcije radio talasa i fizičkih objekata:
  - R – refleksija
  - D – difrakcija
  - S – rasipanje (*scatterning*)
  - (radio-predajnik je u automobilu; debljina stuba saobraćajnog znaka je mnogo manja od talasne dužine emitovanih talasa)



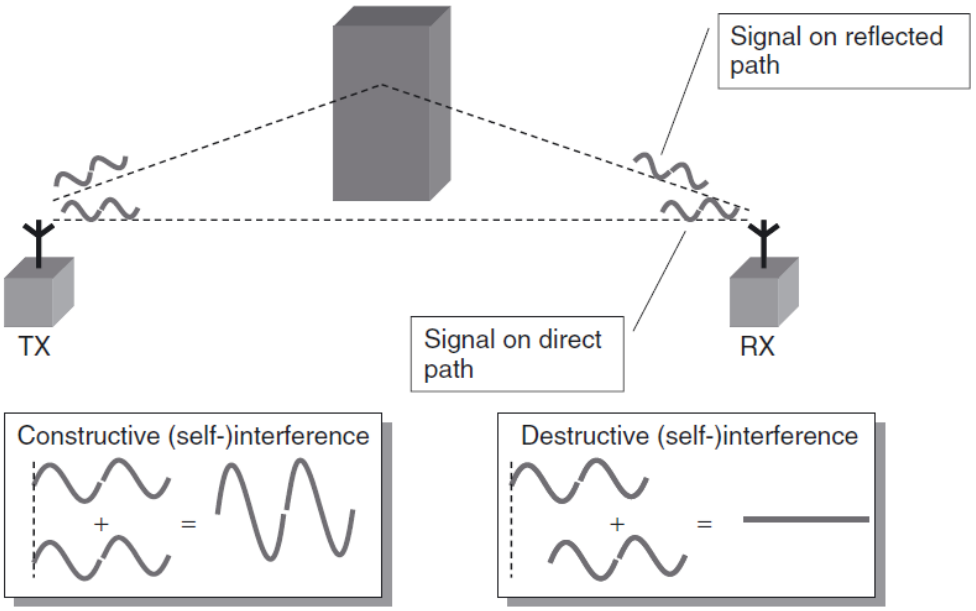
Prostiranje po više putanja

- Ako između predajnika i prijemnika postoji optička vidljivost (LOS – *Line of Sight*) i u okolini ne postoje drugi objekti, poslati signal stiže do prijemnika brzinom svetlosti po najkraćoj, pravolinijskoj putanji.
- U realnim uslovima, kao posledica interakcije sa fizičkim objektima u okruženu, signal poslat od strane predajnika može stići do prijemnika po više različitih putanja
- Umesto jednog, prijemnik prima više replika poslatog signala
- MPC (*Multi Path Components*) – replike primljenih signala
- MPC se razlikuju po amplitudi i kašnjenju (fazi)
- U prijemnoj anteni, MCP-ovi se mešaju, što remeti prijem



Prostiranje po više putanja
- Feding -

- Interferencija – sabiranje (mešanje) MPC-ova u prijemnoj anteni
- MPC-ovi se razlikuju po amplitudi i fazi
- Dve vrste interferencije:
  - *Konstruktivna interferencija*: MPC-ovi su „u fazi“ i efekat njihovog mešanja je pojačanje signala
  - *Destruktivna interferencija*: MPC-ovi nisu u fazi i efekat njihovog mešanja je izobličenje i slabljenje signala



Feding - nestabilnost nivoa radio signala na mestu prijema izazvana interferencijom MCP-ova

Ova pojava se zove **brzi feding**

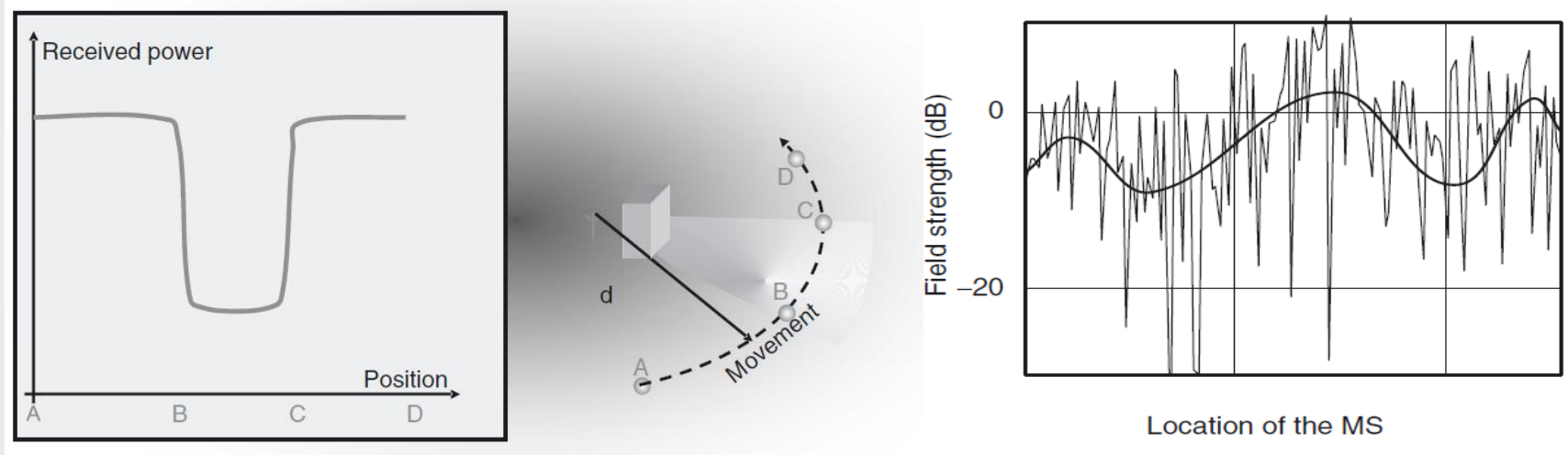
Činjenica: pri frekvenciji od $2\ GHz$, pomeraj predajnika/prijemnika ili nekog objekta u okolini od samo $10\ cm$ može da promeni prirodu interferencije, od konstruktivne na destruktivnu ili obrnuto

Prostiranje po više putanja
- Spori feding -

- *Spori feding* je posledica *efekata senke* – promena nivo signala usled blokiranja objektom većih dimenzija.

Predajnik je iza zgrade, a prijemnik se kreće. Desno je putanja mobilnog uređaja i senka koju pravi zgrada; levo je prikazana zavisnost prijemne snage u zavisnosti od pozicije uređaja – nasto je **spori feding**

U tipičnim uslovima, istovremeno postoje brzi i spori feding



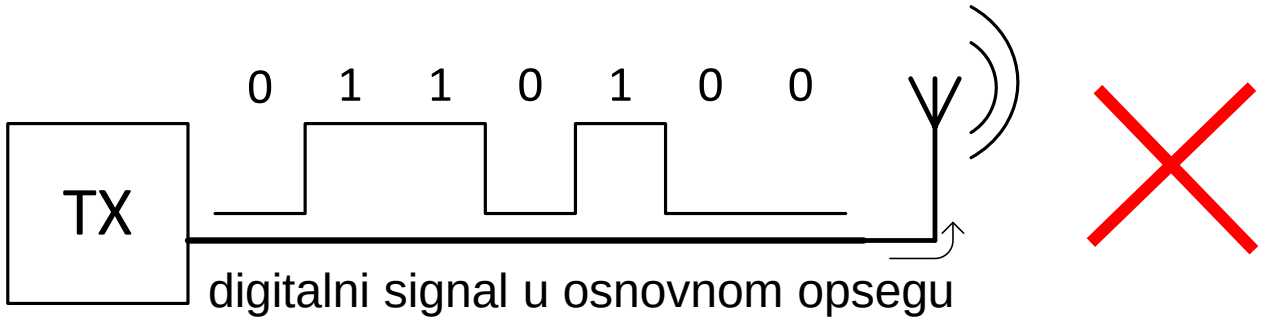
U uslovima fedinga dolazi da pada kvaliteta govornog signala (u mobilnoj telefoniji), povećava se verovatnoća greške u prenosu digitalnih podataka, ili, u krajnjem slučaju, do potpunog gubitka veze.

Intersimbolska interferencija

- U komunikacijama, radio signal nosi informaciju, koja se sastoji iz niza simbola, a svaki simbol je predstavljen specifičnim talasnim oblikom radio signala i traje određeno vreme – simbol-interval
- Ako je razlika u kašnjenju MPC-ova mnogo manja od simbol-intervala, reč je o ravnom fedingu (kao što je prethodno definisan)
- Ako je razlika u kašnjenju uporediva ili duža od simbol-intervala dolazi do pojave *intersimbolske interferencije*
- Ova vrsta poremećaja otežava detekciju (prepoznavanje) simbola i može da dovede do greške u prijemu

Modulacija i demodulacija

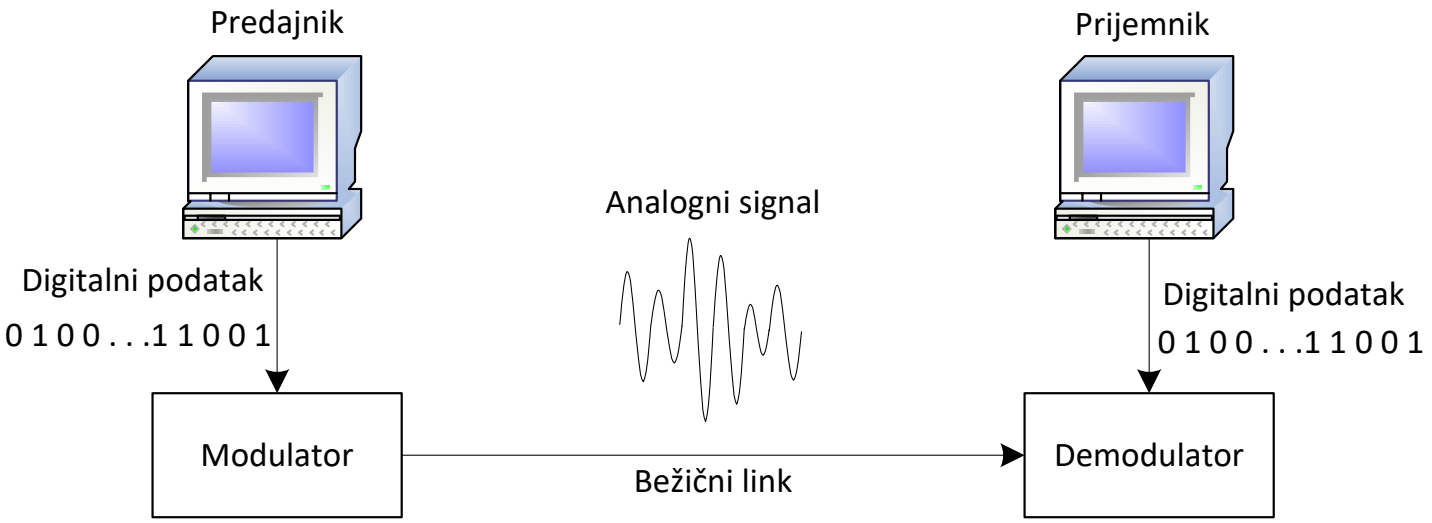
- Komunikacija između bežičnih uređaja -razmena digitalnih podataka (povorka bita) preko bežičnog komunikacionog medijuma
- Zašto digitalni signal nije pogodan za direktni bežični prenos?



- Signali u osnovnom opsegu su po pravilu nisko-frekventni - najveći deo energije sadržan u opsegu niskih frekvencija i rezultujući nisko-frekventni elektromagnetni talas bi bio podložan velikom slabljenju prilikom propagacije, zbog čega bi signal na prijemu bio izobličen, a kvalitet prenosa nizak.
- Bile bi potrebne antene velikih dimenzija.
- Ako bi svi uređaji koristili bežični prenos u osnovnom obliku, brzo bi došlo do iscrpljivanja raspoloživog kapaciteta RF kanala (jer bi svi emitovali u istom nisko-frekventnom opsegu frekvencija).

Modulacija i demodulacija

- *Modulacija*: proces kojim se digitalna informacija transformiše u analogni signal visoke frekvencije;
- *Demodulacija*: inverzni proces koji transformiše primljeni analogni signal u digitalnu informaciju

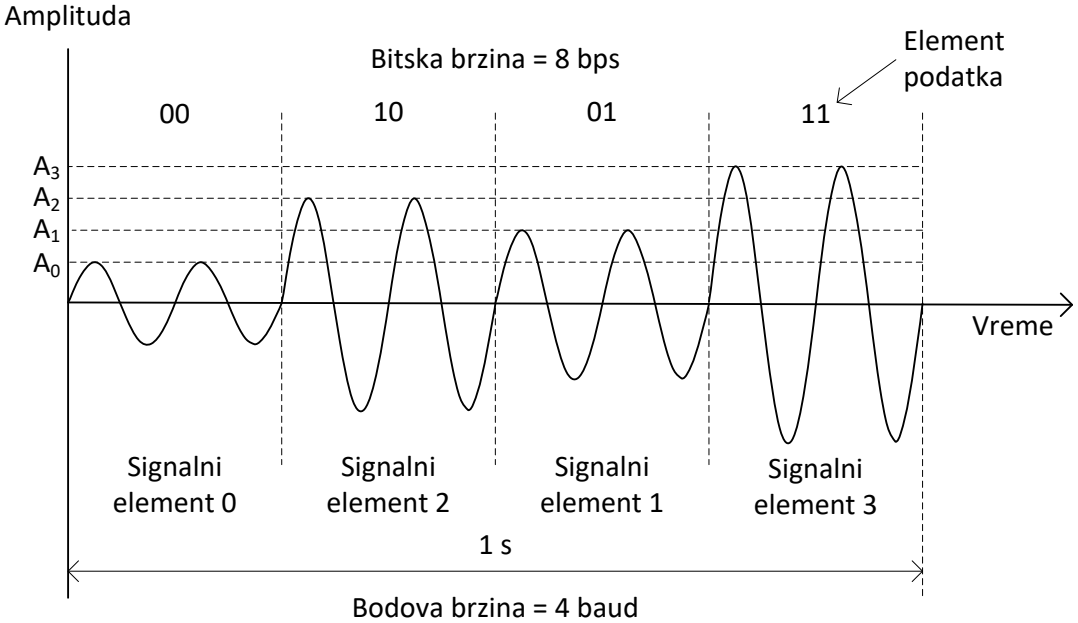


Modulacija i demodulacija

- Modulacija (opšti princip):
  - Informacija koju treba preneti predstavlja se nizom simbola iz konačnog skupa *kanalnog alfabeta*.
  - Svaki simbol se preslikava na jedan signalni element, odnosno predstavlja se jednim od konačnog broja talasnih oblika signala fiksnog trajanja
  - Binarna modulacija - samo dva različita simbola i zahteva dva različita talasna oblika.
  - Ako je broj raspoloživih talasnih oblika m ($m > 2$) govorimo o m-arnoj modulaciji.

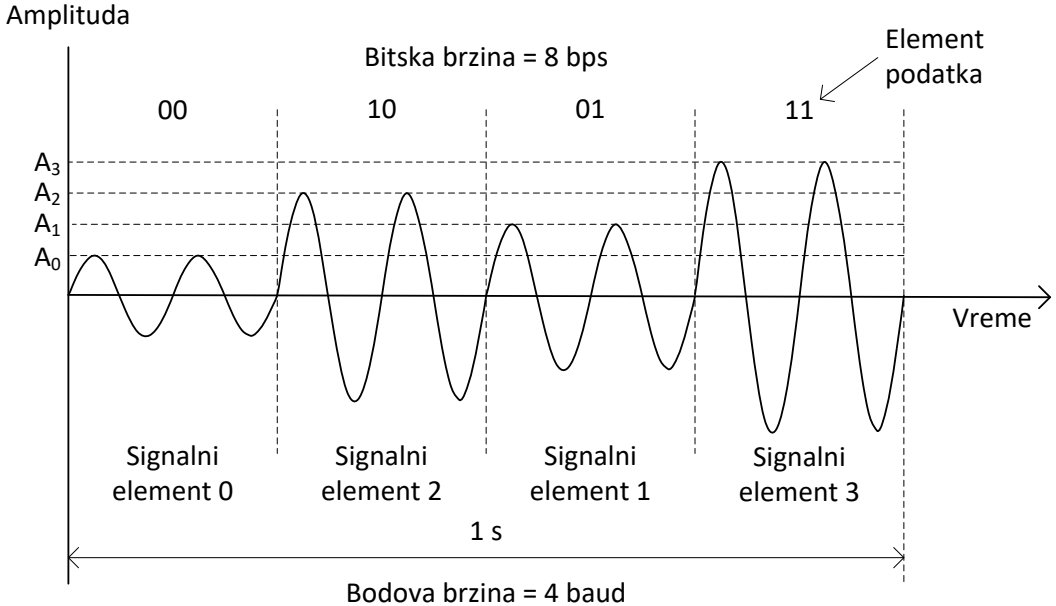
Primer:

- 4 simbola i svaki simbola nosi informaciju od 2 bita
- Svi signalni elementi (njih 4) traju dve periode fisoko-vrekventnog nosećeg signala, ali se razlikuju po amplitudi



Modulacija i demodulacija

- Brzina prenosa/modulacije podataka određena je sledećim parametrima:
  - *Simbolska brzina* (*symbol rate, baud rate* ili *modulation rate*): recipročna vrednost trajanja simbola.
    - U slučaju binarne modulacije govorimo o bitskoj brzini.
  - *Brzina podataka* (*data rate*): brzina, izražena u bitima u sekundi (*bps*), s kojom modulator prihvata binarne podatke od korisnika.
    - U slučaju binarne modulacije, bitska brzina i brzina podataka su jednake.
    - U slučaju m-arne modulacije, brzina podataka je jednaka proizvodu simbolske brzine i broja bita kodiranih jednim simbolom.



Modulacija i demodulacija

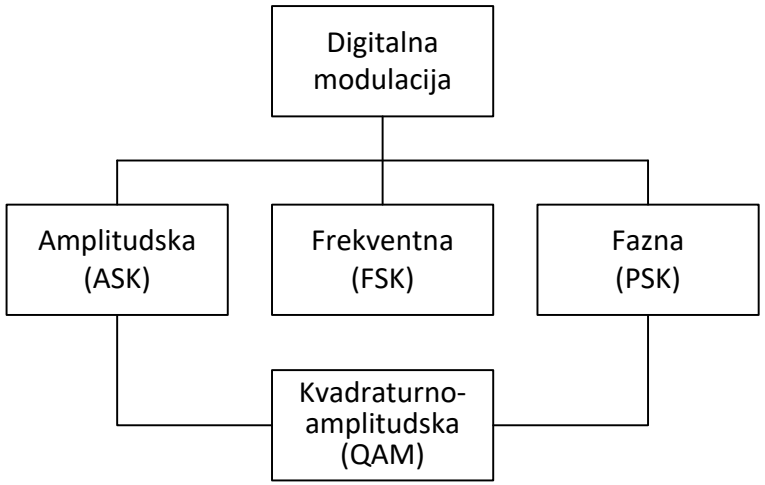
- *Demodulacija*: proces suprotan modulaciji, kojim se primljeni signalni elementi preslikavaju na simbole.
- Demodulator izdvoji signalne elemente iz primljenog signala i na osnovu talasnog oblika signalnog elementa prepoznaje simbol.
- Zbog šuma, slabljenja, interferencije i izobličenja prijemnog signala, prijemnik nije uvek u mogućnosti da sa apsolutnom sigurnošću odredi kom simbolu odgovara primljeni signalni element.
- *Simbolska stopa greške* (*symbol error rate*) - verovatnoća da će u primljenom talasnom obliku biti prepoznat pogrešan simbol.
- *Bitska stopa greške* (*BER - bit error rate*): verovatnoća da će, nakon demodulacije, na izlazu demodulatora biti generisan pogrešan bit.

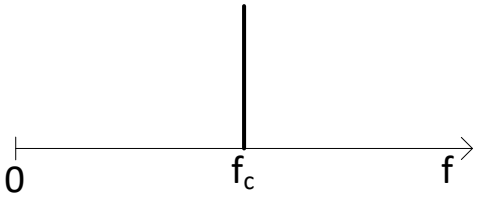
Pojasna modulacija

- *Pojasna modulacija* (*bandpass modulation*) – informacijom se moduliše periodični noseći signal znatno više frekvencije (f_c).
- Informacioni signal se iz osnovnog premešta u opseg viših frekvencija tako da se može preneti na veća rastojanja sa minimalno interferencijom ili slabljenjem
- Modulisani signal, $s(t)$, se predstavlja kosinusnom funkcijom, koja je u potpunosti određena amplitudom $A(t)$, frekvencijom, $f(t)$, i faznim pomakom, $\phi(t)$:

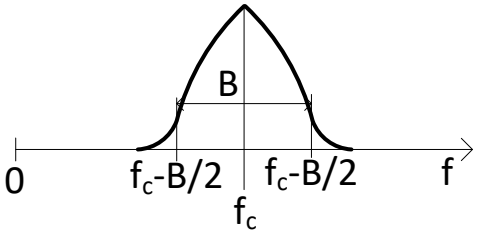
$$s(t) = \boldsymbol{A(t)}\cos(2\pi \boldsymbol{f(t)} + \boldsymbol{\phi(t)})$$

- U zavisnosti od toga na koji od ova tri parametra se deluje, razlikuju se četiri osnovna tipa digitalne modulacije:





Nemodulisan signal – celokupna energija skoncentrisana na jednoj frekvenciji, f_c



Modulisan signal – Zauzima opseg frekvencija širine *B* oko f_c

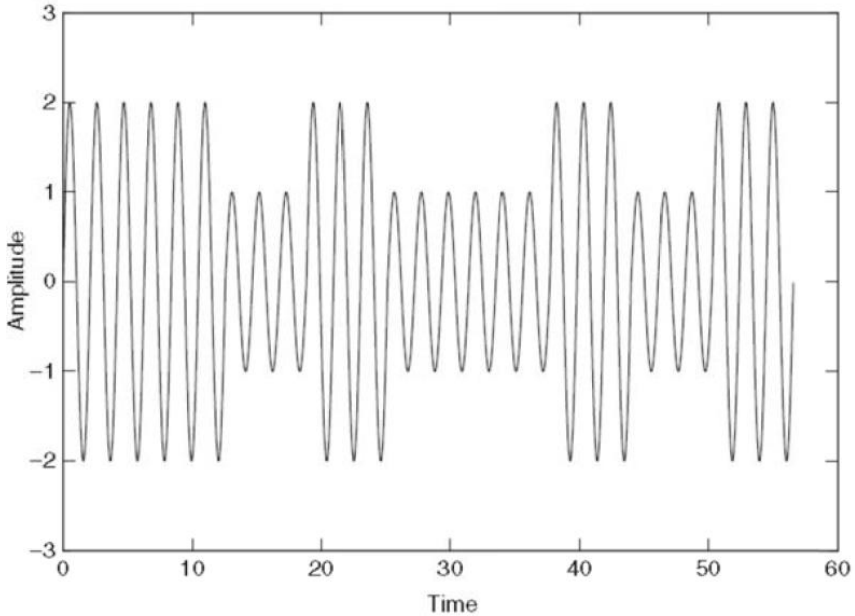
Amplitudska modulacija

- Amplitudska modulacija (*ASK – Amplitude Shift Keying*): frekvencija i faza nosećeg signala ostaju konstantne, a menja se amplituda, tj. signalni elementi se razlikuju samo po amplitudi

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}} \cos(2\pi f_c t + \phi)$$

$E_i(t)$ – energija simbola;
konstanta tokom jednog simbol-intervala
$i = 0, \dots, m-1$ (m amlitudskih nivoa)
Najčešće $m = 2$ (binarna ASK)

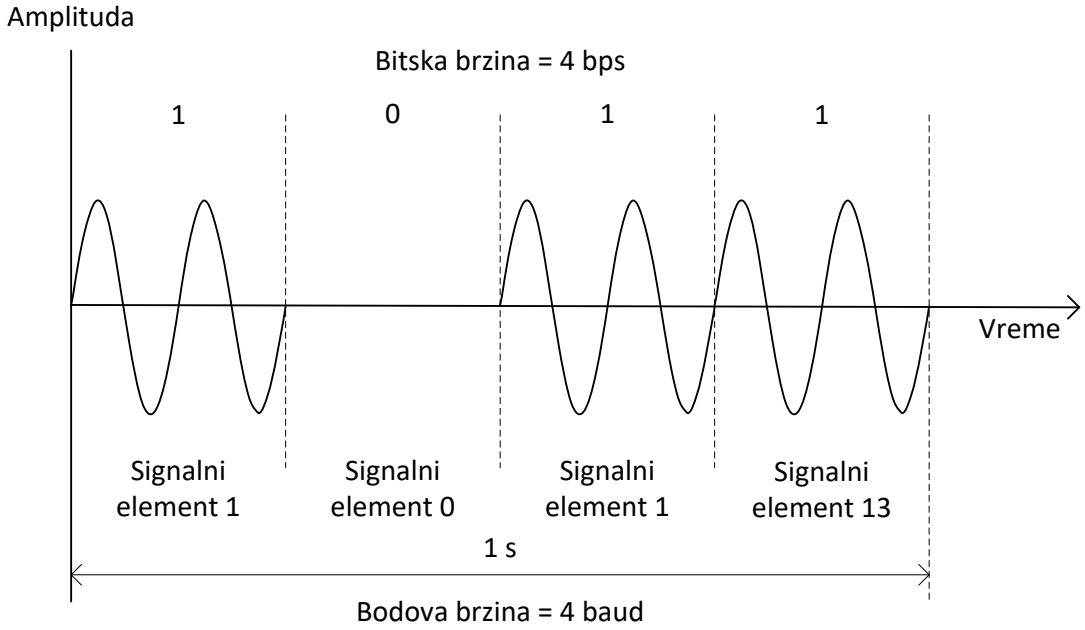
110100101

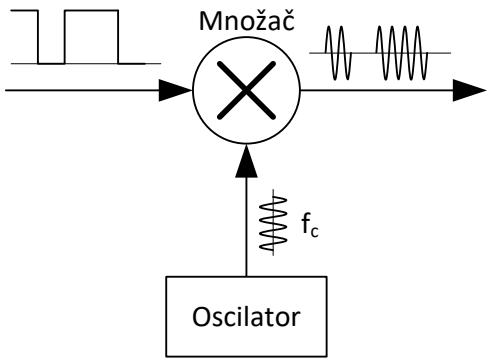


$T = 10$
$E_0 = 5$
$E_1 = 20$

Amplitudska modulacija

- OOK (*ON-OFF Keying*): specijalan slučaj binarne ASK, gde je $E_0(t) = 0$ i $E_1(t) > 0$
- Uključivanje/isključivanje oscilatora frekvencije f_c



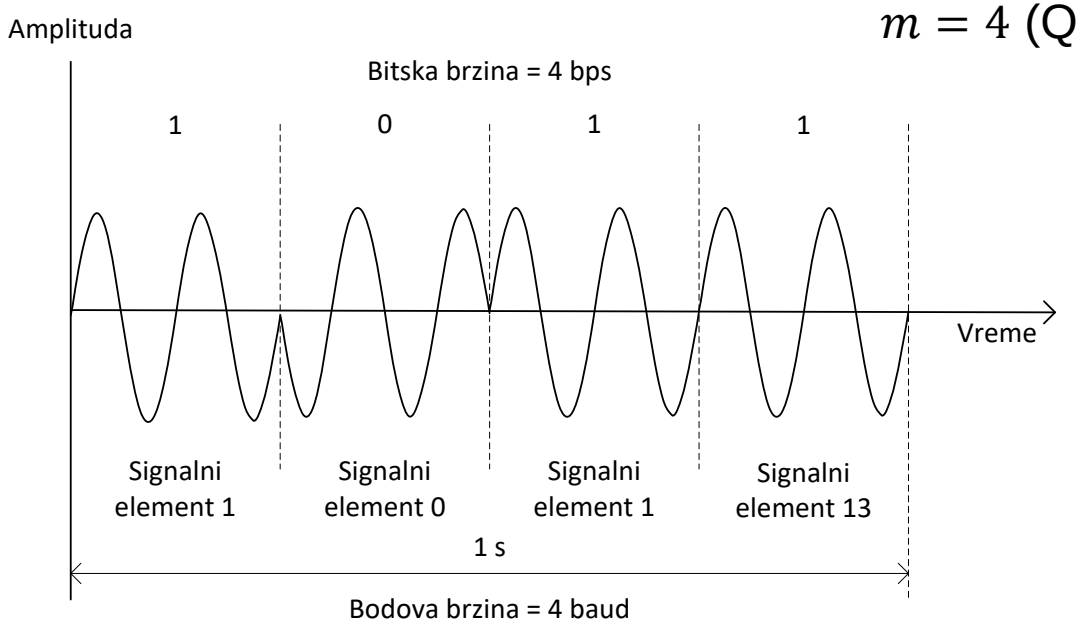


Fazna modulacija

- *Fazna modulacija* (PSK – *Phase Shift Keying*): promena faze nosećeg signala se koristi za predstavljanje dva ili više različitih signalnih elemenata.

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f t + \phi_i(t))$$

$\phi_i(t)$ – fazni pomak
(početna faza signalnog elementa);
$i = 0, \dots, m-1$ (m faznih nivoa)
$m = 2$ (BPSK) – binarna PSK
$m = 4$ (QPSK) – kvadraturna PSK



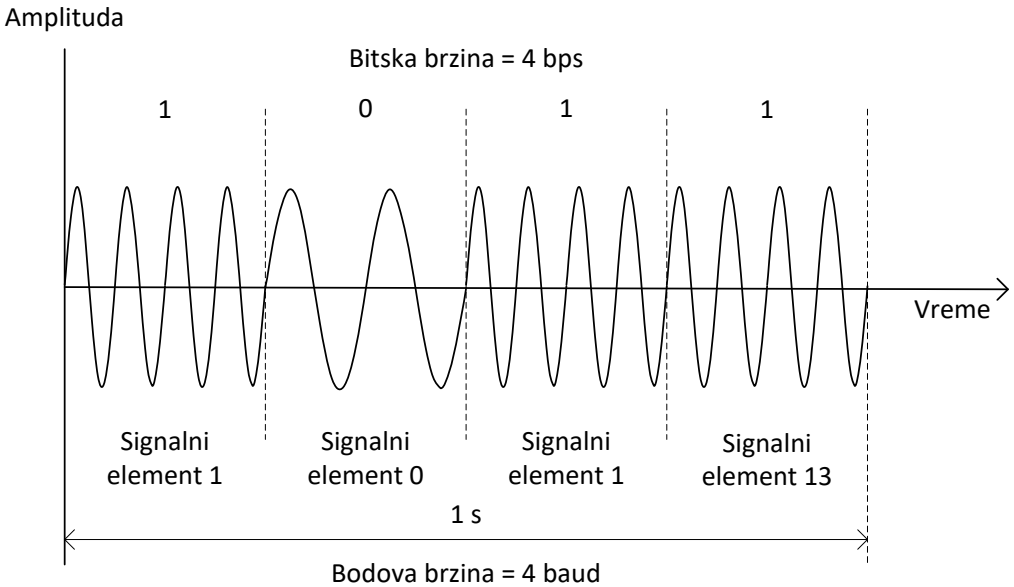
U poređenju sa ASK, PSK je otporniji na šum, jer šum može lakše da promeni amplitudu nego fazu signala

Frekventna modulacija

- *Frekventna modulacija* (FSK – *Fequency Shift Keying*): signalni elementi se razlikuju po frekvenciji:

$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_i(t) + \phi)$$

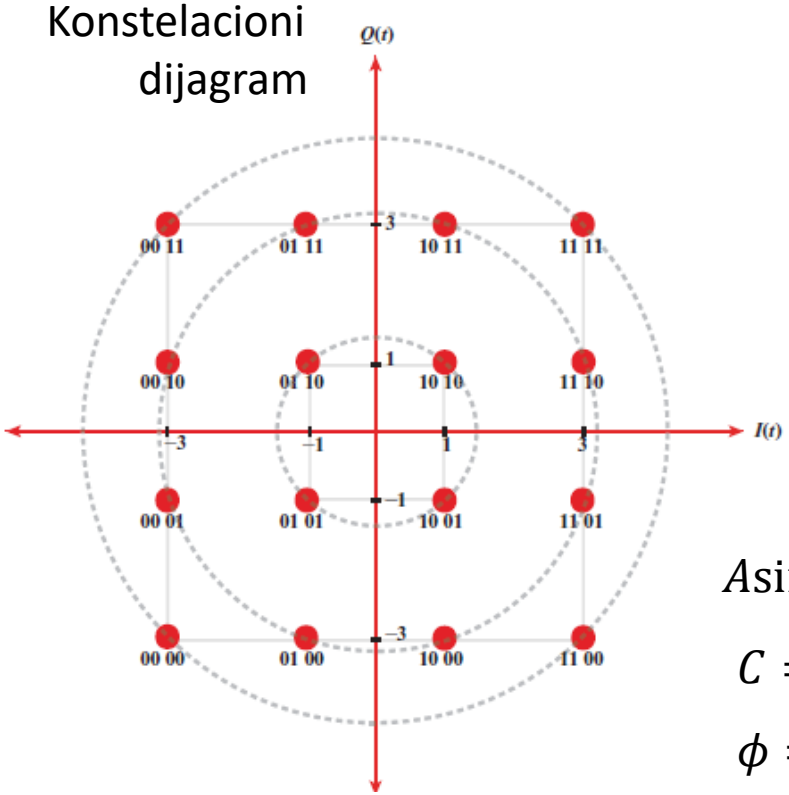
$f_i(t)$ – frekvencija signalnog elementa
$i = 0, \dots, m-1$ (m frekvencija)
$m = 2$ (BFSK) – binarna FSK

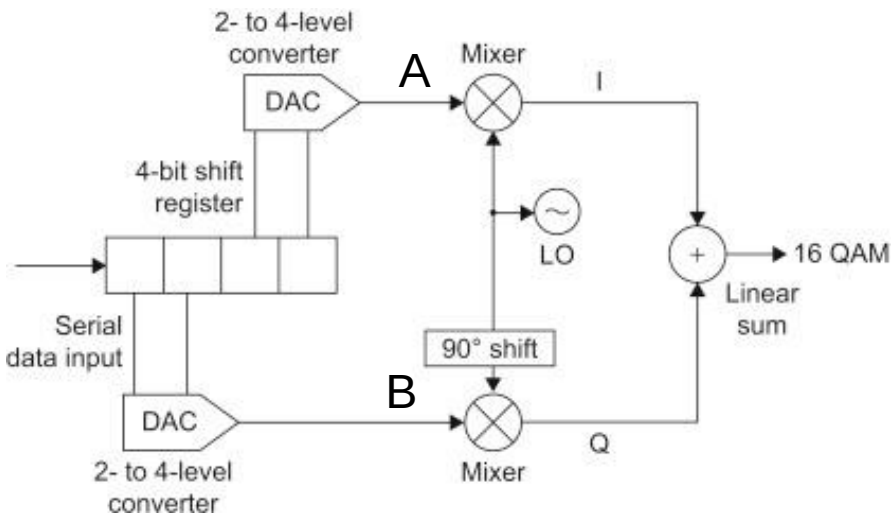


QAM

- *Kvadraturna amplitudska modulacija* (*QAM - Quadrature Amplitude Modulation*) modulacija predstavlja kombinaciju amplitudske i fazne modulacije, ASK i FSK)
- Npr. 16QAM ($m = 16$) kombinuje 4 amplitude i 4 faze radi kreiranja 16 različitih signalnih elemenata:

Konstelacioni dijagram





$$A\sin(2\pi f_c t) + B\cos(2\pi f_c t) = C sin(2\pi f_c t + \phi)$$

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}$$

$$\phi = \arctan(\frac{B}{A})$$

Interferencija i šum

- Interferencija: pojava uzajamnog uticaja elektromagnetnih talasa, čiji rezultat može biti njihovo slabljenje, pojačanje ili poništavanje.
- U radio komunikaciji, interferencija se odnosi na prisustvo neželjenih, ometajućih signala koji potiču iz eksternih izvora (u odnosu na predajnik i prijemnik).
  - *Multiple access interferencija*: više korisnika ili predajnika pokušava da istovremeno deli isti frekventni opseg
  - *Kanalna interferencija* potiče od korisnika ili predajnika iz nekog drugog sistema, ali koriste isti frekventni opseg (kanal), kao i dati sistem.
  - *Interferencija susednih kanala* se odnosi na ometajući uticaj izvora zračenja koji koristi susedni frekventni kanal – bilo zbog toga što se deo energija zračenja ometajućeg izvora „preliva“ na susedne kanale, bilo zbog nedovoljno selektivnih filtera prijemnika.

Šum

- *Termički šum*, ili samo šum: posledica termičkog kretanja elektrona u provodnoj sredini (npr. u elektronskim kolima predajnika i prijemnika) i prenosnom medijumu i u funkciji je temperature.
- U funkciji temperature: viša temperatura => veće slučajne fluktuacije napona u elektronskom kolu.
- Termički šum se **ne može** eliminisati => gornja granica performansi komunikacionih sistema je određena nivoom šuma kojem je sistem izložen.
- *Beli šum*: uniformno distribuiran u frekventnom spektru (postoji na svim frekvencijama)
- Karakteriše spektralnom gustinom snage (PSD – *Power Spectral Density*):

$$N_0 = kT_e[W/Hz]$$

- $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ Bolcmanova konstanta i T_e temperatura okruženja izražena u kelvinima.
- N_0, se izražava u jedinicama vat po hercu, odnosno predstavlja snagu koja je sadržana u frekventnom opsegu širine $1Hz$.

Šum

- Snaga šuma u frekventnom opsegu širine $B\ Hz$ iznosi:

$$P_N = N_0 B[W]$$

- *Odnos signal-šum* (*SNR – Signal-to-Noise Ratio*): odnos između nivoa signala i nivoa šuma kojem je signal izložen:

$$SNR = \frac{P_s}{P_N} = \frac{P_s}{N_0 B} = \frac{P_s}{kT_e B}$$

- gde je P_s snaga (korisnog) signala i P_N snaga šuma. Odnos signal-šum se uobičajeno izražava u decibelima:

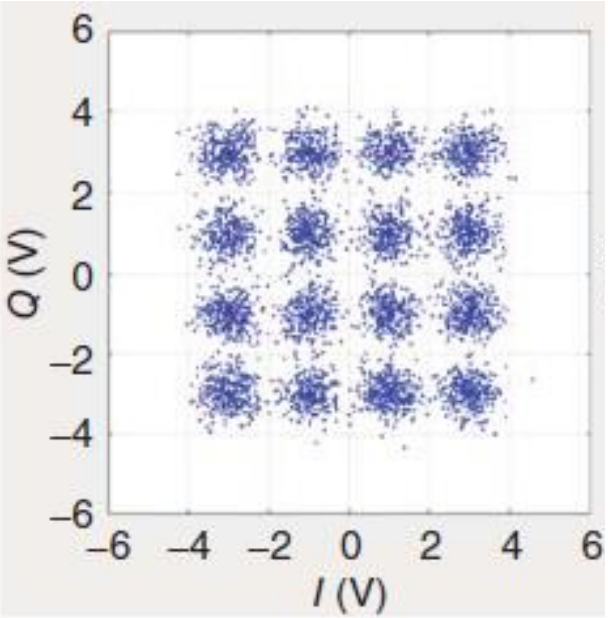
$$SNR_{dB} = 10log\frac{P_s}{P_N}$$

- Količina šuma koja se unosi u sistem srazmerna širini propusnog opsega $B = f_H - f_L$. Dakle, što je propusni opseg širi, snaga šuma će biti veća i odnos signal-šum manji.

Šum

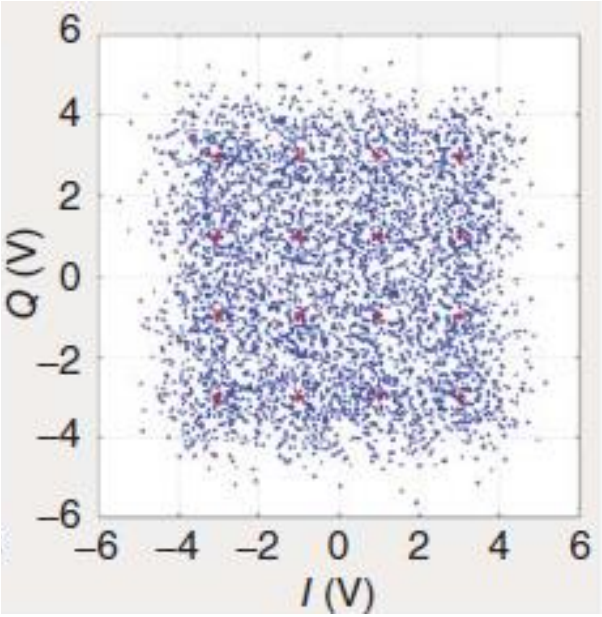
- **Primer**: ilustracija uticaja šuma na 16QAM modulisan signal

SNR = 16 dB



Snaga signala je 40x veća od snage šuma

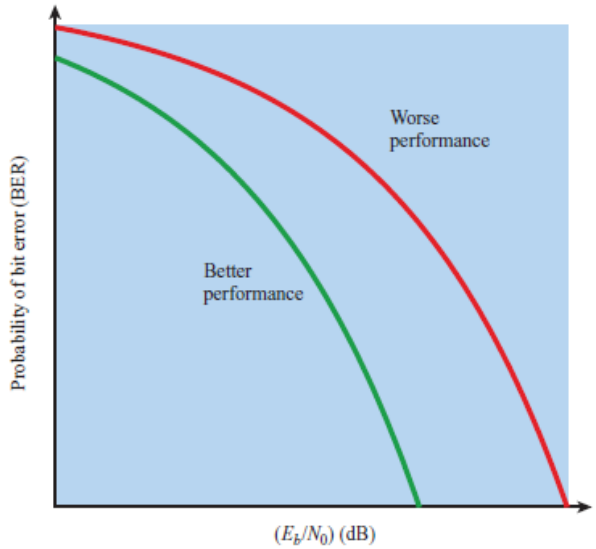
SNR = 10 dB

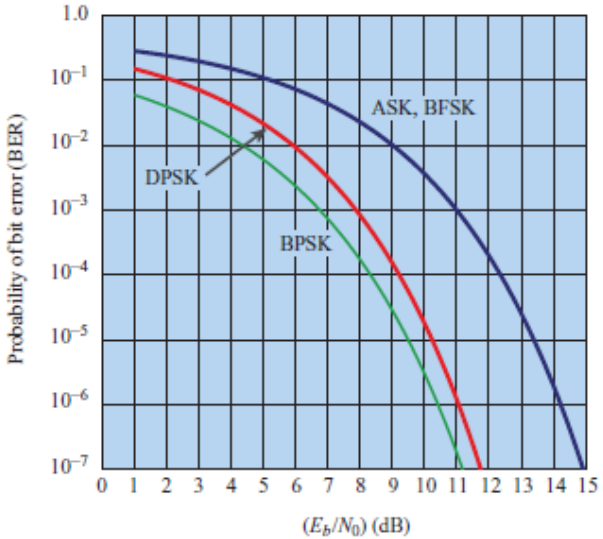


Snaga signala je 10x veća od snage šuma

Šum

- Posledica šuma je pojava grešaka na prijemu.
- *BER* (*Bit Error Rate*) – *bitska stopa grešaka*: verovatnoća da bit informacije bude pogrešno primljen (npr. $BER = 10^{-6}$ znači da se, u proseku, svaki milioniti bit prenosi sa greškom)
- BER se obično izražava u odnosu na E_b/N_0 (a ne u odnosu na SNR)
- E_b - energija signala po bitu (tokom trajanje jednog bit-intervala)
- N_0 spektralna gustina snage šuma
- BER je uvek opadajuća funkcija odnosa E_b/N_0.P



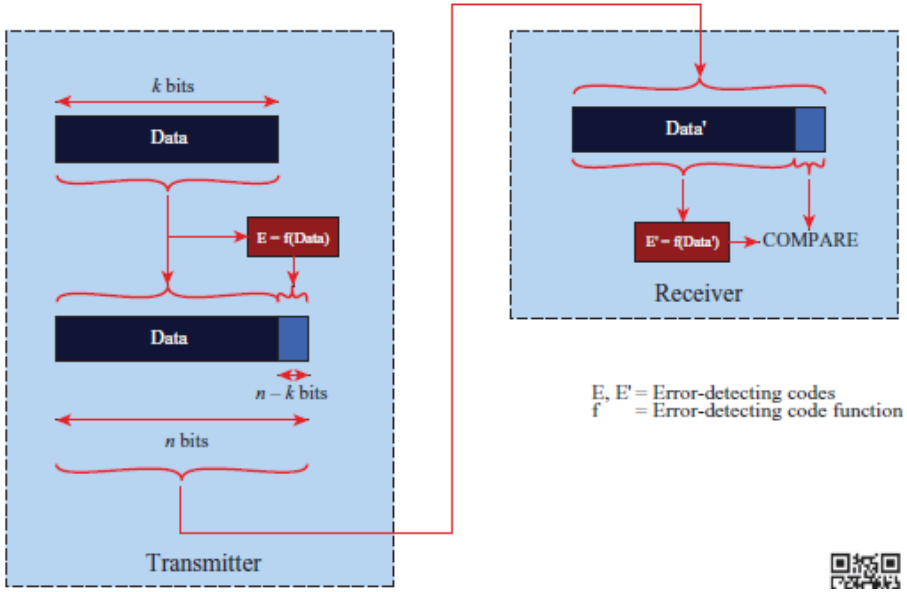


Kontrola ispravnosti prenosa

- Kako primalac podataka da uoči grešku u prenosu i šta da radi nakon uočene greške:
- Generalno, postoje tri pristupa za suočavanje sa greškama u prenosu:
  - Kodovi za detekciju grešaka (kako uočiti grešku)
  - Kodovi za korekciju grešaka (kako ispraviti grešku, ako je to moguće)
  - Zahtev za ponavljanje (šta uraditi ako greška ne može da se ispravi)

Detekcija grešaka

- Opšti princip:
  - Predajnik proširuje blok podataka koji se prenosi dodatnim bitovima - kôd za detekciju grešaka
  - Kôd za detekciju grešaka se izračunava primenom određenog algoritma na bitove koji čine originalni sadržaj paketa (tzv. informacioni bitovi)
  - Kôd za detekciju greška (ili bitovi provere) se pridodaje bloku podataka čime se formira paket ukupne dužine n bita.
    - Na prijemnoj strani, Prijemnik deli primljeni paket bitove podataka i kôda za proveru greška i primenjuje identičan algoritma za detekciju grešaka
    - Ukoliko se izračunati kôd za detekciju grešaka razlikuje od primljenog, algoritma signalizira grešku u prenosu.



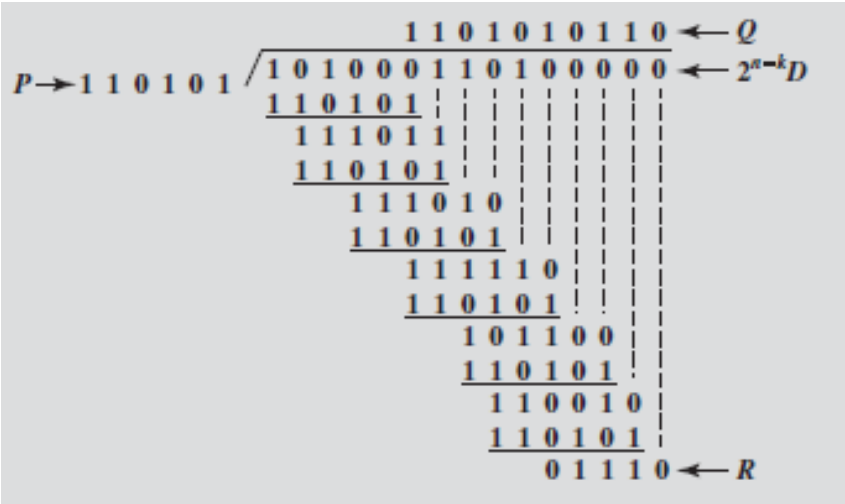
Efikasnost detekcije grešaka zavisi: algoritma za detekciju grešaka tako i od broja bita za proveru. Što je kôd za detekciju grešaka duži, to će efikasnost detekcije grešaka biti veća, ali po cenu trošenja komunikacionog kapacitet.

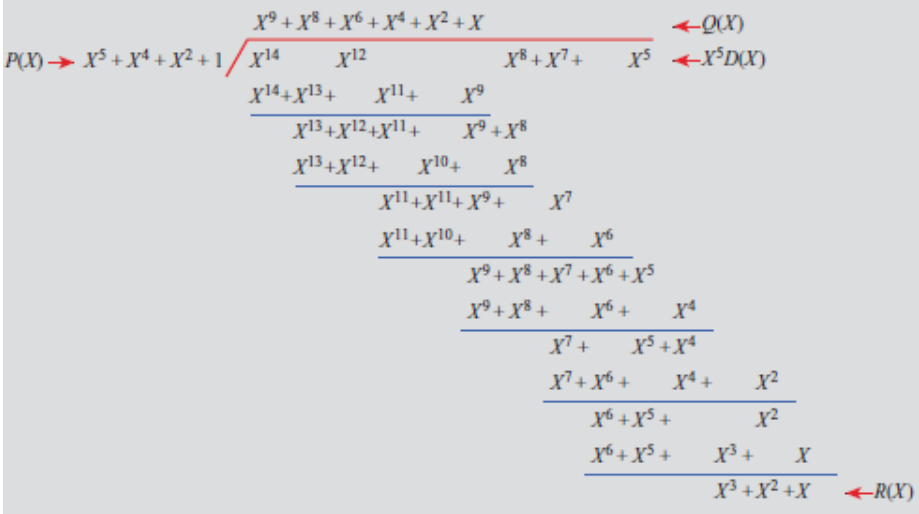
Detekcija grešaka
- bit parnosti -

- Najjednostavnija tehnika za detekciju grešaka je dodavanje bita parnosti na kraj bloka podataka (znamo kako to radi).
- Bitom parnosti se može detektovati neispravan prenos samo ukoliko u primljenom paketu postoji neparan broj bit-grešaka (1, 3, 5,...)
- Tehnika bita parnosti je posebno osetljiva na impulse smetnje, koje traju duže od jednog bit intervala.
- Samo ako je dužina paketa mala i BER malo.
- U bežičnom prenosu, tehnika bita parnosti se retko koristi.

Detekcija grešaka
- CRC -

- Opšti princip:
  - Za blok podataka dužine *k* bita, predajnik generiše $(n-k)$ bita provere tako da je rezultujući paket (posmatran kao sekvenca bita) deljiv bez ostatka sa unapred definisanim brojem.
  - Prijemnik, deli primljeni paket sa tim brojem i ukoliko je rezultatu deljenja nema ostatka (tj. ostatak je jednak 0) potvrđuje ispravan prijem.
- Da bi se pojednostavila računica, umesto standardnih operacija binarnog sabiranja i oduzimanja, u CRC aritmetici se koristi logički operator XOR, odnosno sabiranje po modulu 2 bez prenosa između susednih bit pozicija



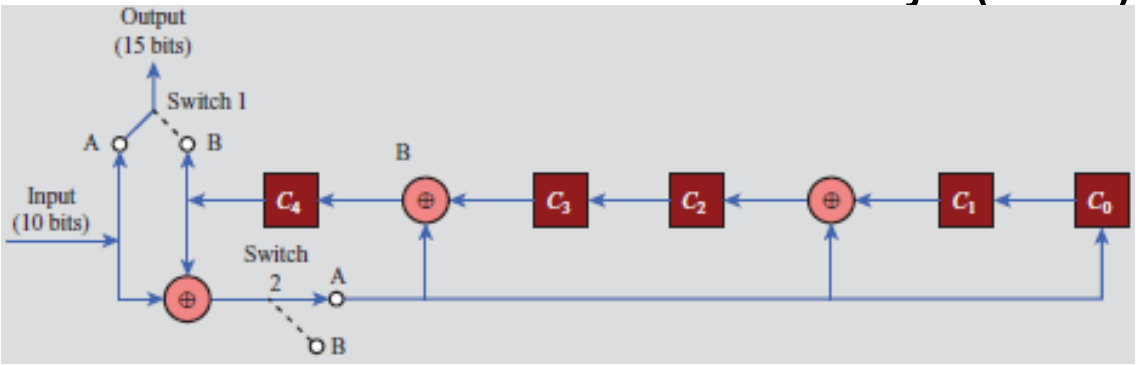


Detekcija grešaka
- CRC -

- Primeri generatorskih polinoma koji se koriste u komunikacionim sistemima:

CRC-16	$x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$
CRC-CCIT (X.25)	$x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
CRC-32 (Ethernet)	$x^{31} + x^{26} + x^{23} + x^{22} + x^{16} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^5 + x^4 + x^2 + x^1 + 1$
CRC-8	$x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + 1$

- Jednostavna hardverska realizacija (LFSR):

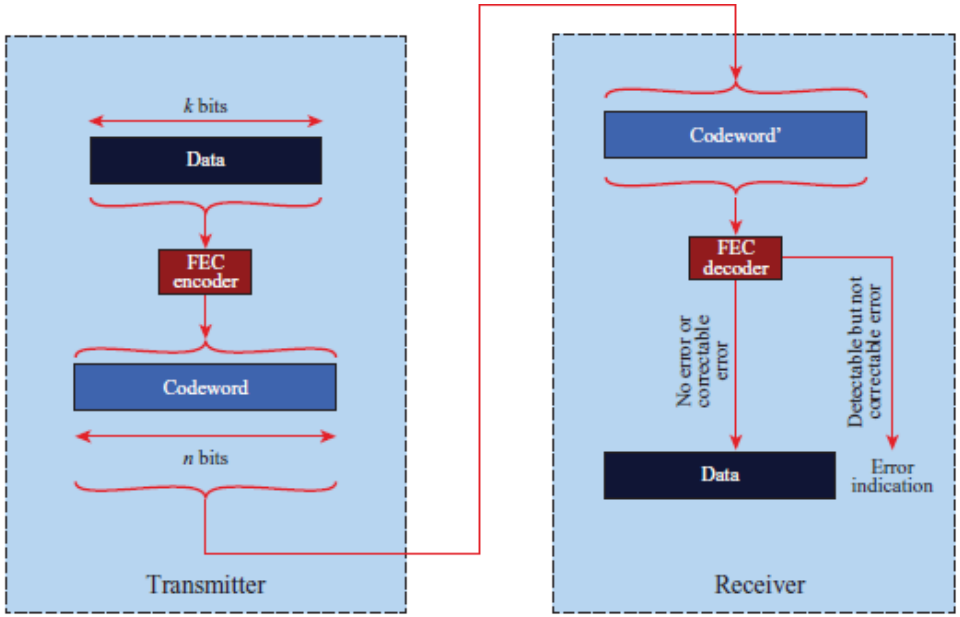


$P(X) = X^5 + X^4 + X^2 + 1 \quad n = 15, k = 10$

Kôdovi za korekciju grešaka

- FEC (*Forward Error Correction*): Mogućnost da prijemnik ne samo detektuje već i ispravi greške u primljenom paketu

- Na predajnoj strani, FEC koder preslikava k-bitni blok podataka n-bitni blok ($n > k$), tzv. kodnu reč, koja se bežičnim putem prenosi do prijemnika.
- Tokom prenosa, mogu nastati greške
- Na strani prijemnika, dolazni signal se demodulacijom pretvara u kodnu reč i kodna reč se FEC dekoderom preslikava na blok podataka.
- Čak iako kodna reč sadrži greške, preslikaće se u ispravni blok podatka (ne uvek, ali u velikom broju slučajeva)



Kôdovi za korekciju grešaka

- Mogući ishodi procesa FEC dekodiranja:
  - Ako je paket primljen bez grešaka, FEC dekoder generiše ispravan blok podataka (onakav kakav je poslat).
  - Za određene rasporede grešaka u kodnoj reči, moguće je da FEC dekoder detektuje i koriguje sve prisutne greške.
  - Za određene rasporede grešaka, FEC dekoder može da detektuje, ali ne i da koriguje greške. U ovim slučajevima, dekoder signalizira prijemniku da primljeni paket sadrži neispravljivu (*uncorrectable*) grešku.
  - Za određene, tipično veoma retke, rasporede grešaka, FEC dekoder detektuje grešku, ali je ne ispravlja korektno. Dekoder, uveren da je dobro korigovao greške, zapravo isporučuje prijemniku neispravan blok podataka.
  - Za određene, još ređe, rasporede grešaka, FEC detektor ne detektuje greške u prijemu iako one postoje i preslikava primljenu kodnu reč u blok podataka koji se razlikuje od poslatog. Konačni ishod je kao u prethodnom slučaju – prijemnik dobija neispravni blok podataka.

Kôdovi za korekciju grešaka

- Ilustracija principa kodova za korekciju grešaka
  - Neka se prenosi blokovi podataka dužine 1 bita.
  - Umesto da šalje samo 1 bit (0 ili 1), predajnik šalje 4 bita, tj. 0000 ako treba poslati 0, odnosno, 1111 ako treba poslati 1.
  - U prenosu nastaju greške, koje menjaju vrednosti nekih od 4 bita:
  - Ako prijemnik primi više 0 od 1-ca (npr. 0010 ili 0110), zaključuje da je poslata 1. Slično za slučaj kada primi više 1-ca od 0
  - Ako prijemnik primi jednak broj 0 i 1-ca (npr. 0011), prijavljuje grešku u prenosu koju ne može da koriguje
  - Dakle, ovaj sistem može da koriguje greške na jednom bitu, i da detektuje greške na dve bit pozicije.
  - Greške na 3 ili 4 bit pozicije dovode do pogrešne korekcije.

- Kodovi za korekciju grešaka se retko koriste u bežičnim embeded primenama, s obzirom na veliku redundansu koju unose.
- Po pravilu, u embeded sistemima, koriste se kodovi za detekciju grešaka u kombinaciji sa ARQ tehnikama.
- Kodovi za korekciju grešaka su pogodni za *broadcast* sisteme, poput zemaljske digitalne TV, gde fizički ne postoji mogućnost za ARQ.
- Koriste se i u satelitskim kumunikacijama, koje su karakteristične po velikom propagacionom kašnjenju signala od predajnika i prijemnika (zbog velike udaljenosti satelita), što otežava primenu ARQ.

ARQ

- ARQ (*Automatic repeat request*): način za oporavak od greške - nakon detektovane greške, primalac automatski zahteva ponovno slanje. Sledi generalna ARQ procedura:
  1) *Prenos podataka*: Pošiljalac šalje pakete podatke primaocu i paketi se nezavisno prenose. Svaki paket, pored podataka, sadrži i kôd za proveru
  2) *Detekcija grešaka*: Primalac proverava primljene podatke koristeći odgovarajuću tehniku za detekciju grešaka
  3) *ACK ili NACK*:
     - U slučaju ispravnog prenosa, primalac šalje potvrdu prijema pošiljaocu (ACK)
     - U slučaju greške, primalac šalje negativnu potvrdu (NACK paket), ili ne šalje nikakvu potvrdu
  4) *Zahtev za ponovnim slanjem*: Nakon prijema NACK-a, ili nedostatka ACK potvrde u određenom vremenskom intervalu, pošiljalac automatski ponovo šalje iste podatke.
  5) *Ponavljanje procesa*: Koraci od 2 do 4 se ponavljaju dok primalac uspešno ne primi podatke bez grešaka ili dok se ne dostigne unapred definisani broj pokušaja ponovnog slanja.

ARQ
- varijante -

- *Stop-and-Wait ARQ*:
  - Pošiljalac ne šalje sledeći paket podataka sve dok ne primi potvrdu za prethodno poslati paket podataka.
- *Go-Back-N ARQ*:
  - Pošiljaocu može, ne čekajući na potvrdu, da pošalje više uzastopnih paketa (najviše njih N).
  - Potvrda, koju primi, potvrđuje sve poslate, a ne potvrđene paket.
  - U slučaju izostanak potvrde pošiljalac ponavlja slanje svih paketa koje je poslao posle poslednje potvrđenog paketa.
- *Selective Repeat ARQ*: Kombinuje dva prethodna mehanizma.
  - Pošiljalac može da pošalje više uzastopnih paketa (kao kod „*Go-Back-N*“).
  - Primalac potvrđuje svaki paket nezavisno (kao kod „*Stop-and-Wait*“).
  - Ako za neki od poslatih paketa ne primi potvrdu, u određenom vremenskom intervalu, pošiljalac ponovno šalje samo taj paket.