1 Bežična komunikacija

Mnogi savremeni embeded sistemi su, po svojoj organizaciji, distribuirani (razuđeni), što znači da su sačinjeni od više uređaja, ili, kaže se, čvorova, gde svaki čvor obavlja jednu specifičnu funkciju (npr. prikuplja informacije od jednog ili nekoliko senzora ili pobuđuje neki aktuator). Primere takvih sistema nalazimo u vozilima, industrijskim postrojenjima, robotima, ali i u sistemima za nadgledanje životne sredine, u inteligentnim zgradama, sistemima u poljoprivedi i zdravstvu. Zajednička karakteristika svih ovih sistema jeste potreba za komunikacijom između čvorova/uređaja. Svi izvori informacije moraju biti u mogućnosti da dostave svoje informacije na mesta gde su te informacije potrebne – aktuatoru ili korisniku, ali i da međusobno sarađuju u stvaranju precizne slike realnog sveta. Za pojedine tipove aplikacija, ovakve mreže senzora i aktuatora se mogu relativno lako realizovati korišćenjem „kablovskih“ tehnologija za umrežavanje (npr. sistemi u vozilima). Za mnoge druge tipove aplikacija, povezivanje brojnih razuđenih entiteta žičanim vezama je nepraktično ili čak nemoguće. Umrežavanje žičanim vezama je skupo, a održavanje ovakve mreže je komplikovano, imajući u vidu potencijalno veliki broj čvorova koje bi trebalo povezati. Takođe, žičane veze sprečavaju mobilnost uređaja i često onemogućavaju da senzori i aktuatori budu postavljeni dovoljno blizu pojave koju bi trebalo da nadgledaju i/ili kojom bi trebalo da upravljaju. Otuda, *bežična komunikacija* između uređaja predstavlja neizbežan zahtev u mnogim tipovima embeded sistema.

Ovaj predmet je upravo posvećen primeni bežične komunikacije u embeded sistemima. Cilj predmeta je da studenti ovladaju osnovnim teorijskim principima iz oblasti prenosa podataka, umrežavanja, protokola i embeded programiranja, kao i da usvoje inženjerske veština potrebne za projektovanje i realizaciju bežičnih embeded uređaja i senzorskih mreža.

U okviru prvog dela ovog uvodnog poglavlja obrađene su fizičke karakteristike i ograničenja bežičnog prenosa, prostiranje radio talasa, frekventni opsezi i antene. Drugi deo obuhvata modulaciji i demodulaciji signala i tehnike za kontrolu ispravnosti prenosa. Materija je izložena do nivoa razumevanja osnovnih fizičkih fenomena i tehničkih principa bežičnog prenosa.

1.1 Prenosni medijum

Komunikacija u tehničkom kontekstu se odnosi na proces razmene informacija, podataka ili signala između dva ili više entiteta, sistema ili uređaja. Ova razmena može se odvijati putem različitih sredstava, uključujući žičane ili bežične kanale, protokole i standarde. U tehničkim oblastima kao što su računarstvo, telekomunikacije i mrežne tehnologije, komunikacija je fundamentalni koncept koji omogućava prenos podataka i instrukcija između različitih komponenti u svrhu deljenja informacija, koordinacije i kontrole.

Osnovne komponente svakog komunikacionog sisteme, odnosno sistem za prenos podatka su (Sl. 1):

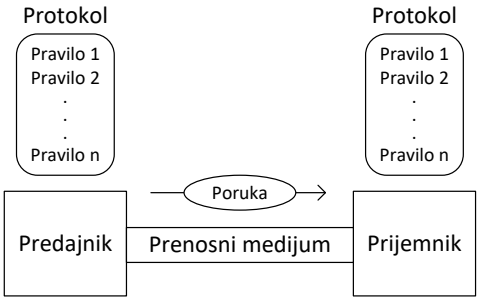
Predajnik: entitet ili uređaj koji pokreće proces komunikacije slanjem informacija ili signala

Prijemnik: entitet ili uređaj koji prima i tumači poslate informacije ili signale

Poruka: informacija koja se razmenjuje

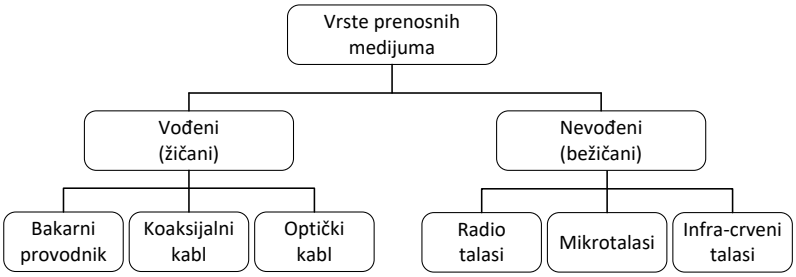
Medijum: fizički kanal kroz koji se vrši komunikacija. Može biti žičani ili bežični.

Protokol: skup pravila i konvencija koji definišu format i tumačenje razmenjenih informacija. Protokoli obezbeđuju da predajnik i prijemnik pravilno razumeju i interpretiraju podatke.



Sl. 1 Komponente sistem za prenos podatka

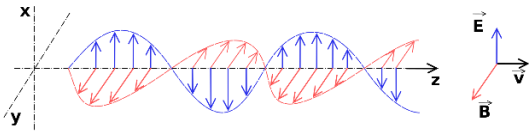
U kontekstu sistema za prenos podataka, pod pojmom prenosni medijum (*transmission medium*) se podrazumeva fizički put, ili kanal između predajnika i prijemnika. Postoje dve vrste prenosnih medijuma: vođeni (*guided*) i nevođeni (*unguided*), Sl. 2. U oba slučaja, komunikacija se ostvaruje propagacijom elektromagnetnih talasa. Kod vođenih medijuma, talasi se vode (sprovode) duž čvrstog materijala, kao što je par bakarnih provodnika, bakarni koaksijalni kabl, ili optički kabl. Atmosfera ili, generalno, otvoreni prostor je primer nevođenog medijuma, koji omogućava prostiranje elektromagnetnih talasa bez vođenja (navođenja, usmeravanja). Za nevođeni način prenosa uobičajeno se koristi pojam bežični prenos (*wireless transmission*). Pod bežičnom komunikacijom se danas uobičajeno podrazumeva elektronski prenos informacija posredstvom elektromagnetnih talasa. Primeri bežičnih komunikacionih sistema su: radio i TV emitovanje, satelitske komunikacije, mobilna (celularna) telefonija, lokalne bežične mreže (WLAN) itd.



Sl. 2 Vođeni i nevođeni prenosni medijumi

1.1.1 Elektromagnetsko zračenje

Elektromagnetni talas (ili, zračenje) je kombinacija oscilujućeg električnog i magnetnog polja koja zajedno putuju kroz prostor u obliku međusobno upravnih talasa (Sl. 3). Električno i magnetno polje elektromagnetnog talasa su međusobno zavisna i neprekidno se menjaju. Dok električno polje osciluje, ono generiše magnetno, koje zauzvrat generiše električno i tako ukrug. Međuzavisnost između električnog i magnetnog polja stvara talas koji se održava sam od sebe i putuje kroz prostor. Elektromagnetni talasi se mogu kretati kroz vakuum, kao i kroz različite materijalne sredine, poput vazduha, vode i čvrstih objekata.



Sl. 3 Elektromagnetni talas: slika prikazuje elektromagnetni talas koji se propagira sleva nadesno, duž z ose. Električno polje je u vertikalnoj, a magnetno u horizontalnoj ravni.

Električno i magnetno polje su vektorska polja. Svakoj tački u prostoru, u kome egzistira vektorsko polje, pridružen je vektor koji odražava intenzitet i pravac polja u toj tački. Vektori električnog ($\vec{E}$) i magnetnog polja ($\vec{B}$) su međusobno upravni i upravni na pravac prostiranja elektromagnetnog talasa. U svakoj tački prostora, dva polja se neprekidno menjaju, tako da kad intenzitet električnog polja raste, magnetnog opada, i obrnuto, tj. oba polja osciluju istom frekvencijom, ali su oscilacije fazno pomerene za 90^0.

Orijentacija vektora $\vec{E}$ i $\vec{B}$ u odnosu na pravac prostiranja ($\vec{v}$) određuje *polarizaciju* elektromagnetnog talasa. Polarizacija elektromagnetnog talasa može biti linearna i cirkularna. Kod linearne polarizacije, vektori $\vec{E}$ i $\vec{B}$ ne menjaju orijentaciju duže pravca prostiranja talasa. Orijentacija *linearno polarizovanog* talasa se određuje u odnosu na ugao koji vektor $\vec{E}$ zaklapa sa površinom Zemlje. Talas na Sl. 3 je primer *vertikalno polarizovanog* elektromagnetnog talasa, pod pretpostavkom da je ravan $y - z$ paralelna sa površnim Zemlje. Ako bi vektori $\vec{E}$ i $\vec{B}$ zamenili mesta na Sl. 3, talas bi imao *horizontalnu polarizaciju*. Kod *cirkularne polarizacije*, vektori $\vec{E}$ i $\vec{B}$ nemaju fiksnu orijentaciju, već rotiraju u ravni koja je upravna na pravac prostiranja. Polarizacija elektromagnetnog talasa zavisi od tipa emisione antene.

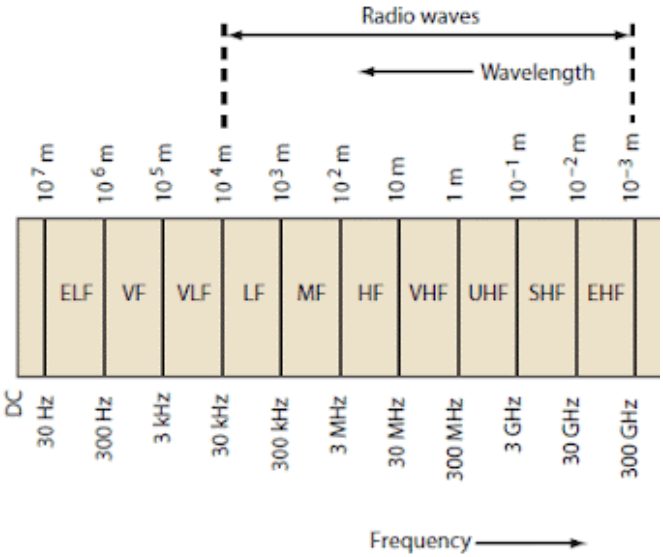
1.2 Elektromagnetni spektar

Elektromagnetni spektar je zbirni pojam za sve tipove elektromagnetnog zračenja, što obuhvata: gama zračenja, X-zračenje, ultraljubičastu radijaciju, vidljivu svetlost, infracrvenu radijaciju, mikrotalase i radio talase. Klasifikacija je prema frekvenciji, odnosno talasnoj dužini, zračenja. U bežičnim komunikacijama, od interesa su radio talasi i mikrotalasi, odnosno elektromagnetni talasi frekvencije manje od $300\ GHz$.

	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	$\mathbf{< 1\ GHz}$

Svaki bežični komunikacioni sistem koristi radio talase određenog (obično uskog) opseg frekvencija. Izbor frekvencije zavisi od mnogih faktora. Na primer, neke frekvencije su pogodne za prenos na veća rastojanja, dok druge bolje prodiru kroz prepreke, poput zgrada ili zidova. U mikrotalasnom opsegu frekvencija ($1 - 100\ GHz$) moguće je ostvariti visoko-usmereni prenos i efikasnu tačka-tačka komunikaciju, dok su radio frekvencije niže od $1\ GHz$ pogodne za neusmeren prenos. Takođe, različiti tipovi komunikacionih sistema često dele iste frekventne opsege. Dakle, bežični medijum je deljiv između velikog broja tipova korisnika i aplikacija sa specifičnim zahtevima u pogledu dometa komunikacije, intenziteta i kvaliteta saobraćaja. Iz tog razloga, upravljane elektromagnetnim spektrom (kao prirodnim resursom) u nadležnosti je regulatornih tela (nacionalnih i međunarodnih), čiji je zadatak da obezbede fer korišćenje raspoloživog spektra na dobrobit celog društva.

Prvi nivo u regulativi je podela frekventnog opsega radio talasa i mikrotalasa na bandove (*bands*), ili pojase, kao na Sl. 4. Bandovi ELF, VF i VLF su u oblasti veoma niskih frekvencija i ne koriste se u radio komunikaciji. Tradicionalni AM (amplitudsko modulisani) radio zauzima bandove LF, MF i HF, dok FM (frekventno modulisani) radio i zemaljska TV, kao i mobilna telefonija koriste bendove VHF i UHF. Bandovi SHF i EHF su uglavnom rezervisani za mikrotalasne radare i satelitsku komunikaciju. Bendovi se dalje dele na uže podopsege koji se rezervišu za pojedinačne servise ili dodeljuju na korišćenje zainteresovanim korisnicima.



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

Sl. 4 Elektromagnetni spektar u telekomunikacijama

1.2.1 Upotreba spektra

Spektar, tj. pojedini delovi spektra se mogu dodeljivati korisnicima na ekskluzivno ili zajedničko (deljivo) korišćenje.

Spektar dodeljen operateru: U ovom slučaju, određeni deo radio spektra se dodeljuje na ekskluzivno korišćenje provajderu komunikacionih usluga. Tipičan primer je mobilna telefonija, gde mobilni operater kupuje ili iznajmljuje radio spektar koji potom može isključivo on da koristi u datom geografskom području. Operater ima punu kontrolu nad spektrom i može da planira upotrebu različitih delova dodeljenog spektra u različitim geografskim regionima kako bi minimizovao interferenciju.

Spektar dodeljen servisu: U ovom slučaju, spektar se može koristiti samo za određene servise, ali nije dodeljen konkretnom operateru. Umesto toga, korisnici servisa (ili uređaja) mogu da koriste (sertifikovanu) opremu bez traženja odobrenja od regulatornog tela. Takođe, od korisnika se ne očekuje da primenjuje posebne mere zaštite od interferencije sa drugim sistemima koji koriste isti spektar. Umesto toga, sami sistemi moraju biti projektovani tako da autonomno sprečavaju interferenciju sa drugim sistemima u istom geografskom regionu. S obzirom da interferencija može da se pojavi samo između opreme istog tipa, koordinacija između različitih uređaja je relativno jednostavna. Ograničenje u snazi zračenja (koje važi za sve korisnike) je ključna komponenta ovog pristupa.

Slobodan spektar: se dodeljuje različitim servisima, kao i različitim operatorima. ISM bend na frekvenciji $2.45\ GHz$ je najpoznatiji primer slobodnog spektra, u kome, između ostalog, rade mikrotalasne pećnice, WiFi i Bluetooth. Da bi se u što većoj meri predupredila interferencija (međusobni uticaj) različitih sistema i korisnika, emitovanje u ISM bendu je podložno striktnoj regulativi, u smislu maksimalne snage emitovanja, vremena emitovanja i sl.

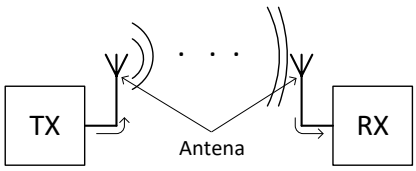
U tabeli ispod navedeni su primeri raspodele spektra različitim komunikacionim servisima.

$< 100\ MHz$	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

Različiti frekventni opsezi su pogodni za različite primene. Radio talasi nižih frekvencija se prostiru sa manjim slabljenjem, tako da je sa istom predajnom snagom moguće pokriti veću oblast nego talasima viših frekvencija. Sa druge strane, apsolutni propusni opseg (razlika između najviše i najniže frekvencije u dodeljenom segmentu frekventnog spektra) je manji na nižim frekvencijama, što znači da nije moguće ostvariti veliku brzinu prenosa podataka. Takođe, ponovna upotreba istog frekventnog opsega (u prostornom smislu) nije u toj meri efikasna kao na višim frekvencijama. Iz tog razloga, niske frekvencije je najbolje koristiti za servise koji zahtevaju dobru pokrivenost, ali malu zbirnu brzinu prenosa informacije. Primeri ovakvih servisa su pejdžer (koji više nije u upotrebi), ili uređaji poput mernih stanica, gde je količina podataka koja se prenosi po jednom korisniku mala, ili televizija, gde se isti informacija distribuira velikom broju korisnika. Takođe, niže frekvencije su pogodne za mobilnu telefoniju kada treba pokriti veliku, ali slabo naseljenu, geografsku oblast. Kod mobilnih sistema sa velikom gustinom korisnika, kao i za WLAN, po pravilu se koriste više frekvencije. Za komunikaciju u zatvorenom prostoru se koriste više (mikrotalasne) frekvencije.

1.3 Antene

Kod nevođenih medijuma, predaja (emitovanje) i prijem signala se postiže upotrebom *antena*. Na strani predaje, antena emituje (zrači) elektromagnetnu energiju u medijum (obično, vazduh), dok na strani prijema, antena prikuplja (apsorbuje) elektromagnetnu energiju iz okruženja. Dve osnovne konfiguracije u bežičnom prenosu su: usmereni (*directional*) i neusmereni (*omnidirectional*) prenos. Kod usmerenog prenosa, predajna antena fokusira energiju u elektromagnetni zrak. Da bi usmeren prenos bio moguć, predajna i prijemna antena moraju biti pažljivo poravnate (tj. precizno usmerene jedna ka drugoj). U slučaju neusmerenog prenosa, emitovani signal se prostire manje-više podjednako u svim pravcima i zbog toga može biti primljen od strane mnogih antena. U opštem slučaju, signali niže frekvencije su pogodni za neusmereni, dok je usmeravanje moguće tek na višim frekvencijama.



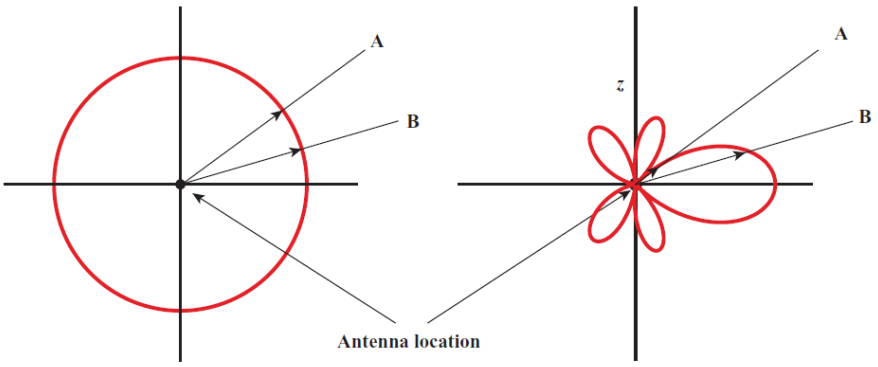
Sl. 5 Antene

Antena se može definisati kao električni provodnik ili sistem provodnika koji se koristi kako za emitovanje (zračenje) elektromagnetne energije tako i za prijem (prikupljanje) elektromagnetne energije (Sl. 5). U sistemima za bežičnu komunikaciju, radio-frekventna električna energija iz predajnika (TX) se u predajnoj anteni pretvara u elektromagnetnu energiju i zrači u okolina (atmosfera, prostor, voda). Na prijemnoj strani, energija elektromagnetnog talasa koji deluje na prijemnu antenu se pretvara u radio-frekventnu električnu energiju i sprovodi u prijemnik (RX). Potrebno je naglasiti da se ista antena može koristiti (i često se koristi) i za predaju i za prijem. Ovo je moguće jer svaka antena prenosi energiju iz predajnika u okruženje sa istim efikasnošću kao što prima energiju iz okruženja i

prenosi je prijemniku. Drugim rečima, karakteristike antene su iste bez obzira da li antena emituje ili prima elektromagnetnu energiju.

1.3.1 Dijagram zračenja

Antena emituje elektromagnetnu energiju u svim pravcima, ali obično ne i sa podjednakim intenzitetom u svim pravcima. Uobičajeni način za karakterizaciju performansi antene je dijagram zračenja, koji predstavlja grafički prikaz svojstava zračenja antene u funkciji prostornih koordinata (Sl. 6). Prema obliku dijagrama zračenja, razlikuju se: izotropne, usmerene i omnidirekcione antene. Na Sl. 6(a) je prikazan dijagram zračenja tzv. izotropne antene. Izotropna antena je tačka u prostoru koja podjednakim intenzitetom zrači elektromagnetnu energiju u svim pravcima. Reč je o idealizovanoj anteni, koja kao takva ne postoji u stvarnosti, već se koristi samo kao teorijska referenca za karakterizaciju performansi drugih tipova antena. Dijagram zračenja za ovaj tip antene je zapravo sfera sa antenom u centru. Međutim, radi jednostavnosti prikaza, dijagrami zračenja su skoro uvek prikazani kao dvodimenzionalni poprečni preseci trodimenzionalnog oblika u horizontalnoj i vertikalnoj ravni. Udaljenost od antene (tj. koordinatnog početka) do svake tačke na krivi zračenja je proporcionalna snazi koja se emituje iz antene u tom pravcu. Na Sl. 6(b) je prikazan dijagram zračenja tipične usmerene antene (*directional antenna*), kod koje je dominantan pravac zračenja usmeren ka jednoj osi – *osa maksimalnog zračenja*. Dijagram zračenja usmerene antene sadrži glavni snop i više sporednih snopova (listova). Dijagram zračenja omnidirekcione antene je kombinacija dijagrama izotropne i usmerene antene: u nekim ravnima zračenje je izotropno (ili skoro izotropno), kao na Sl. 6(a), dok je u drugim usmereno, kao na Sl. 6(b). Za primer omnidirekcionog dijagrama zračenja pogledati Sl. 10.



Sl. 6 Dijagram zračenja: (a) izotropna antena; (b) usmerena antena

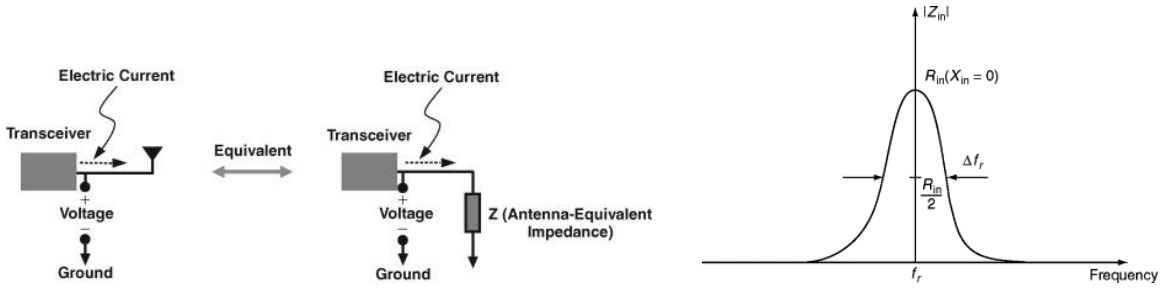
Stvarna veličina krive zračenja u dijagramu zračenja je proizvoljna. Ono što je važno je relativna udaljenost od položaja antene (koordinatnog početka) u svakom pravcu. Relativna udaljenost određuje relativnu snagu zračenja. Da bi se odredila relativna snaga u datom pravcu, crta se linija iz koordinatnog početka pod odgovarajućim uglom, i određuje se tačka preseka sa krivom zračenja. Sl. 6 prikazuje poređenje dva pravca prenosa, A i B, na primeru dijagrama zračenja izotropne i usmerene antene. Izotropna antena emituje elektromagnetnu energiju podjednakom snagom u svim pravcima, tako da su vektori A i B jednaki po dužini (Sl. 6(a)). Za krivu zračenja na Sl. 6(b), vektor B je duži od vektora A, što ukazuje na to da se više snage zrači u pravcu B nego u pravcu A, a relativne dužine ova dva vektora su proporcionalne iznosu snage koja se zrači u ta dva pravca. Treba naglasiti ovaj tip dijagrama prikazuje relativno pojačanje (dobitak) antene u svakom pravcu, a ne relativni domet zračenja, iako su ova dva parametra naravno povezana.

1.3.2 Karakteristike antene

Razumevanje različitih karakteristika antena je prvi i najvažniji korak pre donošenja odluke o tome koji tip antene je najprikladniji za određenu primenu. Iako svaku antenu prati mnoštvo električnih karakteristika, često se glavna kriterijum pri izboru tipa antene odnosi na njenu fizičko veličinu. U nastavku je predstavljeno nekoliko osnovnih parametara antene.

Impedansa

Impedansa antene je količnik napona i struje na priključnim tačkama antene. Izražava se u omima i predstavlja meru otpornosti antene protoku električne struje. Gledano iz perspektive predajnika/prijemnika antena deluje kao pasivno RLC kolo (kombinacija otpornika, kalema i kondenzatora) i može se predstaviti ekvivalentnom impedansom, koja je drugim krajem povezana na masu (Sl. 7(a)).



(a) (b)

Sl. 7 Impedansa antene: (a) antena kao ekvivalentna impedansa; (b) rezonantna frekvencija i širina opsega antene

Ako se antena nalazi u slobodnom prostoru, tako da se svi objekti nalaze na velikoj udaljenosti od antene, govorimo o sopstvenoj impedansi antene koja je definisana sledećim izrazom:

$$Z_A = R_z + R_g + jX_A$$

gde su R_z – otpornost zračenja, R_g – otpornost gubitaka i X_A – reaktivna komponenta impedanse antene. Snaga koja se razvija na realnom delu impedanse se pretvara u energiju koja se jedim delom zrači u vidu elektromagnetnih talasa, a drugim delom gubi pretvaranjem u toplotu. *Otpornost zračenja* (R_z) je virtuelna otpornost, koja kada se pomnoži sa kvadratom struje kroz priključak antene daje snagu koju antena zrači (ili apsorbuje). *Otpornost gubitaka* (R_g) potiče od otpornosti provodnika antene. Imaginarni (reaktivni) deo impedanse (X_A) predstavlja snagu koja se akumulira u samoj anteni i koja se ne zrači, već reflektuje nazad u napojni vod antene. Reaktivna komponenta je u vezi sa kapacitivnošću i induktivnošću antene i u funkciji je geometrije antene. Takođe, na reaktivnu komponentu impedanse bitno utiče i prisustvo i priroda predmeta u okolini antene. Impedansa antene je jednaka bez obzira da li se antena koristi kao emisiona ili prijemna.

Rezonantna frekvencija antene. Na Sl. 7(b) je prikazana magnituda impedanse antene u funkciji frekvencije. Frekvencija f_r, za koju je magnituda impedanse maksimalna, naziva se *rezonantna frekvencija* antene. Na rezonantnoj frekvenciji, reaktivni deo impedanse antene je jednak nuli, tako da antena deluje kao čisto otporno opterećenje, što znači da se celokupna snaga koja se dostavlja anteni zrači u prostor, odnosno nema akumuliranja energije u samoj anteni. Poželjno je da se antena koristi na svojoj rezonantnoj frekvenciji, jer je na toj frekvenciji snaga zračenje antene najveća i antena se može najbolje prilagoditi predajniku/prijemniku.

Širina opsega antene. Frekventni opseg Δf_r unutar kojeg je magnituda impedanse veća od polovine magnitude na rezonantnoj frekvenciji je *širina opseg antene*. Van ovog opsega, antena praktično nije

upotrebljiva s obzirom da se veliki deo snage koju predajnik isporučuje anteni reflektuje nazad ka predajniku zbog lošeg prilagođenja.

Efikasnost

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

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

Precizniji naziv parametra η_r je efikasnost zračenja antene, jer se član P_{in} odnosi na snagu na ulaznim priključcima antene i ne uzima u obzir gubitke na vodovima koji povezuju pojačavač i antenu, a koji su posledica. Ukupna efikasnost antene (η_t) se dobija kada se efikasnost zračenja antene pomnoži faktorom neusklađenosti impedanse (η_l):

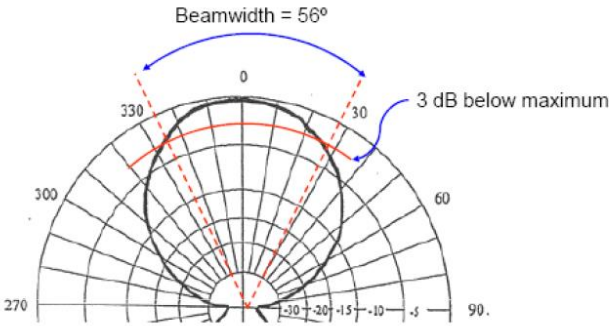
$$\eta_t = \eta_r \eta_l$$

Predajnika i antena su povezani transmisionim vodom. U zavisnosti od izlazne impedanse pojačavača, impedanse vode i impedanse antene, postoji mogućnost da se deo signala koji pojačavač šalje anteni reflektuje od antene unazad kroz vod do izlaza pojačavača. Zbog refleksija, na samom vodu se stvara stojeći talas, koji redukuje iznos snage koji pojačavač predaje opterećenju, tj. anteni. Da bi se refleksija minimizovala, neophodno je prilagoditi antenu pojačavaču, preciznim podešavanjem parametara transmisionog voda. Faktor η_l, koji je uvek manji od 1, upravo odražava ovu pojavu. Ukupna efikasnost dobrih antena se kreće u rasponu od 50 do 70%.

Širina snopa zračenja, direktivnost* i *dobit

Širina snopa zračenja, direktivnost i dobit su parametri koji karakterišu usmerenost antene, odnosno osobinu antene da u pojedinim pravcima emituju energiju većom snagom nego u drugim pravcima.

Širina snopa zračenja (*beam width*) se određuje na osnovu dijagrama zračenja, kao ugao unutar kojeg je snaga koju emituje antena najmanje upola manja, ili za $-3\ dB$ manja, od snage zračenja u pravcu ose maksimalnog zračenja, kao što je to ilustrovano na Sl. 8.



Sl. 8 Određivanje ugla širine snopa

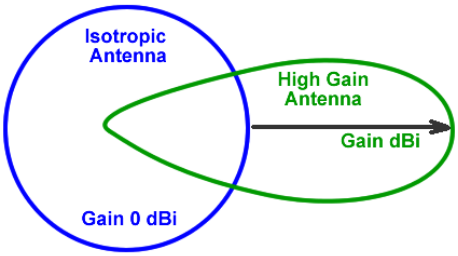
Antene sa uskim snopom zračenja (usmerene antene) su pogodne za komunikaciju na velikim rastojanjima jer se najveći deo ukupne energija zračenja usmerava u željenom pravcu, tj. u pravcu gde očekujemo da se nalazi prijemnik. Neusmerene antene (ili, antene sa širokim snopom zračenja) su pogodne za komunikaciju na kraćim rastojanjima, u slučajevima kada relativna pozicija predajnika i prijemnika unapred nije poznata ili kada su predajnik/prijemnik pokretni (nisu stacionarni). Kod pojedinih komunikacionih sistema (npr. zemaljska TV), antena predajnika je neusmerena, dok su antene prijemnika usmerene (prema predajniku).

Direktivnost antene se definiše se kao odnos između gustine snage zračenja u posmatranom pravcu i srednje guste snage po svim pravcima na fiksiranoj udaljenosti od antene. Ovako definisana direktivnost je funkcija pravca i opisuje stepen koncentracije zračenja u posmatranom pravcu. Najčešće se direktivnost definiše za pravac maksimalnog zračenja i izražava se u decibelima.

Direktivnost izotropne antene, tj. one koja bi u svim pravcima jednako zračila je $D = 1$. Direktivnost antene se sada može razumeti kao veličina koja ukazuje na to 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.

Dobit, ili *pojačanje* (*gain*) *antene*, G, je odnos između snage, P_o, elektromagnetnog zračenja koje antena prima iz određenog pravca i snage, P_{iso}, koju bi primila idealna izotropna antena: $G = \frac{P_o}{P_{iso}}$. Ekvivalentno, dobit se može definisati i za predajnu antenu. U tom slučaju, dobit je 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. Kada su gubici antene mali, pa time i njena efikasnost velika, dva parametra (dobit i efikasnost) su približno jednaka. Direktivnost odražava sposobnost antene da usmeri zračenje u određenom pravcu. Za razliku od toga, dobit antene omogućava da se odredi maksimalna snaga zračenja antene za poznatu snagu pobude antene. Dobit se najčešće izražava u jedinicama dBi (*decibel isotropic*), da bi se naglasilo da se kao referenca koristi izotropna antena (Sl. 9). Na primer, dobit od $3\,dBi$ znači da antena duž svoje ose maksimalnog zračenja emituje 2 puta veću snagu u odnosu na izotropnu antenu.



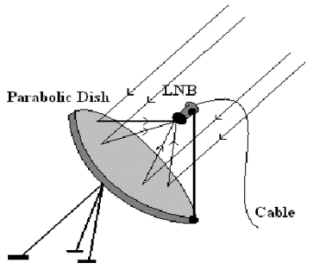
Sl. 9 Dobitak antene u dBi

Efektivna površina antene

Efektivna površina antene je mera koja ukazuje na sposobnost prijemne antene da prikupi energiju iz dolaznog elektromagnetnog talasa. 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 je antena „upila“ svu dostupnu elektromagnetnu energiju. Ili, gledano na drugi način, ako je za datu antenu poznato A_{eff}, tada će antena, koja je izložena dejstvu elektromagnetnog zračenja gustine snage S, na svom izlazu generisati snagu $P_r = SA_{eff}$. Naravno, sve ovo podrazumeva da je prijemna antena optimalno orijentisana ka predajnoj anteni i da su polarizacija i rezonantna frekvencija antene usaglašeni sa polarizacijom i frekvencijom dolaznog elektromagnetnog signala.



Pojam efektivne površine antene se najbolje može razumeti na primeru parabolične antene. Kod ove antene, parabolični reflektor fokusira dolazni elektromagnetni talas u jednu tačku. Efektivna površina idealne parabolične antene jednaka je površini reflektora.

Efektivna površina izotropne antene je $A_{iso} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$. Pošto je dobit izotropne antene jednak 1, može se uspostaviti veza između dobiti i efektivne površine proizvoljne antene. Imajući u vidu da je dobit antene $G = \frac{P_o}{P_{iso}}$ i da je primljena snaga srazmerna efektivnoj površini antene, sledi $G = \frac{A_{eff}}{A_{iso}}$, odnosno dobit antene se može izraziti u obliku: $G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}$.

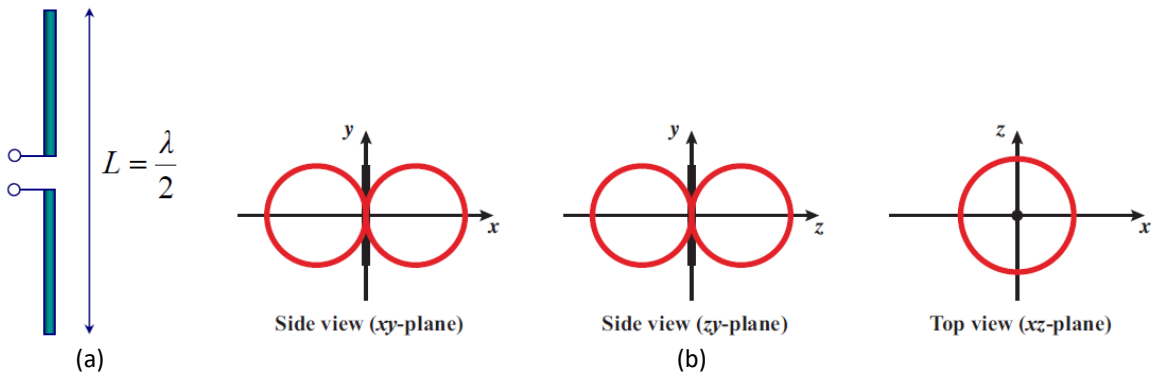
Polarizacija antene

Polarizacija antene ukazuje na polarizaciju elektromagnetnog talasa koji antene emituje, odnosno polarizaciju talasa koji antena može da primi. Na primer, horizontalno polarizovana prijemna antene na može da primi vertikalno polarizovani talas generisan od strane vertikalno polarizovane emisione antene. U nekim primenama, ova karakteristika antene je od koristi. Na primer, kapacitet mikrotalasnog linka se može duplirati tako što će se na istoj frekvenciji prenositi dva signala korišćenjem suprotno polarizovanih antenskih sistema. Intenzitet refleksije radio signala od Zemlje zavisi od polarizacije. Intenzitet i faza reflektovanog signala u mnogo većoj meri zavisi od upadnog ugla ako je signal vertikalno polarizovan. Zbog toga se za RF komunikaciju velikog dometa često koristi horizontalna polarizacija.

Polarizacija elektromagnetnog talasa se može promeniti tokom prenosa između predajnika i prijemnika usled refleksija. Stoga, pri prenosu na kraća rastojanja, npr. u zatvorenom prostoru ili urbanoj sredini, horizontalno polarizovana antena će primati signale od vertikalno polarizovane antene, iako sa izvesnim slabljenjem. Pojam *međusobna polarizacija* definiše stepen do kog se signal emitovan antenom jedne polarizacije može primiti antenom suprotne polarizacije. Ovo je od posebne važnosti u slučajevima kada se ne može računati na fiksnu orijentaciju predajne ili prijemne antene, kao u slučaju mobilnih uređaja. Kružno polarizovana antena može se koristiti kada polarizacija antene na drugom kraju linka nije definisana. Međusobna polarizacija između antena dovodi do slabljenja signala.

1.3.3 Tipovi antena

Dipol antena se sastoji od dva pravolinijska kolinearna provodnika jednake dužine, odvojena malim razmakom i sa pristupnim tačkama na sredini (Sl. 10(a)). Ukupna dužina antene jednaka je polovini talasne dužine signala koji antena najefikasnije emituje/prima. Zato se za ovu antenu koristi i naziv polutalasna ili $\lambda/2$ dipol antena. Dijagram zračenja $\lambda/2$ dipol antene je uniforman u jednoj dimenziji i oblika cifre 8 u druge dve dimenzije (Sl. 10(b)). Ako je postavljena vertikalno, zračenje antene je omnidirekciono u horizontalnoj ravni (tj. usmereno duž tla), a usmereno (oblika 8-ce) u vertikalnoj ravni. U poređenju sa izotropnom antenom, vertikalni dipol mnogo manje energije zrači vertikalno. Ako je dipol postavljen horizontalno (vodoravno), tada je zračenje usmereno u horizontalnoj, a omnidirekciono u vertikalnoj ravni.



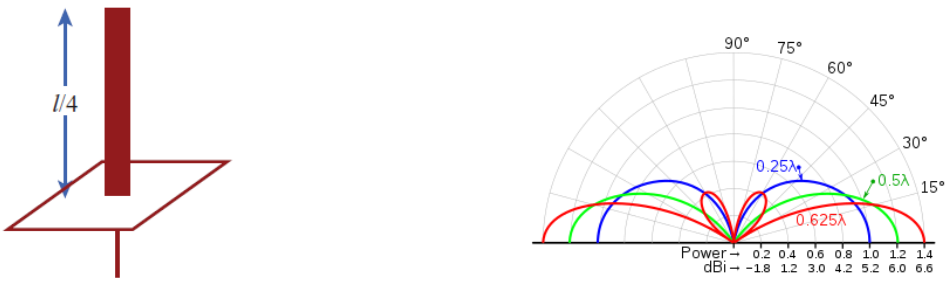
(a) (b)

Sl. 10 $\lambda/2$ dipol antena: (a) konstrukcija; (b) dijagrami zračenja u tri ravni vertikalno postavljenje dipol antene

Nedostatak $\lambda/2$ dipol antene je velika dužina ako se koristi za frekvencije manje od $1\ GHz$, što nije praktično za komunikaciju na malim rastojanjima ili za primenu kod mobilnih uređaja. Na primer, talasna dužina radio talasa frekvencije $f = 900\ MHz$ iznosi $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3\times10^8}{9\times10^8} = 33.3\ cm$, što zahteva dipol dužine $L = 16.67\ cm$. Za frekvenciju $f = 2.4\ GHz$, koja se najviše koristi za komunikaciju malog dometa, dužina $\lambda/2$ iznosi $L = 6.25\ cm$.

Kratka dipol antena je dipol čija je dužina mnogo manja od talasne dužine prijemnog talasa, tipično $L < \lambda/10$. Dijagram zračenja ovog tipa antene je blizak dijagramu $\lambda/2$ dipola, s tim što je efikasnost antene značajno manja.

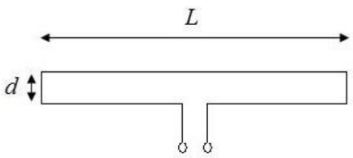
Monopol antena, ili $\lambda/4$ antena, je jedan krak dipol antene. Obično se postavlja vertikalno, sa reflektujućom (metalnom) podlogom ispod (Sl. 11(a)). Podloga deluje kao reflektor koji efektivno zamenjuje donji krak dipola, slično stvaranju optičke slike u ogledalu. Dijagram zračenja monopol antene, za različite dužine antene prikazan ja na Sl. 11(b). Primer monopol antene su štap antene koje se viđaju na krovovima automobila. U poređenju sa dipolom, monopol antena je manje dužine, ali i manje efikasnosti.



(a) (b)

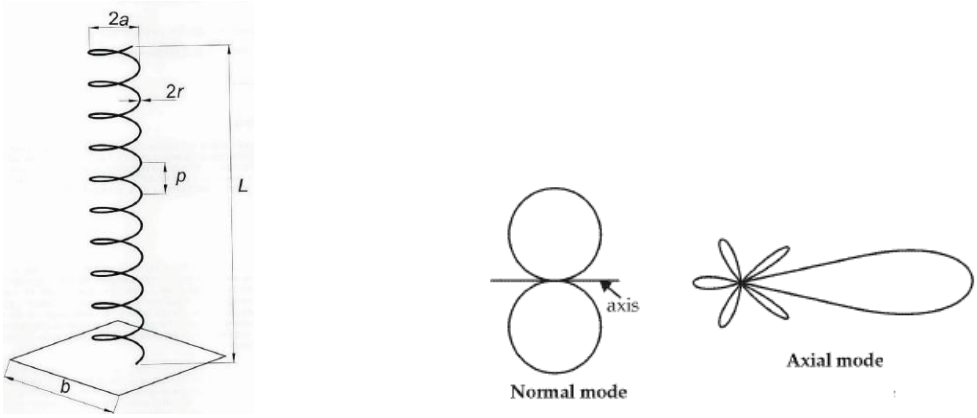
Sl. 11 Monopol antena: (a) konstrukcija; (b) dijagrami zračenja u zavisnosti od dužine antene

Savijeni dipol (*folded dipole antenna*) je provodnik koji je savijen, obično u pravougaoni oblik, gde je d manje od L (Sl. 12). Savijeni dipol 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.



Sl. 12 Savijeni dipol

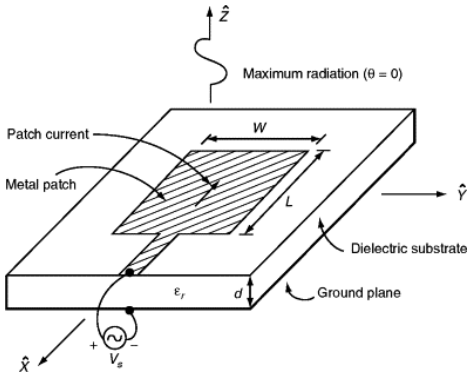
Helikoidna (spiralna) antena (*helical antenna*) ima karakterističan oblik spirale. Performanse antene zavise od vrednosti konstrukcionih parametra (Sl. 13(a)): poluprečnik žice (r), poluprečnik zamišljenog valjka oko kojeg je žica namotana (a), rastojanje između dva koraka spirale (p) i broja namotaja (N). Takođe, za optimalne performanse, potrebno je i metalna podloga (uzemljena ravan). Antena može da se koristi u dva režima: normalni i aksijalni. U normalnom režimu, dužina žice antene je mnogo manja od talasne dužine, dok je u aksijalnom režimu približna talasnoj dužini. U normalnom režimu, karakteristike zračenja su slične kratkom dipolu – antena maksimalno zrači u pravcu koja je normalna na osu spirale Sl. 13(b). Međutim, zbog male veličine, efikasnost helikoidne antene u normalnom režimu je mala kao i širina opsega. Zračenje helikoidne antene u aksijalnom režimu je usmereno duž ose spirale. Helikoidna antena je specifična i po tome što emituje cirkularno polarizovan elektromagnetni talas. Kao takva, korisna je kao prijemna antena jer može da primi signale proizvoljne ili promenljive polarizacije, naravno, sa izvesnim slabljenjem.



(a) (b)

Sl. 13 Helikoidna antena: (a) konstrukcija; (b) dijagrami zračenja u normalnom i aksijalnom režimu

Mikrostrip antena je antena izvedena direktno na štampanoj ploči (PCB) (Sl. 14). Sastoji se iz dijalektričkog supstrata (izolatora) određene debljine, d, koji je sa jedne strane (donja strana na Sl. 14) u potpunosti prekriven tankim uzemljenim metalnim slojem i metalnog *patch*-a (zakrpa) sa druge strane. Debljina supstrata je obično $d \ll \lambda$. Metalni *patch* je najčešće pravougaonog oblika, ali može biti izveden i u drugačijoj geometriji (kružna, trougaona, ...). Antena se napaja iz radio-predajnika preko mikrostrip-voda (na Sl. 14, to je tanka provodna traka od *patch*-a do ivice supstrata).



Sl. 14 Mikrostrip (*patch*) antena

Mikrostrip antena zrači maksimalnom snagom u pravcu koji je normalan na površinu *patch*-a. Idealno, u ravni *patch*-a, nema nikakvog zračenja. Dimenzije antene se određuju tako da antena rezonira na radnoj frekvenciji. U slučaju pravougaone antene, dužina antene, L, treba da bude približno $\lambda/2$, gde

je λ talasna dužina u dielektričkom medijumu. Širina antene, W, utiče na impedansu antene. Odnos između radne frekvencije, f_c, i dužine antene, L, je određen sledećom jednačinom:

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

Ovde je c – brzina svetlosti u vakuumu i ε_r- dielektrična konstanta supstrata. μ_0 i ε_0 su magnetna permeabilnost i dielektrična permitivnost vakuuma, respektivno. (Prelaz između drugog i trećeg člana u jednačini je posledica jednog fundamentalnog rezultata teorije elektromagnetizma po kome je brzina prostiranja elektromagnetnih talasa, tj. svetlosti u vakuumu jednaka $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$. U dielektričnoj supstanci, brzina prostiranja je manja $c_r = c/\sqrt{\varepsilon_r}$. Talas koji se prostire kroz dijalektrik zadržava svoju frekvenciju, ali zbog manje brzine prostiranja, njegova talasna dužina je manja, što objašnjava prethodno pomenuti pojam „talasna dužina u dijalektričnom medijumu“).

Glavne prednosti mikrostrip antene u odnosu na druge tipove antena su mala veličina i laka fabrikacija. Obično se realizuje na istoj štampanoj ploči kao i sam uređaj. Napaja se vodom koji je izveden na istoj štampanoj ploči, što znači da za napajanje antene nisu potrebni kabl i konektor. Nedostaci su 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. Drugim, rečima, *patch* antena je usko-pojasna antena, što u nekim primenama može biti problematično.

1.4 Prostiranje radio talasa

U ovoj sekciji opisani su osnovni mehanizmi propagacije elektromagnetnih talasa, sa naglaskom na one koju su relevantni za bežičnu komunikaciju. Najjednostavniji slučaj je onaj kada se predajna i prijemna antena nalaze u slobodnom prostoru, bez ikakvih prepreka i okolnih objekata koji bi remetili prostiranje talasa. Međutim, u većini praktičnih situacija, prostor između predajnika i prijemnika je ispunjen objektima koji u zavisnosti od svoje pozicije, karakteristika i dimenzija mogu u manjoj ili većoj meri na utiču na propagaciju radio talasa. Talas može da se reflektuje od površine nekog objekta, ako je ona ravna, ili da se rasprši, ako je hrapava. Takođe, talas može da prođe kroz materijalnu sredinu (npr. zid zgrade), u kojoj će biti delimično apsorbovan. Sve ove pojave su posebno bitne u urbanim sredinama i zatvorenom prostoru.

1.4.1 Propagacija u slobodnom prostoru

Pretpostavka je da između predajnika i prijemnika postoji optička vidljivost. Takođe, u prostoru između predajnika i prijemnika na postoje prepreke koje bi remetile propagaciju radio talasa. Ovo su idealizovani uslovi propagacije koje je teško ostvariti u realnim uslovima.

U slobodnom prostoru, jačina radio signala opada sa kvadratom rastojanja od predajnika, što je posledica širenja (disperzije) elektromagnetnih talasa u prostoru. Zamislimo izotropnu antenu u slobodnom prostoru koja zrači elektromagnetnu energiju snagom P_t, podjednako u svim pravcima Zamislimo sada sferu poluprečnika d sa centrom u anteni. Sfera u potpunosti obuhvata antenu, pa samim tim obuhvata i celokupnu snagu zračenja antene. Odnosno, snaga zračenja antene se ravnomerno raspodeljuje po površini sfere. U tom smislu, možemo govoriti o gustini snage na površini sfere. Pošto je površina sfere poluprečnika d jednaka $4\pi d^2$, gustina snage iznosi:

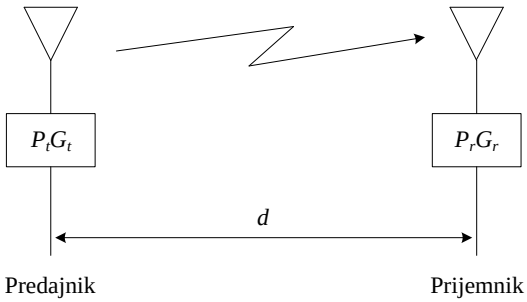
$$S = \frac{P_t}{4\pi d^2}$$

Ako izotropnu antenu zamenimo antenom čija je dobit G_t, gustina na rastojanju d u pravcu maksimalnog zračenja antene postaje:

$$S = \frac{G_t P_t}{4\pi d^2}$$

Neka na rastojanju d od predajne postoji prijemna antena, čija je efektivna površina A_{eff}. $P_r = SA_{eff}$. Imajući u vidu zavisnost između efektivne površine i dobiti antene $G_r = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}$, antena prima snagu:

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



Izvedeni izraz je poznat kao *Friis*-ova formula. Ova formula je precizna za visoke frekvencije (UHF i mikrotalasni frekventni opseg) kada se koriste antene velike dobiti koje su locirane na relativno velikom rastojanju od Zemlje (veliki broj talasnih dužina). Takvi uslovi postoje npr. u komunikaciji između zemaljskih stanica i satelita, ili između satelita. U urbanim uslovima, a posebno u zatvorenom prostoru, zavisnost između predajne i prijemne snage je kompleksnija, zbog uticaja površine zemlje i prepreka. Ipak, iako važi samo za slobodan prostor i daleku zonu zračenja (na velikom rastojanju od predajnika), *Friis*-a formula ukazuje na jednu bitnu karakteristiku bežičnog prenosa, a to je da prijemna snaga ne zavisi samo od rastojanja između predajnika i prijemnika, već i od talasne dužine (tj. frekvencije) signala koji se koristi u komunikaciji. Iz jednačine vidimo da je prenos na nižim frekvencijama efikasniji od prenosa na višim. Što je talasna dužina manja (tj. frekvencija viša), prijemnik prima manji iznos energije za istu predajnu snagu. Gubitak u prijemnoj snazi na višim frekvencijama zbog uticaja faktora λ^2 se može kompenzovati korišćenjem antena veće dobiti (odnosno, usmerenih antena).

Odnos između predajne (P_t) i prijemne snage (P_r) je poznat kao gubitak snage signala (*path-loss*) i iznosi:

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

Gubitak snage signala se tipično izražava u decibelima:

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

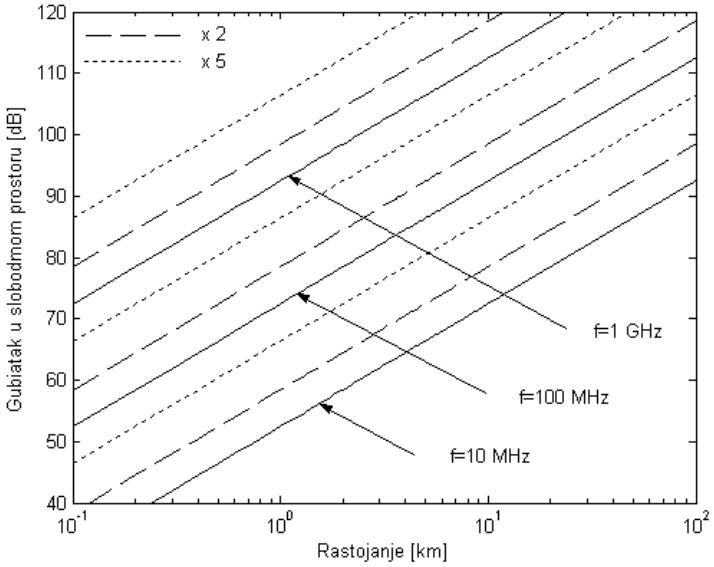
Ako pretpostavimo da antene imaju jedinični dobitak (izotropne antene), gubitak u slobodnom prostoru se može izraziti kao:

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

Znajući da je $\lambda = c/f$ (c je brzina svetlosti u vakuumu, f radna frekvencija) i uzimajući f u MHz i d u km, prethodnu jednačinu možemo napisati u obliku:

$$L(dB) = 32.44 + 20\log(f) + 20\log(d)$$

Na Sl. 15 je prikazana zavisnost gubitaka u slobodnom prostoru od rastojanja za različite vrednosti redne frekvencije.



Sl. 15 Gubitak u slobodnom prostoru u zavisnosti od rastojanja i radne frekvencije. **Napomena**: Dve „isprekidane“ prave iznad prave za $f = 10\ MHz$ odgovaraju frekvencijama 20 i 50 MHz. Faktori $\times$ 2 i $\times$ 5 važe i za „isprekidane“ prave iznad pravih za dve preostale frekvencije

Iz praktičnih razloga, snaga prijemnog signala na rastojanju d od predajnika se često izražava preko snage prijemnog signala na referentnom rastojanju d_{ref}. U tom smislu, možemo pisati sledeće jednačine:

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

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

Za referentno rastojanje u zatvorenom prostoru se tipično usvaja $d_{ref} = 1m$, a za otvoreni prostor $d_{ref} = (100 - 1000)m$.

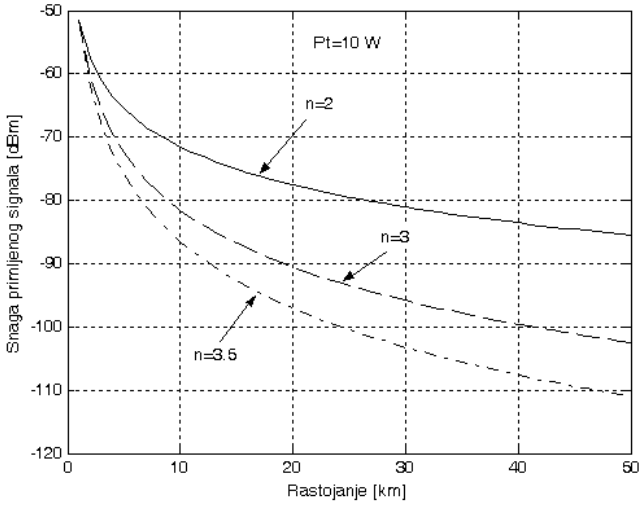
Prethodne jednačine se mogu primeniti samo na mali broj praktičnih slučajeva i to kao početna aproksimacija u postupku predikcije gubitaka usled prostiranja. Merenja sprovedena na konkretnim sistemima, u realnim uslovima, pokazuju da snaga prijemnog signala zavisi od rastojanja po zakonu:

$$P_r \propto d^{-\nu}$$

Ovde je ν koeficijent slabljenja, koji zavisi od okruženja i karakteristika sredine u kojoj se signal prostire. Može uzimati različite vrednosti, od 2, za slučaj prostiranja u slobodnom prostoru, do čak 6, za prostiranje u gustom naseljenom urbanom prostoru ili zatvorenoj sredini. Uzimajući u obzir faktor ν, opšta jednačina za snagu prijemnog signala dobija oblik:

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

Na Sl. 16 je prikazana snaga prijemnog signala u funkciji rastojanja za različite vrednosti parametra ν. Snaga prijemnog signala je u direktnoj vezi sa dometom komunikacije. Svaki radio-prijemnik zahteva određenu minimalnu snagu prijemnog signala. Ispod te minimalne snage, signal postaje neprepoznatljiv za prijemnik.



Sl. 16 Snaga prijemnog signala u zavisnosti od rastojanja i parametra ν (na slici je ν označeno sa n)

1.4.2 Apsorpcija, refleksija, difrakcija i rasejanje

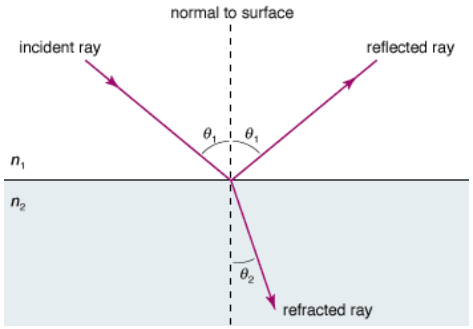
Apsorpcija. Kada se elektromagnetni talas prostire kroz materijalnu sredinu (vazduh, voda, građevinski materijal, ljudsko telo itd.) jedan deo elektromagnetne energije se apsorbuje u materijalu, odnosno konvertuje se u neki drugi oblik energije, poput toplotne i hemijske energije. Apsorpcija postoji u svakoj materijalnoj sredini i dovodi do postepenog slabljenja intenziteta talasa. Nivo apsorpcije određen je karakteristikama materijala (konkretno, μ_r - relativna magnetna permeabilnost i ε_r - relativna dijalektična permitivnost), koje zavise od nekoliko faktora uključujući i frekvenciju signala. U tabeli na Sl. 17 su navedeni podaci o slabljenju elektromagnetnog talasa prolaskom kroz različite materijale za nekoliko frekvencija. U većini slučajeva, slabljenje se značajno pogoršava kako se frekvencija povećava.

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

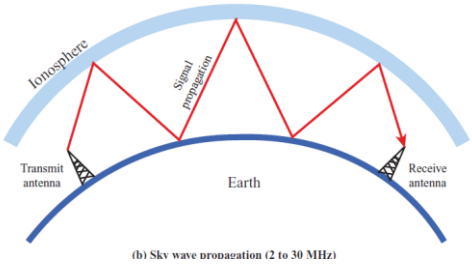
Sl. 17 Slabljenje radio signala prolaskom kroz različite materijale. **Napomena**: *Brick* – cigla; *Concrete* – beton; *Masonry* – kameni zid; *Drywall* – gipsani zid; *Glass* – staklo; *Plywood* – šperploča; *Reinforced concrete* – armirani beton

Refleksija i refrakcija. Refleksija je pojava odbijanja (reflektovanja) radio talasa od različitih materijala i površina. Refleksija 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. Umesto toga, talas se odbija, poštujući zakone refleksije. U opštem slučaju, refleksija može nastati na bilo kom spoju između dva materijala (medijuma) sa različitim električnim svojstvima. Na primer, radio talasi mogu biti reflektovani od površine Zemlje, zgrada, stabala i drugih objekata. Količina refleksije zavisi od različitih faktora, uključujući električnu povodljivost i hrapavost reflektujuće površine, upadnog ugla talasa i frekvencije i polarizacije talasa. Refleksija je važna u radio komunikaciji jer može biti korišćena za povećanje dometa radio signala, posebno za zemaljske sisteme komunikacije. Reflektovanjem radio talasa od zemlje, moguće je pokriti mnogo veću oblast sa jednom antenom.



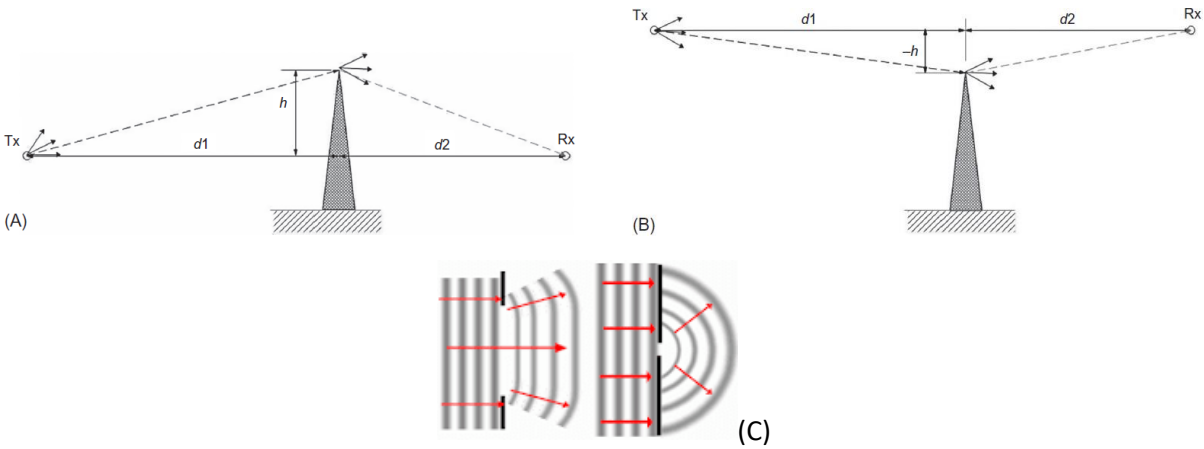
Za elektromagnetne talase veže isti zakoni prelamanja kao u optici (*Senelov* zakon). U opštem slučaju, talas se jednim delom reflektuje i ostaje u istoj sredini, a drugim prelama (refraktuje) i ulazi u novu sredinu.



Pojava refrakcija takođe omogućava propagaciju radio talasa na veoma velika rastojanja (i do više hiljada kilometara). Jonosfera je gornji sloj atmosfere sa povećanom koncetracijom jona, što menja provodne karakteristike sredine i dovodi do savijanja radio talasa koje emituje zemaljska stanica. Efekat postepene refrakcije je taj da se radio talas vraća ka Zemlji, od koje ponovo može da se odbije. Ova pojava je karakteristična za elektromagnetne talase iz opsega $3 - 30\ MHz$.

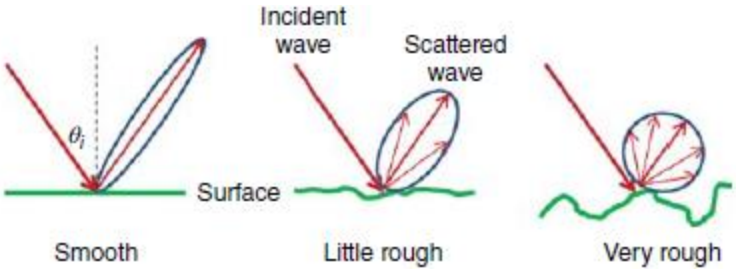
Difrakcija je svojstvo elektromagnetnih talasa, uključujući radio talase, gde se talasni front savija ili širi kada dođe u kontakt sa ivicom prepreke ili otvorom koji je po veličini uporediv sa talasnom dužinom talasa. Razlika u odnosu na refleksiju je u tome što difrakcija omogućava talasu da se savije i zaobiđe prepreku, umesto da se od nje odbije. Difrakcija je posledica opšteg principa prostiranja talasa, po kome svaka tačka pogođena talasom postoje izvor novih (sfernih) talasa. Količina difrakcije zavisi od različitih faktora, uključujući veličinu prepreke ili otvora, talasnu dužinu talasa i oblik prepreke. Difrakcija je važna u radio komunikaciji jer omogućava radio signalima da se savijaju oko prepreka i dosegnu područja koja bi inače bila blokirana preprekom. Ovo je posebno korisno za radio komunikaciju u urbanim sredinama, gde radio signal može biti blokiran zgradama, drvećem i drugim objektima, kao i u zatvorenom prostoru složene geometrije.

Na Sl. 18 su ilustrovana tri slučaja difrakcije. U slučaju A, prijemnik (RX) je zaklonjen od predajnika (TX) preprekom sa oštrim vrhom – kaže se da je prijemnik u senci. Ipak, zbog difrakcije na vrhu prepreke, radio signal se savija i stiže do prijemnika. U slučaju B, između predajnika i prijemnika postoji direktna putanja, međutim, do prijemnika, osim direktnog, stiže i talas koji nastaje difrakcijom na vrhu prepreke. Efekta mešanja direktnog i difraktovanog talasa može bit pojačanje ili slabljenje signala u tački prijema, o čemu će kasnije biti više reči. Slučaj C se odnosi na difrakciju koja nastaje otvor. Efekat difrakcije je izraženiji što je otvor manji.

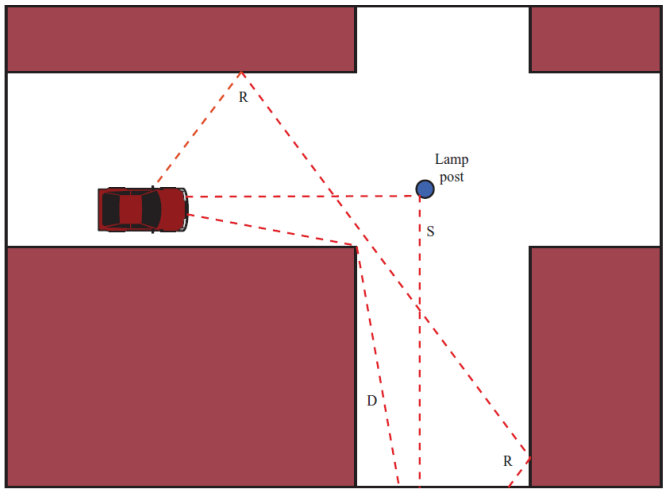


Sl. 18 Difrakcija

Rasipanje (***Scattering***) je pojava raspršivanja radio signala nailaskom na veliki broj objekata malih dimenzija, reda talasne dužine talasa, ili manjih, kao što su neravne površine, lišće, saobraćajni znaci itd. Kao posledica rasipanja, dolazni radio signal se raspršuje na nekoliko slabih odlaznih signala. Na Sl. 19 je prikazan uticaj hrapavosti površine na pojava rasipanja radio signala. Ukoliko je površina ravna, rasipanje je malo izraženo, a talas se praktično reflektuje u jednom pravcu. Ako je površina izrazito neravna (treći slučaj na slici), rasipanje je veoma izraženo. U nekom srednjem slučaju, deo talasa se reflektuje, a deo rasipa.



Sl. 19 Rasipanje radio talasa u zavisnosti od hrapavosti podloge

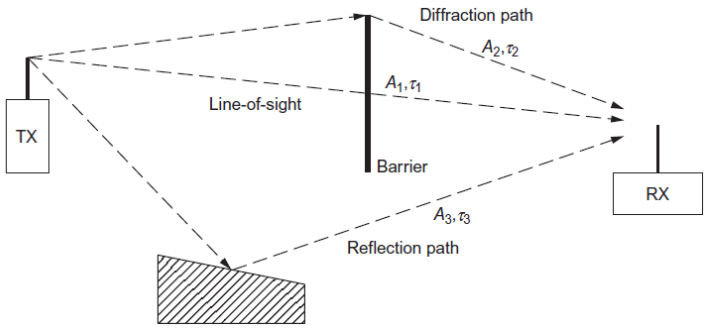


Slika ilustruje tri načina interakcije radio talasa i fizičkih objekata. Na ovoj slici, u automobilu se nalazi radio predajnik koji emituje radio talase u svim pravcima. Refleksija (R) se događa kada signal pogodi veliki čvrst objekat, poput zida. Difrakcija (D) se dešava kada se signal odbije od oštre ivice, poput ivice zgrade. Konačno, signal može da pogodi vrlo male objekte, poput stuba semafora na raskrsnici ili čak čestice u vazduhu, što izaziva rasipanje (S). Treba primetiti da su refleksija i difrakcija više usmerene, dok se signal rasipanjem raspršuje u svim pravcima.

Postoje kompleksne matematičke formule za izražavanje efekata refleksije, difrakcije i rasipanja na intenzitet i kvalitet signala na prijemnoj anteni, ali ta duboka teorija prostiranja radio talasa je van okvira ovog kursa. Ipak, bitno je biti svestan činjenice da radio signal stiže do prijemnika na mnogo različitih načina, što može izazvati određene probleme prilikom projektovanja i eksploatacije sistema za bežičnu komunikaciju. Ovi problemi su u velikoj meri uzrokovani propagacijom signala između predajnika i prijemnika po više putanja, što je tema naredne sekcije.

1.4.3 Prostiranje po više putanja

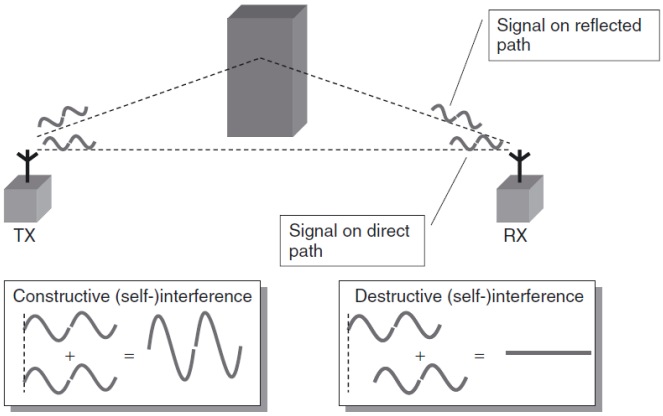
Ukoliko između predajnika i prijemnika postoji optička vidljivost (LOS – *Line of Sight*) i u prostoru između njih ne postoje drugi objekti, poslati signal stiže do prijemnika brzinom svetlosti po najkraćoj, pravolinijskoj putanji. Međutim, u realnim uslovima, kao posledica interakcije sa fizičkim objektima u okruženu, signal poslat od strane predajnika može stići do prijemnika po više različitih putanja, kao što je to prikazano na Sl. 20. Signal može biti prenet direktnog putanjom (LOS putanja), ukoliko između predajnika i prijemnika postoji optička vidljivost. Osim LOS signala, do prijemnika može stići i jedan ili više indirektnih ili NLOS (*Non-LOS*) signala, tj. više replika istog signala, koje nastaju refleksijom ili difrakcijom od fizičkih objekata u okruženu. LOS putanja je najkraća putanja između predajnika i prijemnika. Zato signal koji se prostire ovom putanjom stiže do prijemnika pre sivih NLOS signala. Takođe, jačina LOS signala je veća od jačine NLOS signala. Razlog za to je što NLOS signali prevaljuju duži put i zbog toga je njihovo slabljenje veće od slabljenja LOS signala. Takođe, pošto se putanje signala razlikuju po dužini, replike signala koje stižu do prijemnika se razlikuju i po fazi (dolaze sa različitim kašnjenjima). Uz to, signali se razlikuju i po dolaznom uglu i polarizaciji (zato što se polarizacija elektromagnetnog talasa može promeniti refleksijom). Sve ove replike signala zvaćemo MPC (*Multi Path Components*). Razmotrićemo dve posledice prostiranja po više putanja: feding i intersimbolska interferencija.



Sl. 20 Prostiranje po više putanja

1.4.3.1 Feding

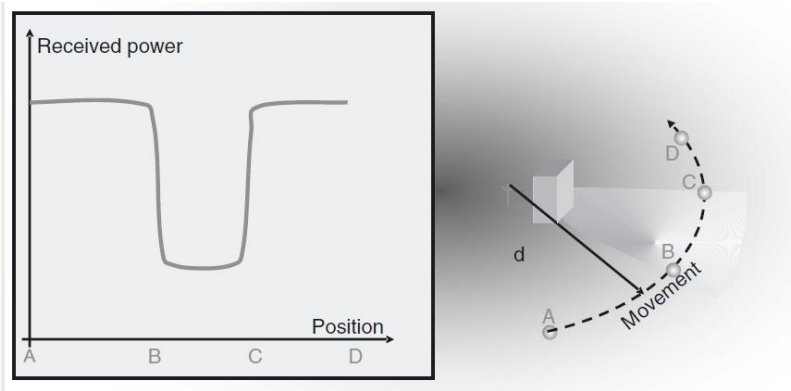
Prijemnik ne može da napravi razliku između različitih MPC, u smislu da izdvoji samo jednu od njih i dalje je obrađuje. Umesto toga, u tački prijema (tj. u prijemnoj anteni), sve MPC se sabiraju, odnosno mešaju. Ovo mešanje, tj. interferencija, može biti konstruktivno ili destruktivno, u zavisnosti od faza MPC-ova, kao što je to ilustrovano na Sl. 21. Na Sl. 21, predajnik emituje kontinualni sinusni signal. Međutim, zbog refleksije, prijemnik prima sumu dva sinusna signala različitih amplituda i faza. Odnos faza dva MPC zavisi od razlike u dužini LOS i reflektovane putanje. Ukoliko su MPC-ovi u fazi, njihovim zbirom se dobija signal koji je po amplitudi veći od oba. Odnosno, efekat refleksije je pojačanje signala u tački prijema, što predstavlja *konstruktivnu interferenciju*. Ukoliko su MPC-ovi u protiv-fazi (180^0), rezultujući signal će i dalje imati oblik sinusoide, ali će njegova amplituda biti manja od amplitude LOS signala, što predstavlja *destruktivnu interferenciju*. U krajnjem slučaju, ako su MPC-ovi približno istih amplituda i u protiv-fazi, nivo signala na prijemu će pasti na nulu. Interferencija MPC-ova, po pravilu, izaziva pojavu *fedinga*, odnosno nestabilnost nivoa radio signala na mestu prijema.



Sl. 21 Brzi feding: Konstruktivna i destruktivna interferencija

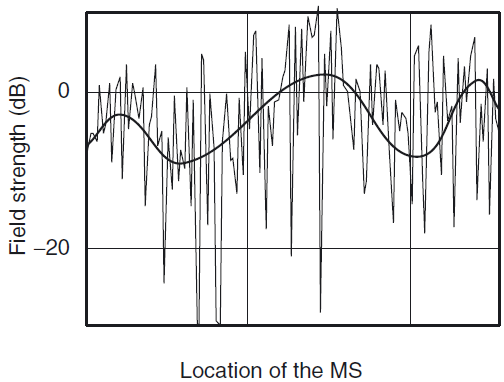
S obzirom da faza MPC-a zavisi od družine putanje, pa time i od pozicije predajnika i prijemnika, amplituda ukupnog signala će se menja u vremenu ukoliko je predajnik, prijemnik ili bilo koji objekat u okruženju pokretan. Ovaj efekat, odnosno promena amplitude zbirnog signala kao posledica interferencije MPC-ova se naziva *brzi feding*. Na primer, pri frekvenciji od $2\,GHz$, svaki pomeraj (predajnika, prijemnika ili bilo kog obližnjeg reflektujućeg objekta) od samo 10-tak cm može da promeni prirodu interferencije, od konstruktivne na destruktivnu ili obrnuto. Drugim rečima, čak i mali pomeraji mogu da izazovu velike primene amplitude prijemnog signala.

Dodatno, kao posledica *efekta senke*, amplitude pojedinačnih MPC-ova se mogu menjati u vremenu. Zamislimo mobilni bežični uređaj u režimu prijema u urbanoj sredini na poziciji A na Sl. 22. U ovoj tački, postoji optička vidljivost između uređaja i predajnika i uređaj prima LOS signal. Zamislimo sada da se uređaj kreće po putanji koja je naznačena na Sl. 22. Kada se uređaj nađe iza visoke zgrade (tačka B), amplituda direktnog signala se značajno smanjuje – kaže se da je uređaj u senci. U tački C, uređaj izlazi iz senke, i prvobitni nivo signala se ponovo uspostavlja. Promene snage prijemnog signala u vremenu usled efekta senke se naziva *spori feding*. Naravno, efekat senke utiče ne samo na LOS MCP, već na bilo koji MCP. Takođe, treba napomenuti da objekti ne bacaju „oštru“ senku, veće je prelaz iz „sive“ u „tamnu“ zonu postepen.



Sl. 22 Efekat senke. Desno je putanja mobilnog uređaja i senka koju pravi zgrada; levo je prikazana zavisnost prijemne snage u zavisnosti od pozicije uređaja

U tipičnim uslovima, istovremeno postoje i brzi i spori feding. Kombinacijom ove dve pojave, amplituda signala na prijemu može da varira kao na Sl. 23. Manja amplituda signala znači niži kvalitet prenosa. Tako, u uslovima fedinga dolazi da pada kvaliteta govornog signala (u mobilnoj telefoniji), povećava se verovatnoća greške u prenosu (prilikom prenosa digitalne informacije), ili, u krajnjem slučaju, do potpunog gubitka veze.



Sl. 23 Tipičan primer fedinga. Grafikon prikazuje jačinu prijemnog signala, pod pretpostavkom da se mobilni uređaj kreće po npr. pravolinijskoj putanji u nekoj urbanoj sredini. Tanja linija je jačina signala u jednoj tački na putanji uređaja i odražava pojavi brzog fedinga; deblja linija je srednja vrednost jačine signala na segmentu putanje dužine $1\ m$ i odražava pojavu sporog fedinga

1.4.3.2 Intersimbolska interferencija

U bežičnim komunikacijama se između predajnika i prijemnika ne prenose čisti, prostoperiodični (sinusni) signali, jer takvi signali ne nose nikakvu informaciju. Informacija se zapravo predstavlja oblikom signala. Opšti princip je da se informacija utiskuje u noseći signal visoke frekvencije postupkom modulacije. Jednostavan primer je frekventna modulacija, gde se za prenos binarne 0 i 1 koriste dve frekvencije, $f_0 = f_c - \Delta f$ i $f_1 = f_c + \Delta f$, gde je f_c noseća frekvencija (npr. $2\ GHz$) i $f_c \gg \Delta f$ (npr. $\Delta f = 1MHz$). Dakle, frekvencija modulisanog signala se menja između f_0 i f_1 shodno binarnoj sekvenci koju treba preneti. Svaki bit traje određeno vreme – tzv. bit interval. U opštem slučaju, kod složenijih tipova modulacija, govorimo o simbolima i simbol-intervalima, gde simbol predstavlja 1 ili više bita. Što je simbol-interval kraći, to je brzina prenosa podataka veća. Pojmovi modulacija, simbol, simbol-interval su detaljnije objašnjeni u sledećoj sekciji.

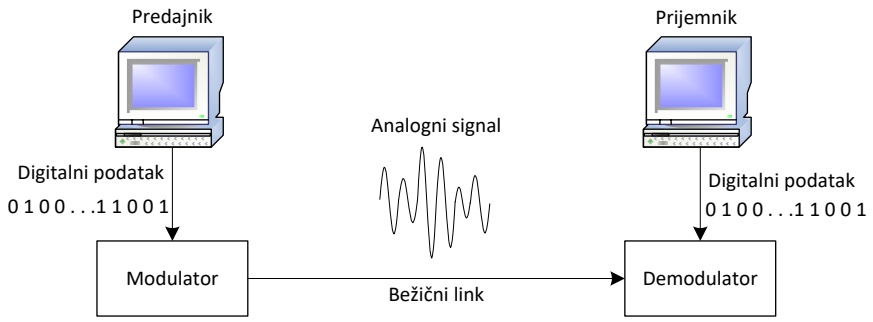
U uslovima propagacije po više pravaca, različiti MPC-ovi stižu do prijemnika sa različitim kašnjenjem. Što je putanja koju MCP prevaljuje duža to će, naravno, i kašnjenje tog MCP u odnosu na direktni (LOS) signal biti veće. Ukoliko je simbol-interval značajno duži od maksimalnog kašnjenja svi MCP-ova, amplituda rezultujućeg signala će u osnovo ostati konstantna tokom svakog simbol-intervala. Ova vrsta fedinga se naziva *ravni feding*, što odgovara fedingu kako je prethodno opisan.

Ukoliko je simbol-interval kraći od kašnjenja MCP komponenata, nastaje pojava koja je poznata pod nazivom *intersimbolska interferencija*. Naime, simbol koji do prijemnika dolazi preko direktne putanje, ili MCP-a sa malim dodatnim kašnjenjem, se meša sa prethodnim simbolima koji u isto vreme stižu preko dugačkih putanja. Ova vrsta poremećaja otežava detekciju (prepoznavanje) simbola i može da dovede do greške u prijemu. Intersimbolska interferencija je izraženija pri većim brzinama prenosa podataka (jer simbol-intervali traju kraće) i u otvorenom prostoru, gde su MCP putanje duže.

1.5 Modulacija i demodulacija

Komunikacija između bežičnih uređaja, po pravilu, znači razmenu digitalnih podataka preko bežičnog komunikacionog kanala. Digitalni podaci su zapravo povorka bita, kojoj, u vremenskom domenu, odgovara digitalni signal, odnosno električni signal koji, u najjednostavnijem slučaju, ima samo dva naponska nivoa. Binarno 1 se predstavlja, recimo, višim, a 0 nižim naponskim nivoom. Svaki bit traje određeno vreme – bit interval. Za jedan ovakav (informacioni) signal se kaže da je u osnovnom opsegu (*baseband*). Signali u osnovnom opsegu su pogodni za žičani prenos na manjim rastojanjima (npr. Ethernet, UART, SPI, ...), međutim nisu pogodni za bežični prenos i to iz više razloga. Signali u

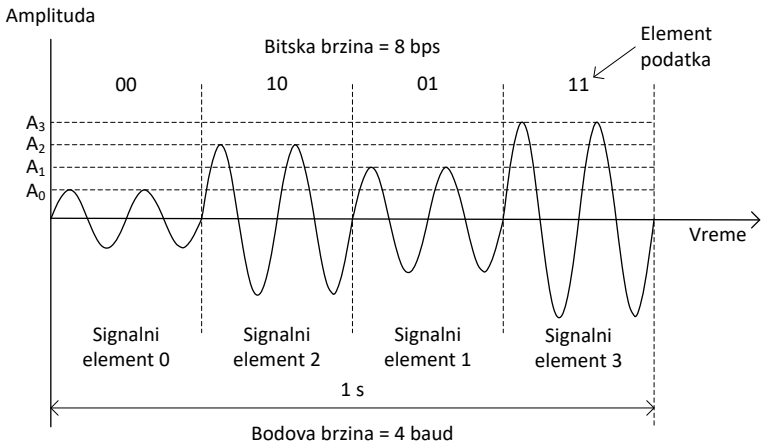
osnovnom opsegu su po pravilu nisko-frekventni signali u smislu da je najveći deo njihove energije sadržan u opsegu niskih frekvencija. Kad bi se signal iz osnovnog opseg prenosio direktno kao RF signal (direktno napajao predajnu antenu), rezultujući nisko-frekventni elektromagnetni talas bi bio podložan velikom slabljenju prilikom propagacije kroz bežični medijum, zbog čega bi signal na prijemu bio izobličen, a kvalitet prenosa nizak. Takođe, ovakav način prenosa bi zahtevao upotrebu antena velikih dimenzija. Uz to, 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).



Sl. 24 Digitalna modulacija/demodulacija: modulacija - proces kojim se digitalna informacija transformiše u analogni signal visoke frekvencije; demodulacija - je inverzni proces koji transformiše primljeni analogni signal u digitalnu informaciju

Da bi se prevazišli prethodni problemi, signal osnovnog opsega se „utiskuje“ u visoko-frekventni noseći, prostoperiodični signal, postupkom koji se zove *modulacija* (Sl. 24). Informacija koju treba preneti se predstavlja nizom simbola iz konačnog skupa simbola, tzv. *kanalnog alfabeta*. U procesu modulacije, svaki simbol iz kanalskog alfabeta se preslikava na jedan signalni element, odnosno predstavlja se jednim od konačnog broja talasnih oblika signala fiksnog trajanja. Trajanje signalnog elementa je trajanje simbola. Binarna modulacija koristi samo dva različita simbola i zahteva dva različita talasna oblika. Ako je broj raspoloživih talasnih oblika m ($m > 2$) govorimo o m-arnoj modulaciji.

Opšti koncept digitalne modulacije je ilustrovan na Sl. 25. U primeru na ovoj slici koristi se kanalni alfabet koji sadrži 4 simbola, što znači da svaki simbol nosi informaciju od 2 bita. Svi signalni elementi traju dve periode nosećeg signala, ali se razlikuju po amplitudi. U jednom ovakvom sistemu, binarna informacija koju treba preneti se deli na grupe od po 2 bita, tako da svaka grupa odgovaraj jednom simbolu. Zatim, u postupku modulacije, svaki simbol se prevodi u odgovarajući signalni element. Signal za prenos se zapravo formira nadovezivanjem signalnih elemenata. Na primer, za prenos binarne informacije 00100111 na Sl. 25, svaka dva uzastopna bita, tj. 00, 10, 01 i 11 se prvo prevode u odgovarajući simbol, a zatim se simbol zamenjuje odgovarajućim signalnim elementom. Na taj način se generiše analogni signal modulisan informacijom. Drugi primer bi bio npr. da svi signalni elementi imaju istu amplitudu, ali se razlikuju po frekvenciji, ili po početnoj fazi nosećeg signala.



Sl. 25 Digitalno modulisani signal

Brzina prenosa/modulacije podataka određena je sledećim parametrima:

Simbolska brzina (*symbol rate, baud rate* ili *modulation rate*). Predstavlja recipročnu vrednost trajanja simbola. U slučaju binarne modulacije govorimo o bitskoj brzini. U primeru na slici simbolska brzina (ili, kaže se i bodova brzina) iznosi 4 simbola u sekundi.

Brzina podataka (*data rate*). Predstavlja brzinu, izraženu u bitima u sekundi, 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. Na primer, u 4-arnoj modulaciji, svakom od 4 različitih simbola može se pridružiti jedna 2-bitna binarna kombinacija – znači, bitska brzina je dva puta veća od simbolske brzine. U primeru na slici, brzina podataka iznosi 8 bita u sekundi, ili $8\ bps$ (*bits per second*).

Demodulacija je proces suprotan modulaciji, kojim se primljeni signalni elementi preslikavaju na simbole. Zadatak demodulatora je da iz primljenog signala izdvoji signalne elemente i na osnovu talasnog oblika signalnog elementa prepozna simbol. Budući da prisustva šuma, slabljenja i interferencije u komunikacionom kanalu izaziva izobličenja prijemnog signala, prijemnik nije uvek u mogućnosti da sa apsolutnom sigurnošću odredi kom simbolu primljeni signalni element. Verovatnoća da će u primljenom talasnom obliku biti prepoznat pogrešan simbol naziva se *simbolskom stopom greške* (*symbol error rate*). Za digitalnu reprezentaciju podatka bitan je pojam *bitska stopa greške* (*BER - bit error rate*): verovatnoća da će, nakon demodulacije, na izlazu demodulatora biti generisan pogrešan bit. U slučaju binarne modulacije, simbolska i bitska stopa greške su jedno te isto. U slučaju m-arne modulacije, ove dve stope grešaka se mogu razlikovati; čak iako se nakon demodulacije dobije pogrešan simbol, u grupi bitova koja reprezentuje taj simbol pojedini bitovi mogu biti ispravno. U svakom slučaju, za više nivoe komunikacije od primarnog od interesa je bitska stopa greške, tj. BER.

1.5.1 Pojasna modulacija

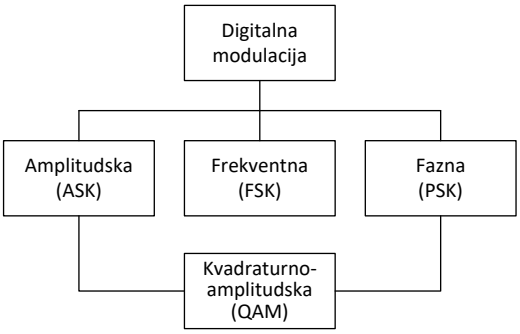
Najzastupljeniji tip modulacije je tzv. *pojasna modulacija* (*bandpass modulation*) – informacionim signalom se moduliše periodični noseći signal znatno više frekvencije (f_c). Osnovna ideja pojasne modulacije je da se informacioni signal frekventno pomeri u opseg viših frekvencija tako da se može preneti na veća rastojanja sa minimalno interferencijom ili slabljenjem. Drugim rečima, modulisani signal je manje pogođen šumom i izobličenjima u odnosu na informacioni (bazni) signal.

Modulisani signal se predstavlja kosinusnom funkcijom, koja je u potpunosti određena amplitudom, frekvencijom i faznim pomakom. Shodno tome modulisani signal $s(t)$ se može predstaviti u obliku:

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

gde su $A(t)$, $f(t)$ i $\phi(t)$ redom amplituda, frekvencija i faza, sve u funkciji vremena, t. U zavisnosti od toga na koji od ova tri parametra se deluje, razlikuju se četiri osnovna tipa digitalne modulacije (Sl. 26):

- Amplitudska modulacija (*ASK – Amplitude Shift Keying*),
- Frekventna modulacija (*FSK – Frequency Shift Keying*) i
- Fazna modulacija (*PSK – Phase Shift Keying*)
- Kvadraturno-amplitudska modulacija (QAM)



Sl. 26 Oblici digitalne modulacije

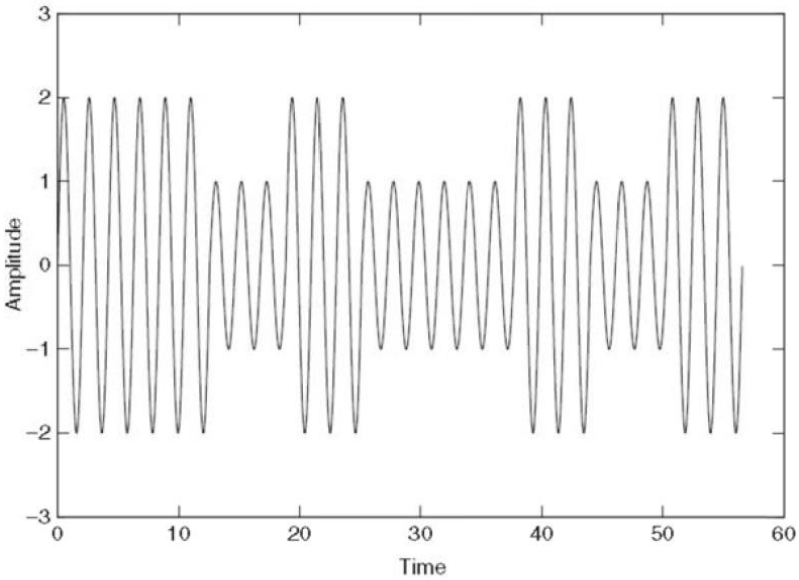
Noseći signal, s obzirom da je reč o prosto-periodičnom signalu, ima samo jednu spektralnu komponentu, na frekvenciji f_c. Drugim rečima, celokupna energija nosećeg signala je koncentrisana na jednoj frekvenciji. Modulacijom, oblik nosećeg signala se u izvesnoj meri menja, što ima za posledicu širenje njegovog spektra. Spektar modulisanog signala zapravo zauzima određeni frekventni opseg širine B oko noseće frekvencije f_c, tako da je najveći deo njegove energije sadržan u frekventnom opsegu: $[fc - B/2, fc + B/2]$. Dakle, modulacijom, informacioni signal se iz osnovnog opsega može translirati u bilo koji deo elektromagnetnog spektra gde će zauzeti jedan ograničeni opseg frekvencija. Na taj način se postiže to da više komunikacionih sistema mogu da koriste bežični medijum, svaki u svom opsegu frekvencija, bez opasnosti od međusobne interferencije.

1.5.2 ASK

Kod amplitudske modulacije (*ASK – Amplitude Shift Keying*), frekvencija i faza nosećeg signala ostaju konstantne, a menja se amplituda, tj. signalni elementi se razlikuju samo po amplitudi. Kod amplitudske modulacije, simboli se preslikavaju na signalne elemente čiji su talasni oblici definisani sledećim skupom funkcija:

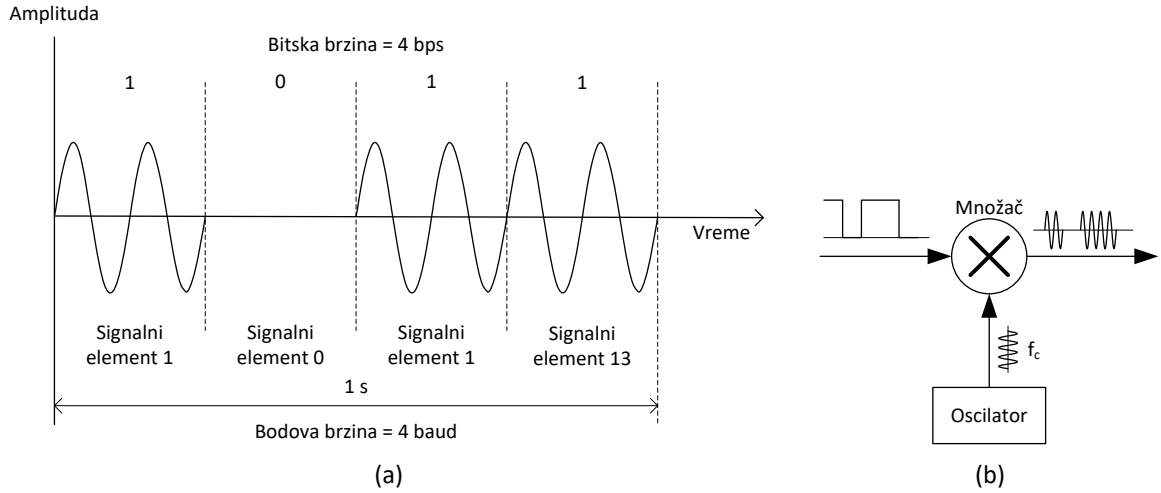
$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}}\cos(2\pi f_c t + \phi)$$

gde je f_c frekvencija nosećeg signala, ϕ proizvoljna početna faza i $E_i(t)$ konstanta u vremenskom intervalu trajanja jednog simbola $[0, T]$. Amplituda se po konvenciji predstavlja izrazom $\sqrt{\frac{2E_i(t)}{T}}$, odnosno izražena je preko trajanja (T) energije (E) jednog simbola. Iako, u opštem slučaju, možemo koristiti nekoliko amplitudskih nivoa (kao u primeru na Sl. 25), u praksi je najzastupljenija *binarna* amplitudska modulacija, kod koje postoje samo dve dopuštene amplitude. Na Sl. 27 je prikazan primer binarne ASK modulacije za informacioni signal oblika 110100101. Tokom trajanja logičke 0 i logičke 1 važi $E_0(t) = 5$ i $E_1(t) = 20$, respektivno. Uopštenje na m-arnu modulaciju bi značilo uvođenje više do dva simbola tako da svakom odgovara jedna konstanta iz skupa: $E_i, i = 0, \dots, m-1$.



Sl. 27 Amplitudska modulacija - ASK

OOK. U spcijalnom slučaju binarne ASK modulacije, logička 0 se predstavlja odustvom signala, tj. $E_0(t) = 0$ i $E_1(t) > 0$. Ova vrsta modulacije je poznata pod nazivom OOK (*ON-OFF Keying*), jer se praktično svodi na uključivanje/isključivanje oscilatora prosto-periodičnog signala (Sl. 28).



Sl. 28 OOK modulacija: (a) OOK modulisani signal; (b) OOK modulator

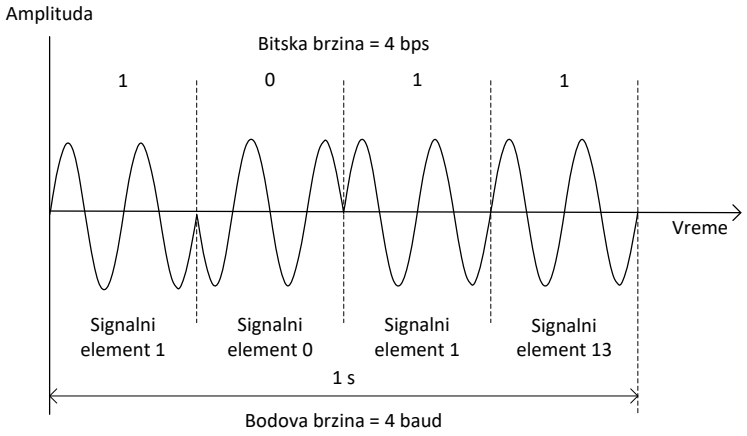
1.5.3 PSK

Kod fazne modulacije (PSK – *Phase Shift Keying*) promena faze nosećeg signala se koristi za predstavljanje dva ili više različitih signalnih elemenata. Dakle, sada su frekvencija i amplituda konstante, a menja se faza. Za faznu modulaciju važi:

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

gde je f_c noseća frekvencija, E energija simbola i $\phi_i(t)$ jedna od m različitih konstantnih vrednosti faznog pomaka. Na Sl. 29 je prikazan primer fazne modulacije za istu bit-sekvencu kao u primeru OOK modulacije na Sl. 28. Pošto se koriste samo dva simbola, ovde je reč o binarnoj faznoj modulaciji, ili BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), kod koje se koriste dva fazna pomaka: 0 i π. Još jedan primer fazne

modulacije je kvadraturna fazna modulacija, ili QPSK, kod koje se koriste 4 simbola, tako što svakom simbolu odgovara jedan od 4 fazna pomaka: 0, $\pi/2, \pi$ i $3\pi/2$. U odnosu na ASK, PSK je otporniji na šum, jer šum može lakše da promeni amplitudu nego fazu signala.



Sl. 29 Fazna modulacija - PSK

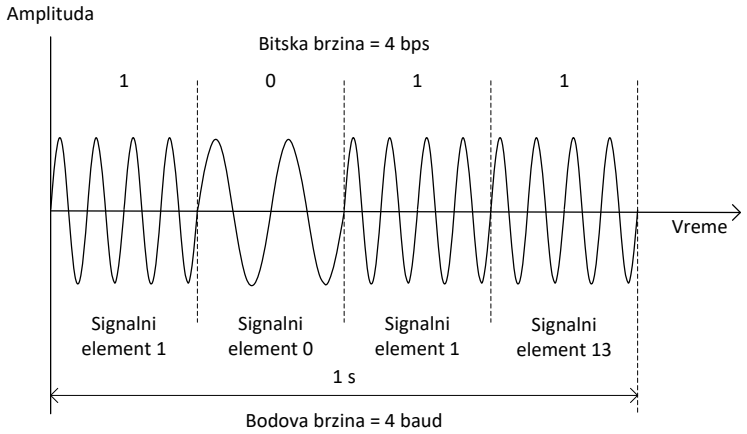
1.5.4 FSK

Kod frekventne modulacije (FSK – *Fequency Shift Keying*), podaci se predstavljaju promenom frekvencije nosećeg signala. Frekvencija modulisanog signala je konstantna tokom trajanja signalnog elementa, a menja se u sledećem signalnom elementu ako se promeni element podatka. Pri tom, amplituda i faza nosećeg signala ostaju konstante. U slučaju frekventne modulacije, talasni oblici signalnih elemenata su definisani setom funkcija:

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

gde je $f_i(t)$ jedna od m različitih frekvencija, E energija simbola i ϕ konstantna početna faza.

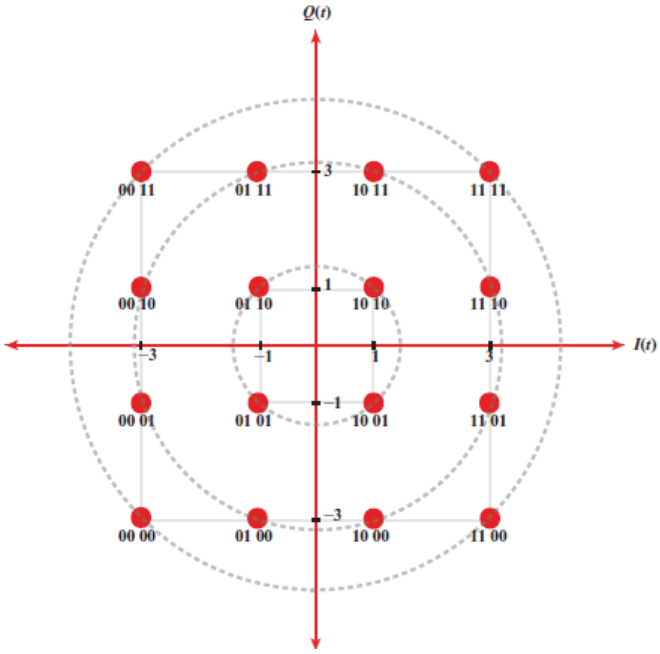
Binarna frekventna modulacija (BFSK - *Binary FSK*) koristi samo dve noseće frekvencije. U primeru sa Sl. 30, izbor je između frekvencija f_0 i f_1: ako je vrednost elementa podatka 0, koristimo f_0; ako je digitalna vrednost 1, koristimo f_1. Treba imati na umu da je signal sa Sl. 30 data u cilju ilustracije koncepta – u realnosti, noseće frekvencije su veoma visoke, a njihova razlika ($f_1 - f_0$) je veoma mala (u odnosu na f_1 i f_0).



Sl. 30 Binarna frekventna modulacija - BFSK

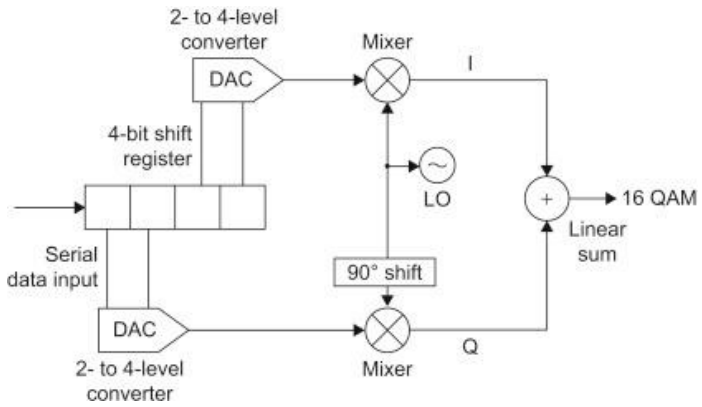
1.5.5 QAM

Tri osnovna tipa pojasne modulacije, ASK, PSK i FSK, se mogu kombinovati. Tako, QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) modulacija predstavlja kombinaciju amplitudske i fazne modulacije. Na primer, 16-nivovska QAM, ili 16QAM koristi različite kombinacije amplitude i faze radi kreiranja 16 različitih kombinacija, od kojih svaka odgovara jednom simbolu. S obzirom na $m = 16$ simbola, kod 16QAM svaki simbol prenosi informaciju od 4 bita. Na Sl. 31 je prikazan tzv. *konstelacioni dijagram* 16QAM, u kome svaka tačka predstavlja jedan simbol. Amplitudi signala odgovara udaljenosti od koordinatnog početka. Tako, simbol „1111“ se prenosi sa amplitudom $\sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2}$ i fazom koja je jednaka uglu ove tačke u konstelacionom dijagramu, odnosno 45^0. U realnim komunikacionim sistemima, osim 16QAM, koristi se 64QAM, 256QAM, pa čak i 1024QAM. Na primer, kod 256QAM, svaki simbol predstavlja 8 bita, odnosno 1 bajt.



Sl. 31 Konstelacioni dijagram 16QAM modulacije

16QAM modulator



Na slici levo je prikazan princip konstrukcije 16QAM modulatora. Ulaz u modulator su 4 bita informacije, a izlaz signal talasnog oblika odgovarajućeg simbola. Grupa od 4 bita se deli na dva para bita i na osnovu svakog para se pomoću D/A konvertora (DAC) generiše jednosmeran napon određene vrednosti. LO je lokalni oscilator koji generiše prostoperiodični signal noseće frekvencije, f_c. Blok „90^0 *shift*“ unosi fazni pomak od 90^0.

Tako, ako je na izlazu oscilatora LO signal $\sin(2\pi f_c t)$, tada je na izlazu bloka „90^0 *shift*“ signal $\cos(2\pi f_c t)$. Blokovi „Mixer“ su analogni množači, koji množe jednosmeran napon na izlazu D/A konvertora i sinusni, odnosno kosinusni signal. Na primer, ako je na izlazu gornjeg D/A konvertora napon A, a na izlazu donjeg B, tada su signali na izlazu množača: $I = A\sin(2\pi f_c t)$ i $Q = B\cos(2\pi f_c t)$. Blok „+“ je analogni sabirač, koji generiše izlazni signal sabiranjem signala I i Q: $A\sin(2\pi f_c t) + B\cos(2\pi f_c t)$.

Iz trigonometrije znamo:

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

gde je:

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

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

Dakle, odgovarajućim preslikavanjem para bita na naponske nivoe, moguće je generisati talasni oblik bilo kog od 16 simbola iz konstelacionog dijagrama na Sl. 31.

1.6 Interferencija i šum

U bežičnom prenosu, koristan signal je neizbežno izložen dejstvu pozadinskog elektromagnetnog zračenja (interferencija), kao i smetnji koje nastaju u samim elektronskim komponentama predajnika i prijemnika (šum). Interferencija i šum se superponiraju (dodaju) na koristan signal, menjajući njegov talasni oblik, što negativno utiče sposobnost prijemnika da ispravno i pouzdano prihvata poslatu informaciju.

1.6.1 Interferencija

Interferencija je 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). Razlikuje se tri vrste eksternih interferencija:

Multiple access interferencija: nastaje u komunikacionim sistemima gde više korisnika, tj. predajnika pokušava da istovremeno deli isti frekventni opseg. Primenjuju se posebni mehanizmi za izbegavanje interferencije, koji, u stvarnosti, nikad nisu apsolutno pouzdani.

Kanalna interferencija potiče od korisnika ili predajnika iz nekog drugog komunikacionog sistema koji koristi isti frekventni opseg, ili se frekventni opseg drugog sistema preklapa sa opsegom u kome radi dati sistem. Razlika u odnosu na *multiple-access* interferenciju je u tome što kod kanalne interferencije ne postoji pokušaj deljenja medijuma (uređaji nisu „svesni“ postojanja nekih drugih uređaja čiji rad ometaju). Npr. u bandu $2.4\,GHz$ rade WiFi, Bluetooth i mikrotalasne pećnice

Interferencija susednih kanala se odnosi na ometajući uticaj izvora zračenja koji koristi susedni kanal – bilo zbog toga što se deo energija zračenja ometajućeg izvora „preliva“ na susedne kanale, bilo zbog nedovoljno selektivnih filtera prijemnika.

1.6.2 Šum

Termički šum, ili samo šum, predstavlja važnu pojavu u radio komunikaciji. Šum je posledica termičkog kretanja elektrona u bilo kojoj provodnoj sredini (npr. u elektronskim kolima predajnika i prijemnika) i prenosnom medijumu i u funkciji je temperature. Sa porastom temperature, termička energija elektrona se povećava, brzina kretanja elektrona raste, oni se češće sudaraju sa drugim česticama, što za posledicu ima stvaranje slučajnih fluktuacija napona u elektronskom kolu. Termički šum je uniformno distribuiran u frekventnom spektru (postoji na svim frekvencijama) te se zato često naziva *beli šum*. Termički šum se ne može eliminisati i zbog toga je gornja granica performansi komunikacionih sistema upravo određena nivoom šuma kojem je sistem izložen.

Termički šum se karakteriše spektralnom gustinom snage (PSD – *Power Spectral Density*):

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

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

$$P_N = N_0 B[W]$$

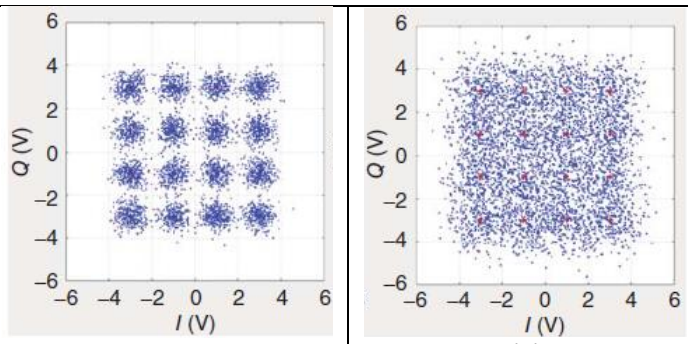
Da bi se ostvarila pouzdana bežična veza, neophodno je da nivo signala bude visok, a nivo šuma nizak. U tom smislu, kao faktor dobrote komunikacionog linka koristi se odnos između nivoa signala i nivoa šuma kojem je signal izložen, tj. odnos signal-šum (*SNR – Signal-to-Noise Ratio*):

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

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

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

Svaki komunikacioni sistem koristi određeni frekventni opseg, npr. između frekvencija f_L i f_H. U ulaznom kolu prijemnika, postoje filteri, koji filtriraju (eliminišu) sve frekventne komponente van opsega koji je od interesa, tako da se dalje obrađuje koristan signal, ali i šum prisutan u datom frekventnom opsegu. Na osnovu prethodnih jednačina vidimo da je 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.



(a) (b)

Na slici levo je ilustrovan uticaj šuma na 16QAM modulisan signal. Konstelacioni dijagrami na ovoj slici su dobijeni merenjem faze i amplitude simbola (signalnih elemenata) na strani prijemnika. Umesto da na dijagramima vidimo 16 tačaka, kao na Sl. 31, što bi značilo da svaki simbol stiže sa amplitudom i fazom kako je poslat, uočavamo rasipanje oko očekivanih pozicija.

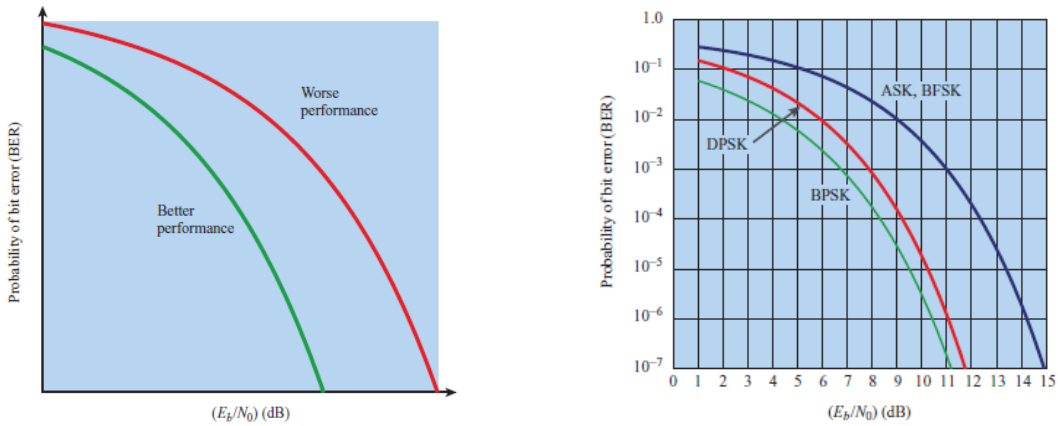
Ovo rasipanje je posledica delovanja šuma na modulisani signal. Ako je odnos signal-šum dovoljno visok, kao u slučaju na slici (*a*) gde je $SNR_{dB} = 16dB$, demodulator, uprkos šumu, u najvećem broju slučajeva je u mogućnosti da pravilno protumači primljeni signalni element vezujući ga za najbližu tačku iz idealnog konstelacionog dijagrama. Međutim, u slučaju niskog odnosa signal-šum, kao npr. na slici (*b*) gde važi $SNR_{dB} = 10dB$, rasipanje je u toj meri izraženo da je verovatnoća greške u dekodiranju simbola veoma velika.

E_b/N_0

Posledica šuma je pojava grešaka na prijemu. Na primer, predajnik je poslao binarno 0 (modulisano na odgovarajući način), ali je tokom prenosa signal u toj meri izobličen šumom da je prijemnik u primljenom signalu prepoznao 1. Pošto je šum slučajan proces, greške na prijemu su takođe slučajne, pa tako, možemo govoriti o verovatnoći bit-greške na prijemu, odnosno o verovatnoći da je bit informacije primljen sa greškom. Ova verovatnoća se tipično označava skraćenicom *BER* (*Bit Error Rate*) – *bitska stopa grešaka*. Na primer, ako u nekom komunikacionom sistemu važi $BER = 10^{-6}$, to znači da treba očekivati da će, u proseku, svaki milioniti bit biti primljen sa greškom. BER zavisi od mnogo parametara, a pre svega od nivoa šuma. Međutim, za izražavanje BER-a, umesto odnosa signal-

šum (SNR), koristi se odnos E_b/N_0, gde je E_b energija signala po bitu, a N_0 spektralna gustina snage šuma. E_b je zapravo energija sadržana u korisnom signala na izlazu prijemne antene tokom trajanja jednog bit-intervala. BER je uvek opadajuća funkcija odnosa E_b/N_0. Na Sl. 32 je prikazana tipična zavisnost BER od E_b/N_0. Za svaku BER krivu, povećanje nivoa signala u odnosu na nivo šuma vodi ka smanjenju BER-a, odnosno ka pouzdanijem prenosu. Povećanje nivoa šuma ima suprotan efekat. Takođe, treba uočiti da E_b (pošto je to energija, a ne snaga) zavisi i od trajanja bit-intervala. Što je bit-interval duži to će više energije biti uloženo u prenos jednog bita, odnos E_b/N_0 će biti veći, a tim i BER manje. To praktično znači da je prenos na višim bitskim brzinama, zbog kraćeg trajanja bit-intervala, manje pouzdan od prenosa na nižim brzinama.

Osim od nivoa šuma, BER takođe zavisi od tipa modulacije, odnosno od načina kako su podaci utisnuti u signal. Dve krive na Sl. 32(a) predstavljaju BER performanse dva različita komunikaciona sistema. Sistem kome odgovara kriva „*better performance*“ omogućava pouzdaniji prenos jer će kod ovog sistema, za isto E_b/N_0, verovatnoća greška biti manja nego u sistemu kome odgovara kriva „*worse performance*“. Na Sl. 32(b) je prikazan BER za nekoliko različitih modulacionih šema.



(a) (b)

Sl. 32 Zavisnost bitske stope grešaka (BER) od odnosa E_b/N_0: (a) šta je bolje, a šta lošije; (b) BER tri različite modulacione šeme

1.7 Kontrola ispravnosti prenosa

Ni jedan komunikacioni sistem, a posebno sistemi za bežičnu komunikaciju, nije imun na pojavu grešaka u prenosu. Greške potiču od šuma i interferencije koje deluju na RF signal, a njihova posledica je promena jednog ili više bita u bloku bita koja se prenosi. Greške menjaju informaciju koja je poslata, zbog čega ona postaje neupotrebljiva ili, u mnogim slučajevima, može biti pogrešno protumačena.

Generalno, postoje tri pristupa za suočavanje sa greškama u prenosu:

- Kodovi za detekciju grešaka
- Kodovi za korekciju grešaka, takođe poznati pod skraćenicom FEC (*Forward Error Correction*)
- Zahtev za ponavljanje, ili ARQ (*Automatic repeat request*).

Primena kodova za detekciju grešaka omogućava detekciju prisustva greška u primljenoj informaciji. Tipični, ovi kodovi se koriste u kombinaciji sa ARQ tehnikama. Prijemnik, prosto, odbacuje svaki blok podataka u kome je uočena greška, i šalje predajniku ARQ zahtev za ponovnim slanjem istih podataka. FEC kodovi su tako osmišljeni da omogućavaju ne samo detekciju, već i korekciju (ispravljanje) grešaka, čime se eliminiše potreba za ponovnim slanjem. FEC tehnike se često koriste u bežičnoj komunikaciji kada je stopa grešaka relativno visoka, a ponovno slanje izrazito neefikasno. Neki bežični protokoli koriste hibridne ARQ šeme, koje kombinuju FEC i ARQ.

1.7.1 Detekcija grešaka

Opšta pretpostavka da se između predajnika i prijemnika prenose paketi podataka, gde svaki paket sadrži određeni broj bita. Paket je primljen sa greškom ako je pogrešno primljen jedan ili više bita u paketu.

P_b: Verovatnoća greške pojedinačnog bita. Identično stopi grešaka (BER).

P_1: Verovatnoća da će paket biti primljen bez grešaka (svi bitovi paketa su ispravno primljeni).

P_2: Verovatnoća da algoritam za detekciju grešaka neće otkriti grešku u paketu sa jednom ili više bit-grešaka.

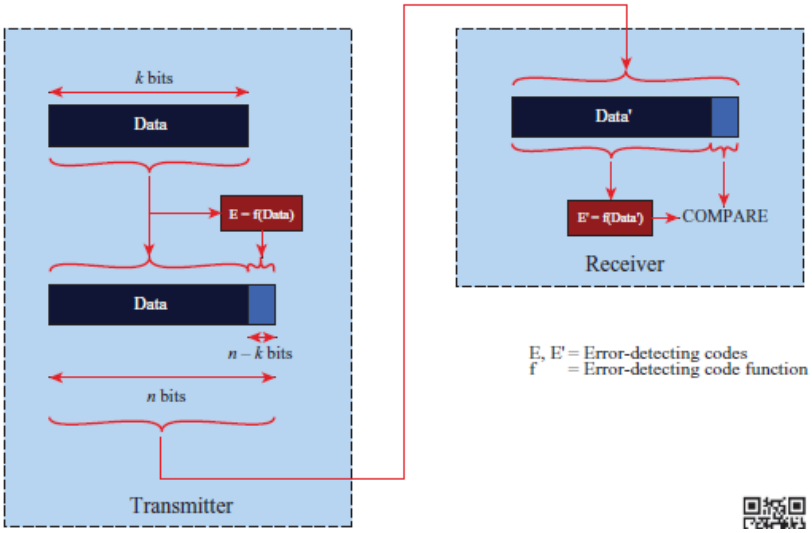
P_3: Verovatnoća da će algoritma za detekciju grešaka signalizirati grešku u paketu (jedan ili više pogrešnih bita).

Razmotrimo slučaj kada se algoritma za detekciju grešaka ne primenjuje, odnosno primenjuje se trivijalan algoritam koji uvek signalizira ispravan prenos. Jasno je da važi $P_3 = 0$. Da bi smo odredili preostale dve verovatnoće, pretpostavimo da je verovatnoća P_b konstantna i nezavisno za svaki bit. Drugim, rečima, verovatnoća da će *i*-ti bit u paketu biti primljen sa greškom ne zavisi od toga da li su prethodni bitovi preneti ispravno ili pogrešno. Ako je dužina paketa F bita, tada važi:

$$P_1 = (1 - P_b)^F$$
$$P_2 = 1 - P_1$$

Objašnjenje: $(1 - P_b)$ je verovatnoća da će bit biti ispravno primljen. Pošto su bitovi nezavisni, u smislu pojave greške, verovatnoća da će svi bitovi paketa biti ispravno primljeni (P_1) je proizvod F verovatnoća $(1 - P_b)$. Verovatnoća da u paketu postoji bar jedna bit-greška (P_2) je, naravno, $1 - P_1$. Dakle, što je BER (tj. P_b) veće i/ili dužina paketa veća, to će verovatnoća da paket stigne bez grešaka biti manja.

Sve tehnike za detekciju grešaka zasnovane su na istom opštem principu (Sl. 33). Predajnik proširuje blok podataka koji se prenosi dodatnim bitovima, koji čine tzv. kôd za detekciju grešaka. Ovaj kôd se izračunava primenom određenog algoritma za detekciju grešaka na bitove koji čine originalni sadržaj paketa (tzv. informacioni bitovi). Za blok podataka dužine k bita, algoritam za detekciju grešaka generiše kôd dužine $n - k$ bita, pri čemu važi $(n - k) < k$. 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 na k bita podataka i $(n - k)$ bita kôda za proveru greška i primenjuje identičan algoritma za detekciju grešaka na bitove podatka. Ukoliko se izračunati kôd za detekciju grešaka razlikuje od primljenog, algoritma signalizira grešku u prenosu.



Sl. 33 Opšti princip detekcije grešaka u komunikacionim sistemima

Za idealni algoritam za detekciju grešaka bi važilo: $P_2 = 0$ i $P_3 = 1$. Drugim rečima, takav algoritam bi bio u stanju da detektuje svaku pojavu greške u paketu (bez obzira na broj pogrešnih bita). Međutim, idealni algoritam za detekciju grešaka ne postoji, što znači da se može desiti da algoritam signalizira ispravan prenos uprkos tome što u je paket primljen sa greškama, tj. $P_3 < 1$. Efikasnost detekcije grešaka zavisi kako od primenjenog algoritma za detekciju grešaka tako i od broja bita za proveru $(n - k)$. Generalno važi da što je kôd za detekciju grešaka duži, to će efikasnost detekcije grešaka biti veća. Međutim, povećanjem dužine kôda za detekciju grešaka veća, smanjuje se komunikacioni kapacitet koji je raspoloživ za prenos informacionih bita, odnosno korisnih podataka.

Bit parnosti

Najjednostavnija tehnika za detekciju grešaka je dodavanje bita parnosti na kraj bloka podataka. Vrednost bita parnosti se bira tako da ukupan broj 1-ca u proširenom podatku bude paran (što bi odgovaralo bitu parne parnosti), odnosno neparan (odgovara bitu neparne parnosti). Bitom parnosti se može detektovati neispravan prenos samo ukoliko u primljenom paketu postoji neparan broj bit-grešaka (1, 3, 5,...), jer se u tim slučajevima menja parnost paketa. Međutim, u slučaju parnog broja bit-grešaka, parnost se neće promeniti i greške će proći neprimećeno. Tehnika bita parnosti je posebno osetljiva na impulse smetnje, koje traju duže od jednog bit intervala. Iz tog razloga, ova tehnika se primenjuje samo ako je dužina paketa mala i BER malo. Tipičan primer je žičana UART komunikacija. U bežičnom prenosu, tehnika bita parnosti se retko koristi.

CRC

CRC (*Cyclic Redundancy Check*), ili ciklična redundantna provera, je jedna od najčešće korišćenih tehnika za detekciju grešaka. Opšti princip je u sledećem. Za dati 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. Na primer:

$$\begin{array}{r} 1111 \\ \underline{+1010} \\ 0101 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 1111 \\ \underline{-0101} \\ 1010 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 11001 \\ \underline{\times 11} \\ 11001 \\ \underline{11001} \\ 101011 \end{array}$$

Kao što vidimo, + i – u CRC aritmetici je XOR primenjeno na svaki par bita. Operacije množenja se realizuju svođenjem na uzastopna sabiranja, po istom postupku kao u binarnoj aritmetici, ali s tom razlikom što se sada umesto + i – koristi XOR. Na sličan način se realizuje i deljenje.

Neka je:

T: n-bitni paket koji treba preneti

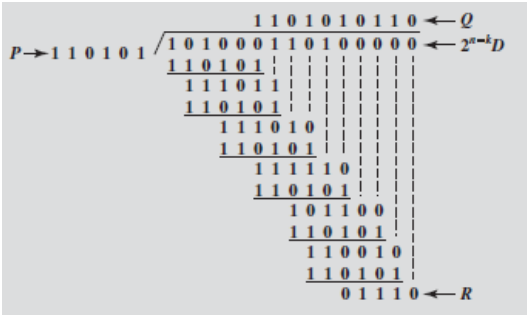
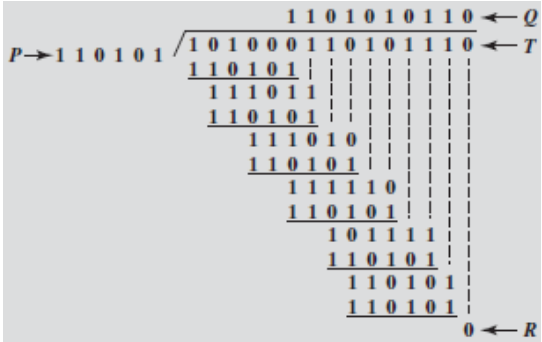
D: k-bitni blok podataka (prvih k bita paketa T)

F: $(n - k)$ bitni FCS (poslednjih $(n - k)$ bita paketa T)

P: $(n - k + 1)$-bitna sekvenca; tj. predefinisani deljenik

Treba uočiti da važi $T = 2^{n-k}D + F$. Drugim rečima, paket se formira tako što se na blok podataka D, koji je pomeren za $(n - k)$ bit-pozicija ulevo, nadovezuje $(n - k)$ bita provere (F).

Dakle, cilj je odrediti F tako da je T deljivo bez ostatka sa P. Postupak je takav da se $2^{n-k}D$ podeli sa P i dobijeni ostatak koristi kao F. Zahvaljujući osobinama CRC aritmetike, može se pokazati da je T, formirano na ovakav načni, bez ostatka deljivo sa P.

Primer
• Neka je dato: Blok podataka $D = 1010001101$ (10 bita) Sekvenca $P = 110101$ (6 bita) FCS $R =$? (treba izračunati - 5 bita) Dakle, $n = 15$, $k = 10$ i $(n-k) = 5$ • Blok podataka se množi sa 2^5, što daje: 101000110100000. • Dobijeni proizvod se deli sa P:  (Pogrešan tok izračunavanja. Za $Q_i = 0$, P treba da bude sve nule). Ovde je Q količnik i R ostatak deljenja: $\frac{2^5 D}{P} = Q + R$. Ostatak deljenja je uvek za jedan bit kraći od deljenika. Pošto P ima 6 bita, R će imati 5. • Ostatak R se dodaje na $2^5 D$, što daje $T = 101000110101110$. T je paket koji će biti prenet. • Ukoliko u prenosu nije bilo grešaka, prijemnik će primiti T u istom obliku kako je poslat. Prijemnik deli T sa P:  • S obzirom da je ostatak deljenja 0, prijemnik zaključuje da u prenosu nije bilo grešaka.

Posledica greške u prenosu je promena (komplementiranje) jednog ili više bita u paketu. Dakle, tokom prenosa neki bitovi paketa zadržavaju svoju vrednost, dok se neki drugi komplementiraju. Imajući u vidu osobinu operacije XOR: $0\ XOR\ a = a$ i $1\ XOR\ a = \bar{a}$, primljeni paket T_r možemo izraziti kao XOR između poslatog paketa T i tzv. vektora greške E:

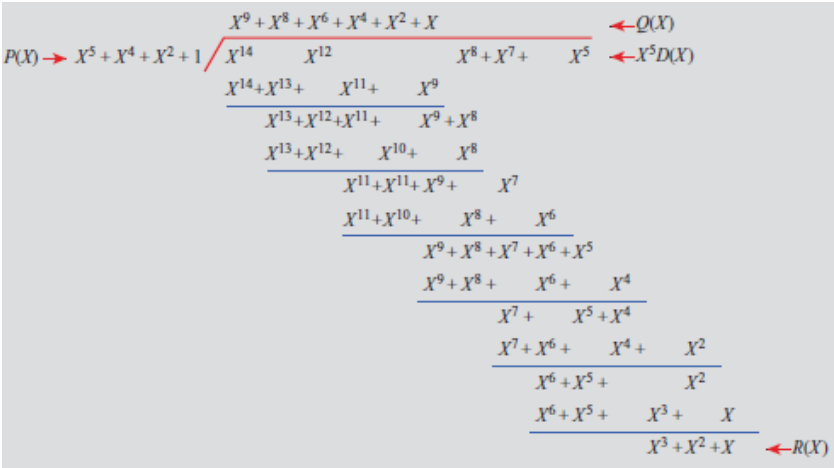
$$T_r = T \oplus E$$

Vektor E ima istu dužinu kao paket, n, i sadrži 1 na svim bit-pozicijama gde je došlo do greške u prenosu. Ukoliko su se u prenosu desile jedna ili više bit-grešaka ($E \neq 0$) prijemnik neće detektovati prisustvo greška ukoliko je T_r deljivo bez ostatka sa P. S obzirom na to da je poslati paket, T, deljiv bez ostatka sa P i da važi $T_r = T \oplus E$, T_r deljivo bez ostatka sa P samo ako je E deljivo bez ostatka sa P.

Drugim rečima, raspored pogrešnih bita u primljenom vektoru mora biti takav da je E deljivo bez ostatka sa P, što nije nemoguće, ali je veoma malo verovatno, naročito ako je P veće dužine.

Alternativni načina za predstavljanje CRC aritmetike je da se sve višebitne vrednosti koje učestvuju u procesu CRC izračunavanja/provere izraze kao polinomi fiktivne promenljive X, sa binarnim koeficijentima. Koeficijenti polinoma odgovaraju bitovima u odgovarajućoj bit-sekvenci. Aritmetičke operacije se i dalje obavljaju po modulu 2, ali ne nad binarnim sekvencama već nad polinomima. Pomeranje bit-sekvence za k bit-pozicija ulevo je isto što i množenje odgovarajućeg polinoma članom X^k. Primera radi

	Bit-reprezentacija	**Polinomna reprezentacija**
D	1010001101	$X^9 + X^7 + X^3 + X^2 + 1$
P	110101	$X^5 + X^4 + X^2 + 1$



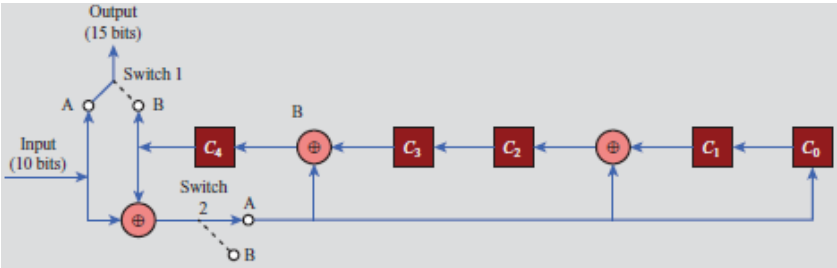
CRC mehanizam podrazumeva da obe strane u komunikaciji koriste isti polinom $P(X)$. Izbor ovog polinoma je predodređen standardnim komunikacionim protokolom koji se koristi, npr. WiFi, Bluetooth itd. Ispod su navedeni neki od često korišćenih polinoma:

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	$x^8 + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + 1$

Jedna od velikih prednosti CRC-a je laka hardverska realizacija. Princip je ilustrovan na Sl. 34. Kao i u prethodnim primerima, važi $n = 15$, $k = 10$ i $(n - k) = 5$ i $P(X) = X^5 + X^4 + X^2 + 1$. Na ovoj slici, crveni kvadrati predstavljaju flip-flopove (sa zajedničkim taktom, koji nije prikazan), dok su kružići sa upisanim „⊕“ XOR logička kola. Flip-flopovi su povezani u strukturu pomeračkog registra, čiji je serijski ulaz flip-flop C_0, a serijski izlaz flip-flop C_4. U opštem slučaju, dužina registra je $n - k$, tj. jednaka je dužini polja FCS. Prisustvo/odsustvo XOR kola odgovara prisustvu/odsustvu člana u polinomu $P(X)$, zanemarujući pri tom članove 1 i X^{n-k}. Zbog toga, u konkretnom primeru, XOR kola vidimo ispred flip-flopova sa indeksima 2 i 4.

Proces teče na sledeći način. Na početku, registar je resetovan (u flip-flopovima su sve nule). U prvoj fazi, preko ulaza *Input* unosi se 10-bitni blok podataka, bit po bit. Pri tom su prekidači *Switch* 1 i *Switch* 2, oba, u položaju A. To znači da se svaki bit podatka prenosi na izlaz *Output* i serijski upisuje u registar. Nakon što je unesen poslednji bit bloka podataka, u registru je prisutan ostatak deljenja bloka

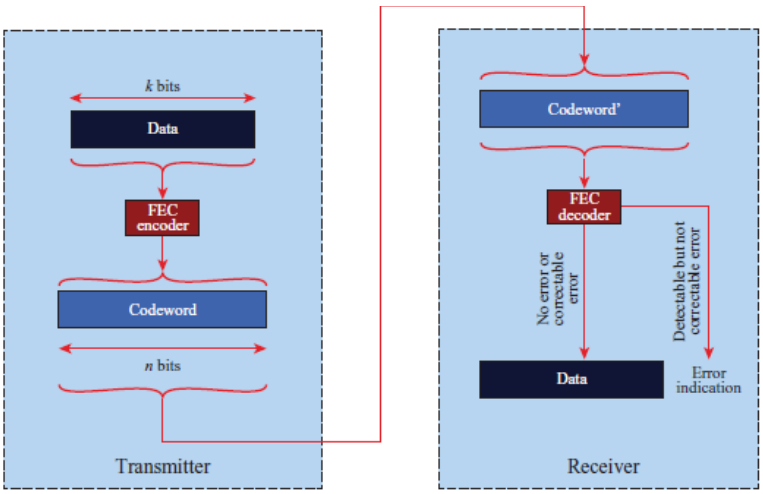
podataka polinomom $P(X)$, odnosno FCS. Sada se prekidači prebacuju u položaj B i na izlaz *Output* se šalje $n - k = 5$ bita polja FCS.



Sl. 34 Izračunavanje CRC u hardveru

1.7.2 Kôdovi za korekciju grešaka

Primena kôdova za detekciju grešaka omogućava prijemniku da registruje prisustvo greška u primljenom paketu. Kôdovi za korekciju grešaka idu jedan korak dalje i omogućavaju prijemniku ne samo da detektuje već i da ispravi greške u primljenom paketu. Sa ispravljenom greškom, više ne postoji potreba za ponovnim prenosom istog paketa (ARQ), što može biti od velikog značaja u pojedinim komunikacionim sistemima. Naravno, ni jedna tehnika za detekciju/korekciju grešaka nije idealna, što znači da, koji god kôd da se primeni, uvek će postojati situacije kada prijemnik neće uspeti da koriguje, a nekada ni da detektuje prisustvo greške.



Sl. 35 Opšti princip korekcije grešaka

Osnovni princip procesa korekcije grešaka, ili FEC, prikazan je na Sl. 35. Na predajnoj strani, korišćenjem FEC kodera, svaki k-bitni blok podataka se preslikava u n-bitni blok ($n > k$), tzv. kodnu reč, koja se bežičnim putem prenosi do prijemnika. Tokom prenosa, signal je izložen dejstvu šuma, što može da dovede do pojave grešaka u signalu. Na strani prijemnika, dolazni signal se demodulacijom pretvara u kodnu reč, koji je slična poslatoj kodnoj reči, ali može da sadrži greške. Ovaj blok podataka se propušta kroz FEC dekoder. Moguća su pet različita ishoda procesa FEC dekodiranja:

1. Ako je paket primljen bez grešaka, ulaz FEC dekodera je identičan poslatoj kodnoj reči i dekoder generiše ispravan blok podataka (onakav kakav je poslat) na svom izlazu.
2. Za određene rasporede grešaka, moguće je da dekoder detektuje i koriguje sve prisutne greške. Dakle, uprkos tome što se primljeni blok podataka razlikuje od poslate kodne reči, FEC dekoder je u mogućnosti ovaj blok podataka transformiše u oblik poslatog bloka podataka (tj. da ispravi greške).

3. Za određene rasporede grešaka, dekoder može da detektuje, ali ne i da koriguje greške. U ovim slučajevima, dekoder, prosto, signalizira prijemniku da primljeni paket sadrži neispravljivu (*uncorrectable*) grešku.
4. Za određene, tipično veoma retke, rasporede grešaka, dekoder detektuje grešku, ali je ne ispravlja korektno. Drugim rečima, dekoder, uveren da je dobro korigovao greške, zapravo isporučuje prijemniku neispravan blok podataka.
5. Za određene, još ređe, rasporede grešaka, detektor ne detektuje greške u prijemu iako one postoje i preslikava n-bitni primljeni blok podataka u k-bitni blok koji se razlikuje od poslatog k-bitnog bloka podataka. Konačni ishod je kao u prethodnom slučaju – prijemnik dobija neispravni blok podataka.

Korekcija grešaka se zasniva na uvođenju redundanse u prenosu poruka. Pretpostavimo, na primer, da treba preneti samo jedan bit informacije, 0 ili 1. Radi mogućnosti korekcije grešaka, umesto poruke dužine jednog bita, prenosi se kodna reč od npr. 4 bita. Tako, 0 se kôdira kôdnom rečju 0000, a 1 kodnom rečju 1111. Dakle, prenosi se četiri puta više bita nego što je to potrebno, ali je zato prijemniku omogućeno da i u prisustvu grešaka u prenosu, povrati originalnu informaciju. Na primer, ako je primljeno 0100, prijemnik će zaključiti da je u prenosu promenjena vrednost jednog bita i da je poslata kodna reč zapravo 0000 što bi odgovaralo binarnoj 0. Ovakva ishod je mnogo verovatniji u odnosu na scenario gde je poslata kôdna reč 1111, a u prenosu promenjena 3 bita. Međutim, svaki ishod je moguć, pa i taj da je zaista poslato 1111, u kom slučaju bi dekoder načiniti grešku (slučaj 4). Slučaj 5 bi odgovarao scenariju kada je poslato 0000, a primljeno 1111 (u prenosu su promenjena sva 4 bita). Primljena kôdna reč je validna i dekoder je dekodira kao bit 1. Pretpostavimo da je primljena kôdna reč 0011. Zbog jednakog broja 1 i 0, dekoder nije u mogućnosti da koriguje grešku, već samo da signalizira postojanje greške (slučaj 5).

Primer. Zadržimo se na banalnom primeru prenosa 1-bitne informacije 4-bitnim kodnim rečima, kako bismo ukazali na neke kvantitativne aspekte FEC tehnika. Nisu svi slučajevi podjednako verovatni. Ako je npr. $BER = 10^{-6}$, odnosno pogrešno se prima svaki milioniti bit, u najvećem broju prenosa, poruka stiže do prijemnika bez grešaka (slučaj 1). Verovatnoća ispravnog prenosa je $1 - (1 - 10^{-6})^4 \approx 0.999996$. Verovatnoća da je od četiri bita pogrešan jedan iznosi $4 \times 10^{-6} \times (1 - 10^{-6})^3 \approx 3.999988 \times 10^{-6}$. Verovatnoća dvostruke greške (tipa, 0011) je značajno manja i iznosi $6 \times (10^{-6})^2 \times (1 - 10^{-6})^2 \approx 5.999994 \times 10^{-12}$, dok je verovatnoća da sa greškom stignu sva 4 bita enormno mala i jednaka $10^{-6x4} = 10^{-24}$. Pošto se jednostruka greška može korigovati, sistem ne uspeva da povrati originalnu informaciju sa verovatnoćom od približno 6×10^{-12} (jednom u 6 milion-miliona puta). Ako se ne bi koristio FEC, tj. prenosi se samo jedan bit, verovatnoća greške bi, naravno, bila 10^{-6}. To znači da je primenom FEC, pouzdanost sistema povećana za čak 166.666 puta. Cena koja se plaća je prenos veće količine informacija (čak 4 puta više).

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 detekciju grešaka takođe unose redundansu, ali je ona značajno manja. Kodovi za korekciju grešaka su pogodni za npr. *broadcast* sisteme, poput zemaljske digitalne TV, gde fizički ne postoji mogućnost za ARQ. Takođe, ovi kodovi se koriste i u satelitskim kumunikacijama, koje su karakteristične po velikom propagacionom kašnjenju signala od predajnika i prijemnika (zbog velike udaljenosti satelita), što otežava primenu ARQ.

1.7.3 ARQ

ARQ (*Automatic repeat request*) je način za oporavak od greške u prenosu podataka, koji se sastoji u tome da se nakon detektovane greške u prenesenim podacima automatski zahteva njihovo ponovno slanje. Sve to u nadi da će ponovljeni prenos proći bez grešaka.

Ovaj jednostavan princip funkcioniše na sledeći način:

1) *Prenos podataka*: Pošiljalac šalje podatke primaocu preko bežičnog komunikacionog kanala. Podaci se šalju blok po blok, i svaki blok se, zajedno sa kôdom za proveru, pakuje u paket, a paketi se nezavisno prenose.
2) *Detekcija grešaka*: Primalac proverava primljene podatke koristeći odgovarajuću tehniku za detekciju grešaka (npr. bit parnosti ili, mnogo češće, CRC)
3) *ACK ili NACK*: Ako su primljeni podaci bez grešaka, primalac šalje potvrdu prijema pošiljaocu, što označava uspešan prijem. Potvrda se šalje u obliku posebnog, kratkog paketa, koji se standardno naziva ACK (*Acknowledge*). Ako detektuje grešku, primalac šalje negativnu potvrdu (NACK paket), ili ne šalje nikakvu potvrdu. Izbor između ove dve opcije, zavisi od detalja konkretne ARQ šeme.
4) *Zahtev za ponovnim slanjem*: Nakon prijema NACK-a, ili nedostatka ACK potvrde u određenom vremenskom intervalu, pošiljalac pretpostavlja da su podaci oštećeni ili izgubljeni i zbog toga 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.

Postoje male varijacije u realizaciji ARQ mehanizma, uključujući:

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 je dozvoljeno da, ne čekajući na potvrdu, 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.

1.8 Vodič za učenje

Prenosni medijum

- Komponente sistema za prenos podataka. Vođeni i nevođeni prenosni medijumi.
- Elektromagnetno zračenje (električno i magnetno polje). Polarizacija elektromagnetnih talasa
- Elektromagnetni spektar. Opseg radio talasa i mikrotalasa i podela na bandove. (Ne očekuje se da znate konkretne opsege pojedinih bandova)
- Regulativa i upotreba spektra. Tri načina dodele spektra.
- Opšte karakteristike i tipične primene radio talasa i mikrotalasa.

Antene

- Šta su to antene i koja je njihova namena. Usmereni i neusmereni prenos.
- Dijagram zračenja antene. Izotropne, usmerene i omnidirekcione antene. Skice dijagrama zračenja izotropne i usmerene antene. Tumačenje dijagrama zračenja.
- Karakteristike antena.
    - Impedansa. Kako se definiše. Tumačenje formule za Z_A. Rezonantna frekvencija i širina opsega antene
    - Efikasnost. Definicija. Uticaj refleksije transmisionog voda na efikasnost antene.
    - Širina snopa zračenja, direktivnost i dobit antene. Definicije sa pratećim objašnjenjima
    - Efektivna površina antene. Definicija i objašnjenje. Veza između dobiti i efektivne površine antene ($G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}$)
    - Polarizacija antene. Kako polarizacija predajne i prijemne antene utiče na efikasnost prenosa. Međusobna polarizacija. Primena antena sa kružnom polarizacijom.

Tipovi antena

- Dipol antena. Definicija, skica antene i dijagram zračenja. Kratka dipol antena
- Monopol antena. Definicija, skica antene i okvirna skica dijagrama zračenja.
- Savijeni dipol. Definicija i skica antene.
- Helikoidna antena. Skica antene i mehanički parametri antene. Normalni i aksijalni način korišćenja, sa skicama odgovarajućih dijagrama zračenja
- Mikrostrip antena. Konstrukcija, skica, dimenzioni parametri i na šta utiču. Prednosti i nedostaci ove u odnosu da druge tipove antena.

Propagacija u slobodnom prostoru

- *Friis*-ova formula ($P_r = \frac{G_r G_t P_t \lambda^2}{(4\pi d)^2}$), kako se izvodi i njeno tumačenje
- Gubitak snage signala (*path-loss*). Formule $L = \frac{P_t}{P_r} = \frac{(4\pi d)^2}{G_r G_t \lambda^2}$ i $L(dB) = -20log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)$
- Formula za snagu prijemnog signala na rastojanju d od predajnika, preko snage na referentnom rastojanju: $P_r(d)(dB) = 10\log\left(P_r\left(d_{ref}\right)\right) + 20log\left(\frac{d_{ref}}{d}\right)$
- Prostiranje u realnim uslovima. Koeficijent slabljenja i $P_r \propto d^{-\nu}$

Apsorpcija, refleksija, refrakcija, difrakcija i rasejanje

- Potrebno je da znate da objasnite svaku od ovih pojava i njihov uticaj na prostiranje radio talasa.

Prostiranje po više putanja

- Šta je to LOS, a šta NLOS prostiranje?
- Efekat prostiranje po više putanja i MPC (*Multi Path Components*)
- Feding. Konstruktivna i destruktivna interferencija. Brzi feding
- Efekat senke i spori feding.
- Intersimbolska interferencija. Potrebno je da znate da objasnite ovu pojavu

Modulacija i demodulacija

- Zašto bežični prenos u osnovnom opsegu nije opcija?
- Opšti princip modulacije i demodulacije Sl. 24
- Opšti princip modulacije. Pojmovi simbol, signalni element, parametar m.
- Simbolska brzina i brzina podataka. Definicija.
- Demodulacija. Šta je zadatak demodulacije? Simbolska i bitska stopa grešaka.
- Pojasna modulacija. Definicija i osnovni tipovi.
- ASK, PSK, FSK i QAM modulacije. Potrebno je da znate da objasnite svaki od ovih tipova modulacije i njihove pod-varijante (npr. OOK, BPSK, ...). Za QAM, potrebno je da znate šta je to konstelacionog dijagrama. 16QAM modulator samo informativno.

Interferencija i šum

- Interferencija. Pojam i tipovi.
- Šum. Termički šum – objašnjenje pojave. Beli šum. Spektralna gustina snage šuma (N_0). Snaga šuma u frekventnom opsegu. Definicija odnosa signal-šum (SNR)
- Zavisnost između E_b/N_0 i BER. Objašnjenje i skica tipične zavisnosti (Sl. 32a).

Kontrola ispravnosti prenosa

- Kodovi za detekciju grešaka. Opšti princip (Sl. 33) i prateće objašnjenje (analiza preko verovatnoća je informativnog karaktera).
- Bit parnosti. Princip i karakteristike.
- CRC. Opšti princip. (CRC aritmetika, polinomalna reprezentacija i hardverska implementacija - informativno)

Kodovi za korekciju grešaka

- Opšti princip (Sl. 35) i prateća objašnjenja uključujući analizu ishoda dekodiranja (tačke 1 – 5). Primena.

ARQ

- ARQ procedura (tačke 1 – 5).
- ARQ varijante

- ♦ ♦ ♦ -