Unaprjeđenje modulacijskih postupaka i prijenosa signala za povećanje brzine mobilnih mreža 4. generacije

Petrec, Dario

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:056328

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Transport and Traffic Sciences - Institutional Repository







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Dario Petrec

UNAPRJEĐENJE MODULACIJSKIH POSTUPAKA I PRJENOSA SIGNALA ZA POVEĆANJE BRZINE MOBILNIH MREŽA 4. GENERACIJE

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 24. travnja 2017.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Mobilni komunikacijski sustavi**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 4004

Pristupnik: **Dario Petrec (0135230694)**
Studij: Promet
Smjer: Informacijsko-komunikacijski promet

Zadatak: **Unaprjeđenje modulacijskih postupaka i prijenosa signala za povećanje brzine mobilnih mreža 4. generacije**

Opis zadatka:

Navesti i detaljno opisati digitalne modulacijske postupke te njihove prednosti i nedostatke s obzirom na osjetljivost na pojavljivanje pogreške pri demodulaciji. Opisati tehnike višestrukog pristupa prijenosnom mediju koje se često koriste u mobilnim sustavima novijih generacija. Objasniti frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosilaca i navesti prednosti u vidu osjetljivosti na pogrešku u prijenosu te nedostatke vezane za kompleksnost u demodulaciji i zahtjeve na tehničku izvedbu demodulatora. Objasniti pojam frekvencijskog spektra i područja namjene pojedinih dijelova spektra u području koje se često koristi u javnim pokretnim mrežama te navesti dijelove spektra namijenjene mobilnoj telefoniji 4. generacije. Opisati i potkrijepiti matematičkom formulacijom tehniku prijenosa MIMO.

Zadatak uručen pristupniku: 28. travnja 2017.

Mentor:

doc. dr. sc. Mario Muštra

Predsjednik povjerenstva za završni ispit:

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

UNAPRJEĐENJE MODULACIJSKIH POSTUPAKA I PRJENOSA SIGNALA ZA POVEĆANJE BRZINE MOBILNIH MREŽA 4. GENERACIJE

IMPROVEMENT OF MODULATION TECHNIQUES AND SIGNAL TRANSMISSION FOR INCREASING SPEED OF 4TH GENERATION MOBILE NETWORKS

Mentor: doc. dr. sc. Mario Muštra
Student: Dario Petrec, 0135230694

Zagreb, rujan 2017.

UNAPRJEĐENJE MODULACIJSKIH POSTUPAKA I PRJENOSA SIGNALA ZA POVEĆANJE BRZINE MOBILNIH MREŽA 4. GENERACIJE

Sažetak

U ovom radu su navedeni i objašnjeni osnovni diskretni modulacijski postupci obrade signala, tehnike višestrukog pristupa, MIMO sustavi. Navedena je i podjela frekvencijskog spektra u Republici Hrvatskoj za sustave mobilnih mreža četvrte generacije.

Digitalni modulacijski postupci omogućuju prilagodbu informacije za prijenos digitalnim komunikacijskim sustavima. Informacije se prenose preko radiofrekvencijskog spektra koji je ograničen stoga ga je bitno racionalno iskorištavati pomoću tehnika višestrukog pristupa koje omogućuju pristup komunikacijskom sustavu većem broju korisnika istovremeno.

Cilj ovoga završnog rada je objasniti tehnologije potrebne za prijenos signala mobilnim komunikacijskim sustavom te pridonijeti boljem razumijevanju tih tehnologija.

Ključne riječi: modulacijski postupci, OFDM, tehnike višestrukog pristupa, MIMO, digitalna dividenda

Summary

In this final thesis basic discrete modulations, signal processing, multiple access techniques, and MIMO systems are discussed and explained. The distribution of the frequency spectrum in the Republic of Croatia for the fourth generation mobile networks is also shown.

Digital modulation procedures enable adaptation of information for transmission of digital communication systems. Information is transmitted over a limited radio frequency spectrum, so it is essential to exploit it rationally through multiple access techniques which allow larger number of users to access a communication system simultaneously.

The purpose of this final thesis is to explain the technologies needed to transmit signals in the mobile communication system and to contribute to a better understanding of these technologies.

Keywords: modulation procedures, OFDM, multiple access techniques, MIMO, digital dividend

Sadržaj

1. Uvod ... 1
2. Digitalni modulacijski postupci ... 2
   2.1. Diskretna modulacija amplitude ... 2
   2.2. Diskretna modulacija frekvencije ... 4
   2.3. Diskretna modulacija faze ... 5
   2.4. Kvadraturno amplitudna modulacija ... 8
3. OFDM ... 9
   3.1. Obilježja OFDM signala ... 10
   3.2. OFDM parametri ... 12
      3.2.1. Razmak podnosioca ... 13
      3.2.2. Broj podnosioca ... 13
      3.2.3. Ciklički prefiks ... 13
   3.3. OFDMA ... 14
4. Metode višestrukog pristupa ... 17
   4.1. Višestruki pristup s frekvencijskom raspodjelom kanala ... 19
   4.2. Višestruki pristup s vremenskom raspodjelom kanala ... 22
   4.3. Višestruki pristup s kodnom raspodjelom kanala ... 25
5. MIMO ... 30
   5.1. Pametne antene ... 31
   5.2. Princip rada sustava MIMO ... 32
      5.2.1. Prostorno multipleksiranje ... 33
      5.2.2. Koncept diverzitija ... 34
   5.3. Kapacitet komunikacijskog kanala MIMO sustava ... 35
6. Elektronički spektar u mobilnim komunikacijskim sustavima ... 37
7. Zaključak ... 40

Literatura ... 41

Popis ilustracija ... 43

Popis tablica ... 44

1. Uvod

Pristup brzim i mobilnim komunikacijskim sustavima radi mogućnosti širenja informacija i komuniciranja s drugima jedna je od osnovnih potreba svih ljudi. Kako bi informaciju bilo moguće poslati digitalnim komunikacijskim sustavom bitno ju je prilagoditi u oblik pogodan za prijenos takvim medijem. Modulacijski postupci omogućuju potrebnu prilagodbu informacija i kao takvi su neizostavan dio u njihovom prijenosu. Medij prijenosa u mobilnim komunikacijskim sustavima je frekvencijski spektar koji je ograničen te ga je potrebno što efikasnije iskoristiti. Tehnike koje omogućuju iskorištavanje spektra na takav način zovu se tehnike višestrukog pristupa. Osnovne vrste modulacijskih postupaka i tehnika višestrukog prijenosa su navedene i analizirane u ovome radu.

Rad se sastoji od sedam poglavlja:

1. Uvod
2. Digitalni modulacijski postupci
3. OFDM
4. Metode višestrukog pristupa
5. MIMO
6. Elektronički spektar u mobilnim komunikacijskim sustavima
7. Zaključak.

U drugom poglavlju navedeni su i objašnjeni osnovni digitalni modulacijski postupci.

U trećem poglavlju je objašnjeno što je OFDM, kako se stvara OFDM signal, koji su parametri OFDM-a te što je OFDMA tehnika višestrukog pristupa.

U četvrtom poglavlju objašnjene su tehnike višestrukog pristupa, navedene su prednosti i nedostaci svake tehnike.

U petom poglavlju je objašnjen sustav MIMO, princip rada takvog sustava i prikazano je kako se računa kapacitet kanala.

U šestom poglavlju je objašnjen pojam digitalne dividende. Naveden je frekvencijski spektar koji se koristi u 4G mrežama kao i dio spektra koji se planira koristiti za proširenje kapaciteta sustava.

Sedmo poglavlje donosi zaključak.

2. Digitalni modulacijski postupci

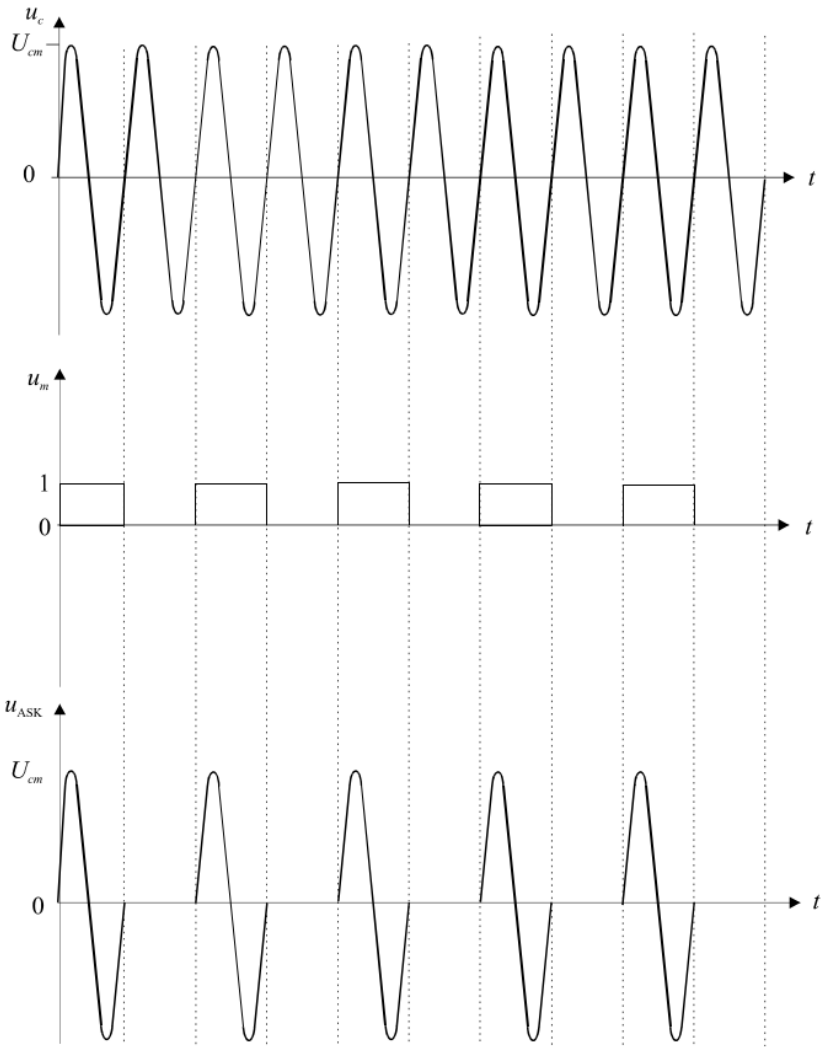
Modulacija je postupak prilagođavanja informacije u oblik pogodan za prijenos komunikacijskim kanalom, odnosno prijenos komunikacijskim medijem. Fizički medij prijenosa mogu biti bakrene niti, svjetlovodni kablovi i elektromagnetski valovi. Modulacijski postupci koji se koriste u digitalnim komunikacijskim sustavima ovise o parametru koji se modulira. To može biti amplituda, faza ili frekvencija, ali i dva ili sva tri parametra istodobno. U procesu modulacije razlikujemo prijenosni signal, modulacijski signal, odnosno signal informacije te modulirani signal. Modulirani signal nastaje tako da se u ritmu promjene modulacijskog signala mijenja jedan od parametara prijenosnog signala. Najčešće korištene digitalne modulacije su diskretna modulacija amplitude sinusnog signala, diskretna modulacija frekvencije sinusnog signala te diskretna modulacija faze sinusnog signala. Proces vraćanja signala u izvorni oblik naziva se demodulacija i odvija se na prijemnoj strani. Za prijenosni signal najčešće se uzima sinusni signal.

2.1. Diskretna modulacija amplitude

Jedan od najranijih i prvih oblika digitalne modulacije, koja se je koristila u radio telegrafiji početkom 20. stoljeća, bila je diskretna modulacija amplitude (engl. *Amplitude Shift Keying* – ASK). Idealni ASK modulirani signal ima beskonačan spektar te je iz toga razloga potrebno oblikovati impulse radi smanjenja frekvencijskog spektra. Najjednostavniji oblik ove modulacije je binarna diskretna modulacija amplitude (engl. *Binary Amplitude Shift Keying* – BASK) sa 2 stanja. [1]

Kod BASK-a amplituda signala nosioca se mijenja prema modulacijskom signalu na način da signal postoji kada se prenosi simbol '1' odnosno ne postoji kada se prenosi '0', dok su frekvencija i amplituda signala nositelja konstantne. Iz tog razloga ASK se još naziva *On-Off Keying* skraćeno OOK. [1]

Na slici 1. prikazano je kako se mijenja amplituda za različite logičke vrijednosti. Logička nula ima vrijednost amplitude moduliranog signala koja je jednaka nuli dok logička jedinica ima vrijednost nominalne amplitude prijenosnog signala. [2]



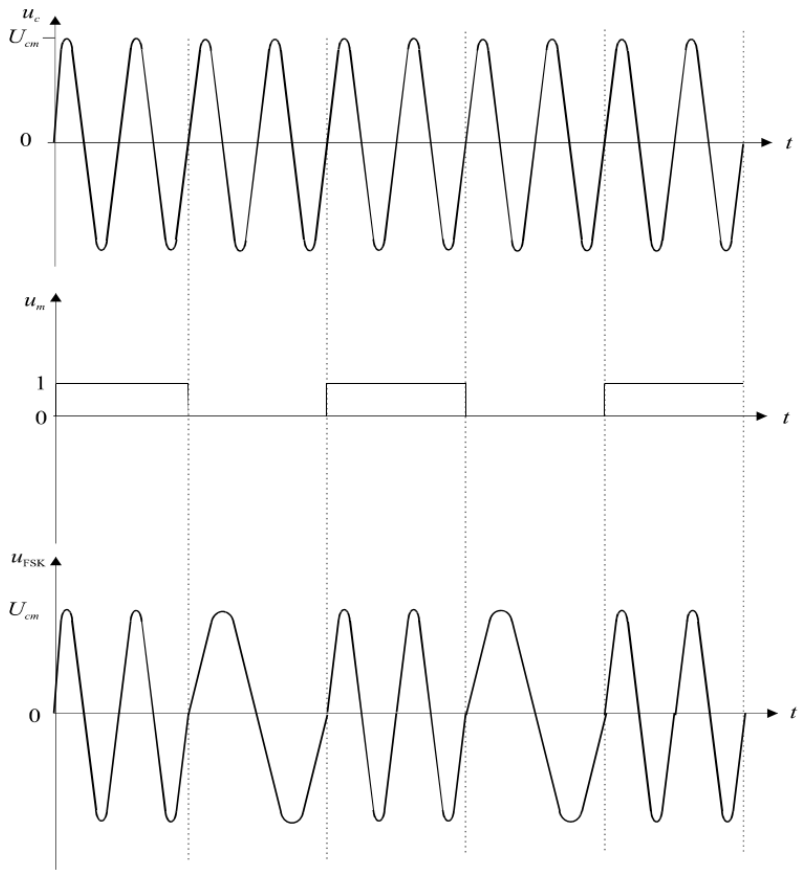
Slika 1. Grafički prikaz binarne diskretne modulacije amplitude [3]

Nedostatak diskretne modulacije amplitude je nejednakost odnosa signala i šuma za različite logičke vrijednosti što uveliko opterećuje izvore napajanja i ostale elemente uređaja. Također se javlja problem nemogućnosti prepoznavanja prekida veze jer se prekid čita isto kao logička nula. Radi toga ova modulacija se rijetko koristi, a najčešće se upotrebljava za telegrafski prijenos i prijenos drugih vrsta digitalnih signala koji ne zahtijevaju velike brzine i točnost prijenosa. [2]

2.2. Diskretna modulacija frekvencije

Diskretna modulacija frekvencije (engl. *Frequency Shift Keying* – FSK) je jedna od najranijih digitalnih modulacija koja se je počela koristiti u komunikacijskoj industriji. Podrazumijeva diskretnu promjenu frekvencije signala nosioca prema modulacijskom signalu. [4]

Modulirani signal kod diskretne modulacije frekvencije može imat više frekvencija signala nositelja. Najjednostavniji oblik ove modulacije kada signal nositelja ima dvije frekvencije takozvani BFSK (engl. *Binary Frequency Shift Keying*). [1]



Slika 2. Grafički prikaz diskretne modulacije frekvencije [3]

Slika 2. prikazuje kako se mijenja frekvencija s obzirom na nadolazeći signal. Tako je vidljivo da je logičkoj jedinici dodijeljena određena frekvenciju f_1 koja je veća u odnosu na frekvencija f_2 koja predstavlja logičku nulu. [4]

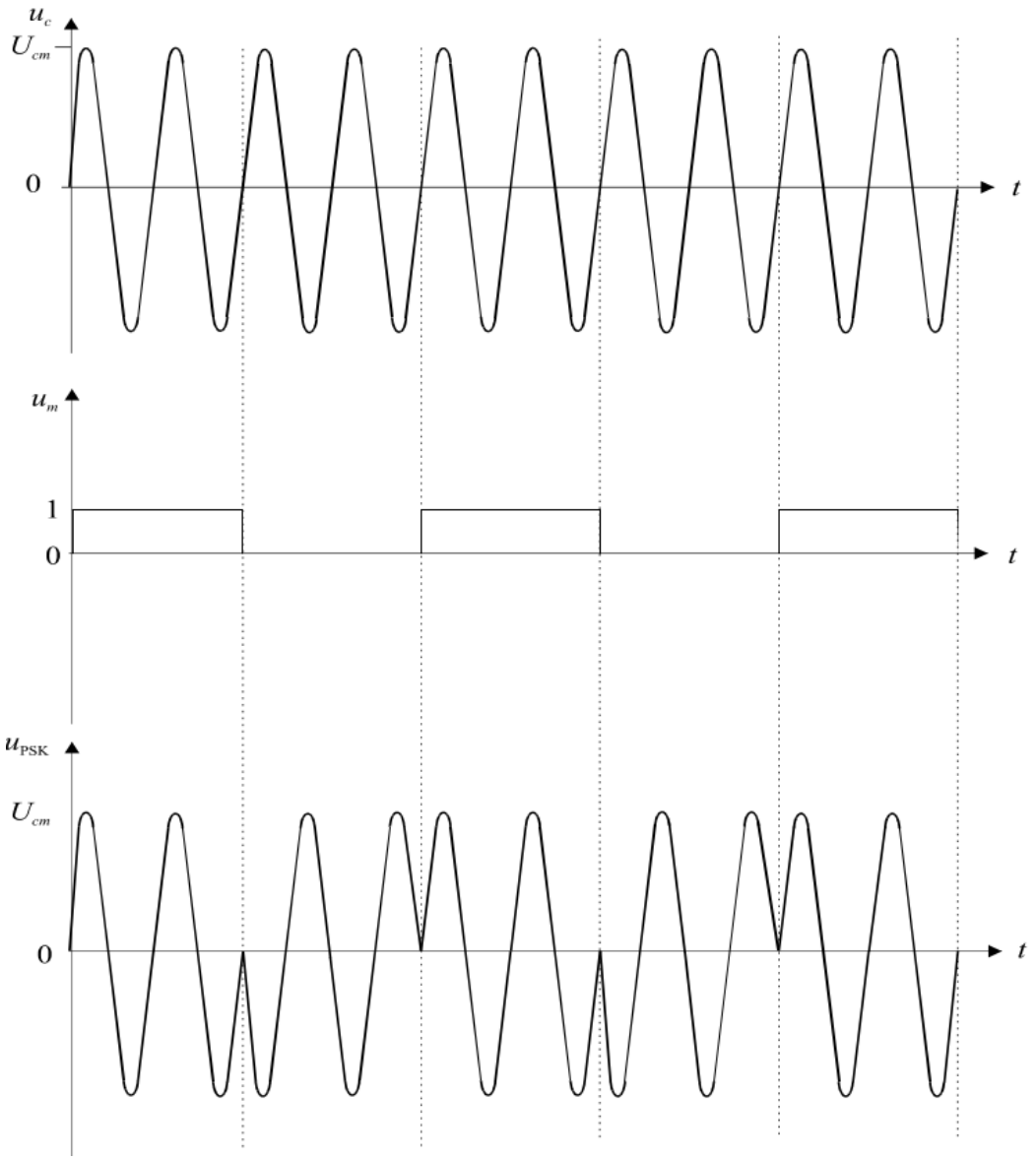
Diskretna modulacija frekvencije može se ostvariti sa dva signala dobivena pomoću diskretne modulacije amplitude koji imaju frekvencije f_1 i f_2 nositelja odnosno možemo reći da je jednaka zbroju izlaza sa dva ASK modulatora. Najčešće korištene FSK modulacije su *Minimum Shift Keying* (MSK) uz indeks modulacije 0.5 i Gaussian MSK koja je specifična za mobilnu telefoniju druge generacije. [4]

2.3. Diskretna modulacija faze

Kod diskretne modulacije faze (engl. *Phase Shift Keying* - PSK) mijenja se faza prijenosnog signala ovisno o modulacijskom signalu. PSK modulacija se također može dobiti pomoću dva ASK signala kao i FSK, ali kod ove vrste modulacija dva ASK signala moraju biti u kvadraturnom odnosu. Faza modulacijskog signala može imati dvije ili više naprijed određenih faza. [3]

Jedna od najčešćih modulacijskih postupaka je binarna modulacija faze (engl. *Binary Phase Shitft Keying* – BPSK) koja modulira fazu tako da pomiče sinusni val nosioca za 180° za svaku promjenu binarnog stanja kao što je vidljivo na slici 3. [5]

Jednostavniji oblik ove modulacije je diferencijalni BPSK ili DPSK pri čemu se dobivena faza signala uspoređuje sa fazom prethodnog signala bita. BPSK nije spektralno učinkovita modulacija jer joj je idealna spektralna učinkovitost jednaka 1 bit/s/Hz. [5]



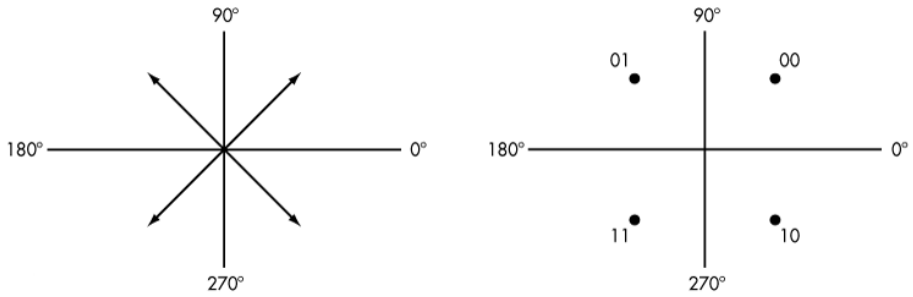
Slika 3. Grafički prikaz diskretne modulacije faze [3]

Vrlo učestala varijacija BPSK modulacije je kvadraturna modulacija faze (engl. *Quadrature Phase Shift Keying* – QPSK) gdje modulator proizvodi dva sinusna signala koji su međusobno pomaknuti za 90°. Preklapanjem dva sinusna vala binarni podaci se moduliraju u različitim fazama stvarajući četiri jedinstvena sinusna signala pomaknuta za 45° jedan od drugoga. Odnosno svaki par bitova generira signal s drugačijom fazom što je vidljivo iz tablice 1, pridruživanje para bitova može biti proizvoljno ili se može pridružiti pomoću Grayevog koda. [5]

Tablica 1. Prikaz binarnih znakova sa pridruženim fazama

Par bitova (dibit)	Faza [°]
00	45
01	135
11	225
10	315

Na lijevom dijagramu slike 4 prikazan je QPSK s faznim dijagramom gdje fazor predstavlja maksimalnu amplitudu signala dok njegov položaj označava fazu. Desni, konstalacijski, dijagram daje istu informaciju, ali je na njemu vidljiva kombinacija dibita. QPSK je također vrlo spektralno učinkovit, a spektralna učinkovitost iznosi 2 bit/s/Hz što znači da može prenijeti duplo više informacija nego BPSK u istoj širini frekvencijskog pojasa. [5]



Slika 4. QPSK dijagrami stanja [5]

Naravno, postoje diskretne modulacije faza sa više stanja, takozvane M-PSK, modulacije (engl. *Multiple Phase Shift Keying*) kojoj pripada i QPSK. QPSK se još može nazvati i 4-PSK jer postoje četiri kombinacije amplitude faze. Pomoću manjih pomaka faza, više bitova može se prenijeti po simbolu. Neke poznatije varijacije manjeg pomaka faza su 8-PSK i 16-PSK. [5]

8-PSK koristi osam simbola sa konstantnom amplitudom nosivog signala i međusobnim razmakom od 45° što dozvoljava prijenos od tri bita po simbolu. 16-PSK koristi fazne pomake od 22,5° što mu omogućava prijenos od 4 bita po simbolu. [5]

Dok su M-PSK modulacije više spektralno učinkovite, veći broj manjih pomaka faze čini proces demodulacije signala težim u prisutnosti šuma. Prednost M-PSK je u konstantnoj amplitudi signala što omogućava korištenje učinkovitijih nelinearnih pojačivača snage signala. [5]

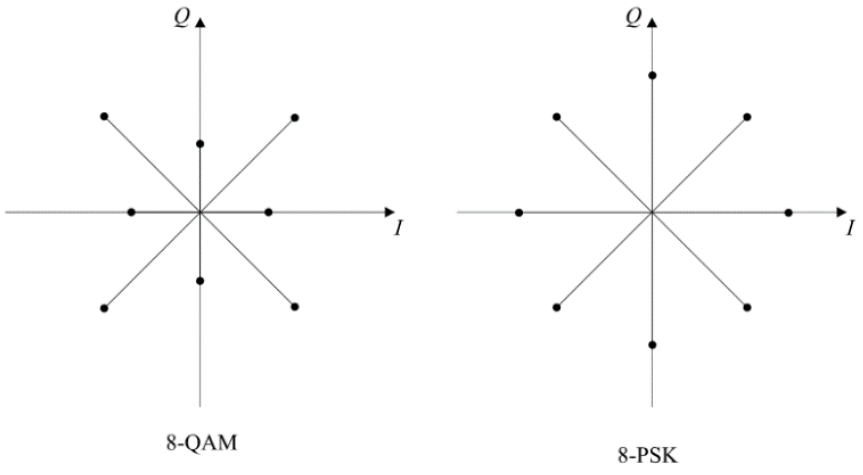
2.4. Kvadraturno amplitudna modulacija

Kvadraturno amplitudna modulacija (engl. *Quadrature Amplitude Modulation* – QAM) je analogni i digitalni modulacijski postupak koji radi na principu da se amplitude dva nositelja mijenjaju dok fazni pomak između dva nositelja konstantan i iznosi 90°. [3]

Digitalna QAM modulacija se češe koristi nego analogna. Sastoji se od dva modulacijska signala $I(t)$ i $Q(t)$ koji su u odnosu: [3]

$$u_{QAM} = I(t)\cos\omega_c t - Q(t)\sin\omega_c t \tag{1}$$

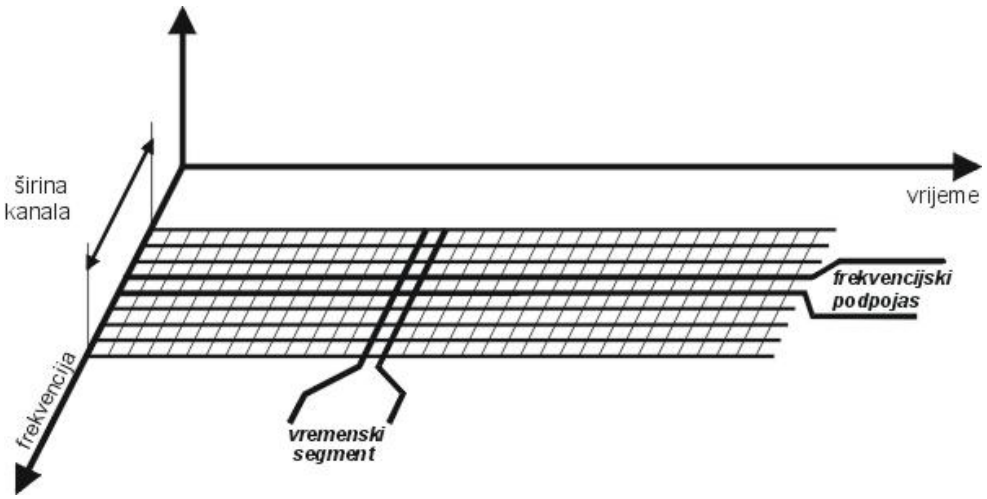
QPSK modulacija koja je već navedena je ustvari poseban oblik QAM modulacije. Razlika između tih modulacija da QAM ima promjenu amplitude dok kod QPSK to nije slučaj što je vidljivo sa slike 5. Ovisno o razini kvantizacije postoje 4-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM. Kako se koristi veća razina kvantizacije moguće je prenositi više bita po simbolu, ali raste razina šuma u sustavu i mogućnost pojave pogreške. [3], [8]



Slika 5. Usporedba 8-QAM i 8-PSK modulacija [8]

3. OFDM

Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosioca (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – OFDM) predstavlja postupak koji omogućava prijenos signala pri kojem se jedan slijed podataka odašilje na više podnosioca. Radi takvog načina rada mnogi OFDM svrstavaju u modulaciju više nosilaca (engl. *Multi-Carrier Modulation*). U osnovi OFDM predstavlja tehniku multipleksiranja jer se signal dobiva obradom simbola moduliranog signala i naknadnom modulacijom signala. [6]



Slika 6. Podjela OFDM kanala u frekvencijskoj i vremenskoj domeni [7]

Osnovne karakteristike OFDM-a su da dijeli kanal na veći broj podpojaseva tzv. potkanala. Potkanalima se prenose digitalne informacije velikih brzina u obliku moduliranih podnosioca. Ideja je da se serijski slijed podataka velike brzine razdijeli na više manjih paralelnih sljedova koji se zasebno moduliraju. Brzina prijenosa u svakom potkanalu je mala, ali također zauzima i mali dio spektra. OFDM dijeli fizički kanal u vremenskoj i frekvencijskoj domeni pa je sam kanal organiziran kao skup frekvencijskih podpojaseva i vremenskih segmenata kako je vidljivo na slici 6. Broj podnosioca može se kretati u rasponu manjem od sto pa do nekoliko tisuća s razmakom od nekoliko stotina kHz ili manje, što ovisi o samom broju tih podnosioca. Također bitna karakteristika OFDM-a je njegovo svojstvo ortogonalnosti koje dopušta podnosiocima određeno preklapanje u frekvencijskoj domeni, a da pri tome ne dolazi do međudjelovanja potkanala. [6], [7]

Radi svojih povoljnih karakteristika, OFDM je omogućio poboljšanje parametara digitalnih radio sustava, kao što je poboljšanje kvalitete pokrivanja mreže, velika spektralna

učinkovitost, otpornost na interferenciju između korisnog signala i ometajućih signala susjednih odašiljača, otpornost na frekvencijski selektivni feding. Zbog navedenih prednosti OFDM je pronašao široku upotrebu u modernim komunikacijskim sustavima gdje se koristi u LTE i WiMAX širokopojasnim pristupnim tehnologijama kao i u DVB sustavima za emitiranje digitalnog televizijskog signala. [6]

3.1. Obilježja OFDM signala

Već je navedeno kako je uvjet ortogonalnosti podnosioca jedan od obilježja OFDM-a i sada će biti prikazano što to znači. Uvjet ortogonalnosti nam prikazuje da su dvije kosinusoide različitih frekvencija i slučajnog razmaka u fazi koje traju vrijeme T ortogonalne ako vrijedi: [8]

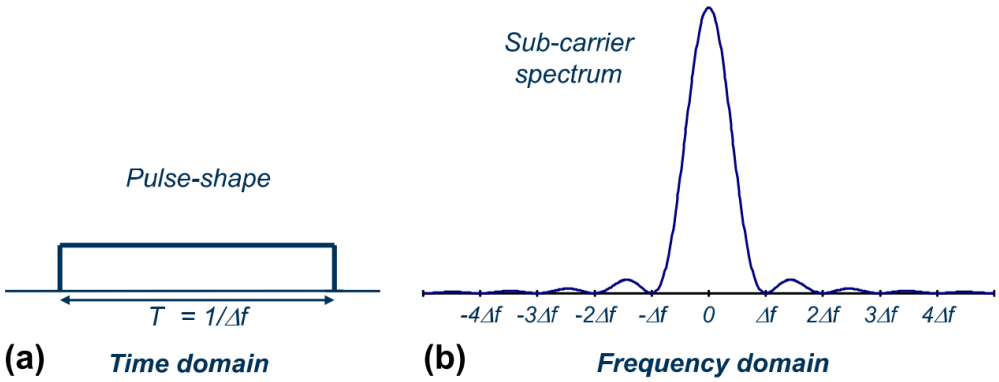
$$\int_0^T \cos(2\pi f_1 \cdot t) \cdot \cos(2\pi f_2 \cdot t)\, dt = 0 \tag{2}$$

Uvjet će biti ispunjen ako je frekvencijski razmak dva podnosioca na intervalu Δf odnosno ako se razlikuju za jednu periodu, što možemo prikazati izrazom: [8]

$$\Delta f = \frac{1}{T_0} \tag{3}$$

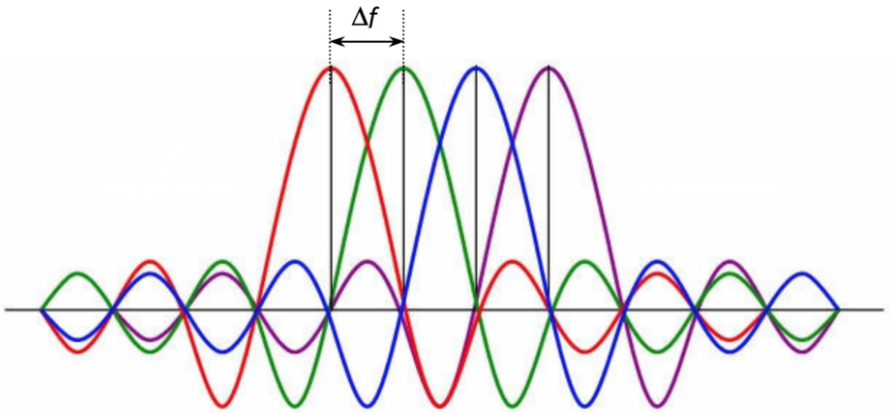
Frekvencijski podnosioci u OFDM sustavima se odabiru kao višekratnici temeljne frekvencije. Ovo svojstvo se koristi za dobivanje OFDM signala pomoću ubrzanog algoritma za dobivanje inverzne diskretne Fourierove transformacije signala (engl. *Inverse Discrete Fourier Transformation* - IDFT), što će biti prikazano kasnije u ovom poglavlju. [8]

Kako bi se podaci mogli prenositi potkanalima prvo ih potrebno modulirati. Za modulacijske postupke najčešće se koriste modulacijski postupci QPSK, 16-QAM ili 64-QAM jer radi svojih linearnih osobina imaju visoku spektralnu učinkovitost. Budući da su u PSK i QAM postupcima modulacijski signali pravokutnog oblika ovojnica spektra takvih signala ima sinusoidalan oblik funkcije što je vidljivo sa slike 7. [6]



Slika 7. Prikaz oblika impulsa podnosioca a) i spektra b) za osnovni OFDM prijenos [6]

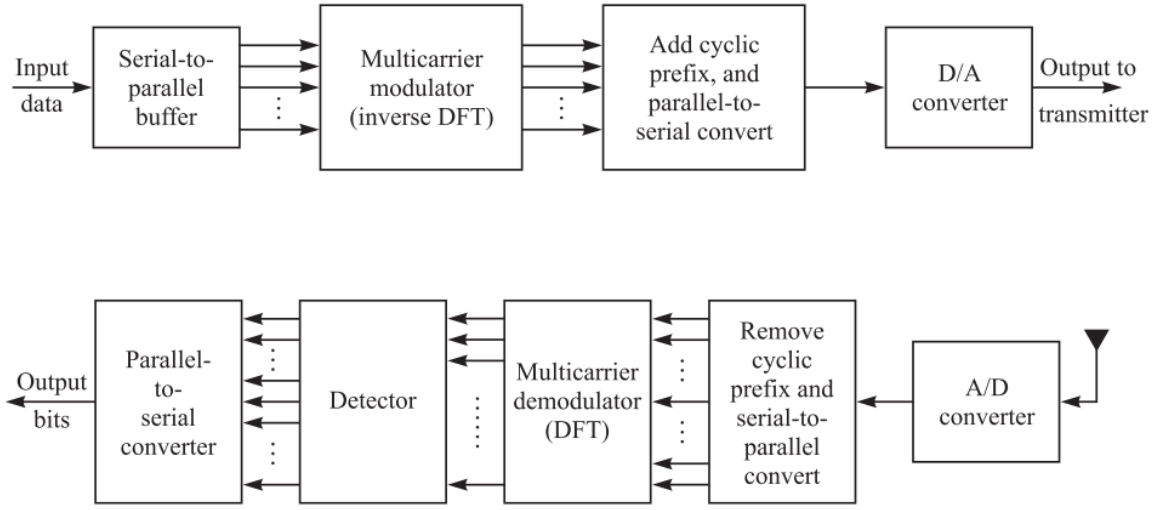
Nultočke ovojnice spektra, vidljive na slici 7 b), nalaze se na višekratnicima od Δf_0 gdje je T_0 trajanje simbola moduliranog signala u potkanalu te je jednako intervalu ortogonalnosti. Kako bi se izbjegla interferencija između podnosioca (engl. *Inter Carrier Interfernce* – ICI) svaki od podnosioca dolazi u nultočku ostalih moduliranih podnosioca što je vidljivo na slici 8. [9]



Slika 8. Prikaz OFDM podnosioca [9]

Prilikom generiranja OFDM signala prvo je potrebno informaciju modulirati PSK ili QAM postupcima. Modulirani kompleksni signal predstavlja amplitudu i fazu odgovarajućeg sinusnog podnosioca. Dobiveni signal se nakon modulacije prosljeđuje IDFT sklopu koji veličine u području frekvencija transformira u veličine u vremenskom području. Inverznom diskretnom Fourierovom transformacijom stvaraju niz diskretnih uzoraka signala koje možemo promatrati kao jedan okvir podataka, odnosno OFDM simbol. Okviru se dodaje

zaštitni prefiks kako bi se smanjio utjecaj višestaznog širenja. Da bi se dobio kontinuirani signal, okvir podataka prolazi kroz D/A (engl. *digital-to-analog converter*) pretvarač te se stvara OFDM signal koji se zatim podiže na frekvenciju signala nosioca kako bi bio odaslan na odredište. Za regeneraciju polaznih vrijednosti moduliranog signala na odredištu se koriste postupci diskretne Fourierove transformacije kako je prikazano na slici 9. [8]



Slika 9. Blok shema OFDM sustava [2]

Bitno je napomenuti kako korištenje brze Fourierove transformacije nije jedini način za stvaranje OFDM okvira, ali trenutno je to najučinkovitija metoda te je iz toga razloga najčešće korištena. [6]

3.2. OFDM parametri

Ako se OFDM koristi kao shema prijenosa podataka u mobilnim komunikacijskim sustavima potrebno je razmotriti sljedeće parametre: [6]

- Razmak podnosioca Δf
- Broj podnosioca N_c - ovaj parametar u kombinaciji sa razmakom podnosica u konačnici određuje ukupnu širinu spektra OFDM signala
- Duljina cikličkog prefiksa T_{CP} – zaštitni interval koji određuje ukupno trajanje simbola.

3.2.1. Razmak podnosioca

Unutar svakog vremenskog segmenta, nazvanog OFDM simbol, ubacuje se jedan podnosioc u svaki frekvencijski podpojas. Kada se određuje razmak OFDM podnosioca bitno je paziti na dva faktora. Razmak podnosioca trebao bi biti što manji kako bi trajanje simbola T moglo biti što veće. Također je bitno paziti da razmak podnosioca ne bude premalen iz razloga što premali razmak može rezultirati gubitkom ortogonalnosti podnosioca. Kao posljedica gubitka ortognalnosti dolazi do interferencije susjednih podnosioca. [6]

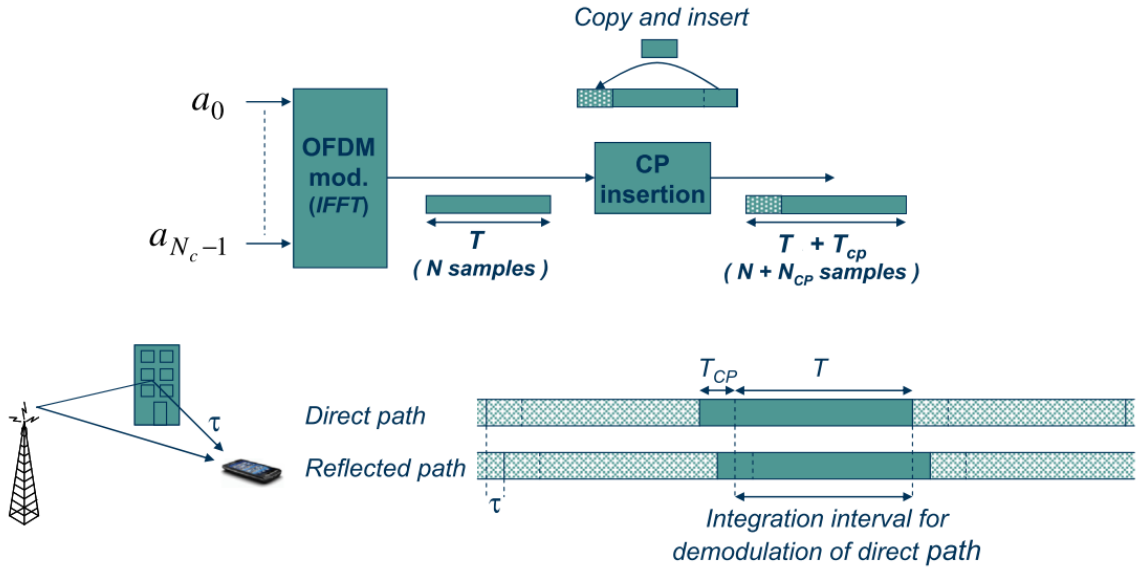
3.2.2. Broj podnosioca

Nakon što se odredi razmak podnosioca na temelju okoline prostiranja signala, očekivanog utjecaja Dopplerovog širenja, vremenske disperzije i ostalih negativnih utjecaja, može se odrediti broj podnosioca na temelju raspoloživog spektra i prihvatljive emisije izvan pojasa (engl. *out-of-band emissions*).

Osnovna pojasna širina OFDM signala iznos $BW_{OFDM} = N_c \cdot \Delta f$, što predstavlja umnožak broja podnosioca i njihovog međusobnog razmaka. Za zaštitni pojas OFDM signala u pravilu se uzima 10% spektra signala nosioca. Ako pretpostavimo da je razmak podnosioca 15 kHz kako je određeno za LTE tehnologiju, a da pojasna širina signala iznosi 5 MHz uvrštavanjem u gornji izraz dobiti ćemo vrijednost da je za prijenos potrebno oko 300 podnosioca. [6]

3.2.3. Ciklički prefiks

Kako kanal za prijenos signala nije idealan te je sklon utjecaju šuma poput vremenske disperzije signala i višestaznog širenja, uvodi se zaštitni interval ili ciklički prefiks, kako bi se smanjio utjecaj tih refleksija. Uvođenjem zaštitnog intervala povećava redundantnost. Kako vidimo na slici 10 zaštitni interval T_{CP} predstavlja cikličko proširenje signala T preslikom zadnjeg dijela OFDM simbola. Time smo produljili ukupno vrijeme trajanja simbola T_S za vrijeme trajanja zaštitnog intervala što možemo zapisati: $T_S = T + T_{CP}$. [6], [8]



Slika 10. Prikaz umetanja zaštitnog intervala u OFDM simbolu [6]

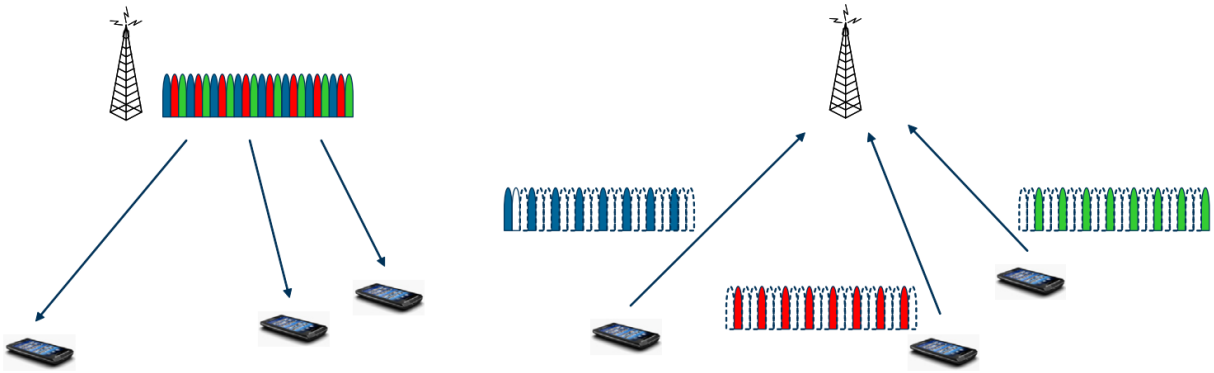
Ako zaštitni interval u sebi nema signala, prilikom kašnjenja signala demodulator neće moći registrirati ortogonalnost između podnosioca jer u vremenu analiziranja FFT podnosioci se ne razlikuju za iznos cijelog perioda. Zbog toga dolazi do interferencije između podnosioca. Uvođenjem zaštitnog intervala replikom zadnjeg dijela OFDM simbola smanjuje se utjecaj interferencije podnosioca. [6]

Za ispravnu demodulaciju signala prijemnici moraju biti u stanju zaprimiti signal tijekom korisnog perioda OFDM simbola, ne tijekom zaštitnog intervala. Vremenski prostor treba biti točno postavljen u odnosu na trenutak gdje se pojavljuje svaki emitirani OFDM simbol. Kako bi to bilo moguće koriste se takozvani pilot podnosioci koji su pravilno raspoređeni u prijenosnom kanalu kao sinkronizacijski markeri. Uz pomoć pilotskih kanala se prati promjene amplitude i faze unutar cijelog OFDM-bursta. Jedna od primjena pilotskih kanala je u DVB sustavima. [7]

3.3. OFDMA

Tehnika višestrukog pristupa s ortogonalnom raspodjelom podnosioca (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* – OFDMA) je tehnika koja omogućava prijenos informacija od više terminalnih uređaja prema baznoj stanici i obrnuto koristeći OFDM

modulacijski postupak. Svakom korisniku se dodjeljuje skupina podnosioca koje ekskluzivno koristi tijekom cijelog vremena trajanja sesije kako je prikazano na slici 11. [2]



Slika 11. Prikaz prijenosa tehnikom OFDMA pristupa [6]

Kada se prenosi informacija iz višestrukih izvora vrlo je bitno da se pristigli signali približno usklađuju na baznoj stanici. Odnosno bitno je da prijenosi s različitih terminalnih uređaja stignu do bazne stanice s manjim vremenskim razmakom od duljine cikličkog prefiksa, zaštitnog intervala kako bi se očuvala otrogonalnost podnositelja i time izbjegla interferencija podnosioca. Zbog razlike u udaljenosti između bazne stanice i različitih terminalnih uređaja, dolazi do pomaka u vremenu propagacije signala koji mogu nadmašiti duljinu cikličkog prefiksa. Iz toga razloga je potrebno kontrolirati vrijeme odašiljanja signala na strani primatelja. Budući da se terminali kreću unutar ćelije proces kontrole vremena odašiljanja vala mora biti aktivan proces neprekidno prilagođavajući točan vremenski prijenos svakog terminala. [6]

Prednosti OFDMA tehnike prijenosa su efikasno korištenje spektra radi mogućnosti preklapanja pojaseva podnosioca, veća otpornost na frekvencijski selektivni feding podjelom kanala na više uskopojasnih potkanala sa ravnijom frekvencijskom karakteristikom kao i mogućnost korištenja u NLS sustavima (engl. *Non Line-of-Sight*) koje susrećemo u urbanim sredinama. [8]

Nedostatak OFDMA je pojava visokog vršno-srednjeg omjera snage (engl. *Peak-to-Avarage Power Ratio* – PAPR) signala prilikom njegov modulacije. U signalu se pojavljuju dijelovi s velikom vršnom snagom, odnosno velikim varijacijama amplitude, prilikom konstruktivnog dodavanja signala podnosioca u fazu prijenosnog signala. Takvi signali mogu rezultirati rezanjem napona signala u digitalno-analognom pretvaraču prilikom sintetiziranja

digitalnog signala podnosioca. Također može doći do zasićenja u pojačalu snage, a kao posljedica javlja se intermodulacijska distorzija. [2], [6]

PAPR omjer možemo izraziti na sljedeći način:

$$PAPR = \frac{|X_{(t)}|^2}{P_{avg}}, \tag{3}$$

gdje $|X_t|^2$ predstavlja omjer vršne snage podnosioca i njegove srednje snage u pojasu jednog OFDM simbola, a P_{avg} je vrijednost prosječne snage signala. [2]

Razvijene su razne metode u želji smanjenja PAPR omjera. Najjednostavnija metoda je umetanje različitih pomaka faza za svaki podnosioc. Fazne smjene mogu se odabrati pseudoslučajno ili uz pomoć nekog algoritma. Još jedan od nedostatak je pojava takozvanog „*offset-a*“ signala. [2]

Ova pojava se javlja kao posljedica neusklađenosti frekvencija prijenosnog signala u oscilatiroma na odašiljačkoj i prijemnoj strani sustava te radi pojave Dopplerovog efekta dok se prijemnici pomiču unutar ćelija. Kako bi se smanjio utjecaj ovog nedostatka uvodi se ciklički prefiks. [8]

4. Metode višestrukog pristupa

Glavni problem kod dizajniranja mobilnih mreža je činjenica da je radio-frekvencijski spektar ograničen prirodni resurs. Za potrebe mobilnih radio sustava dodjeljuje se određeni frekvencijski opseg koji je potrebno što je više moguće racionalno iskoristiti. Kako je u današnje vrijeme bežična komunikacija sve više prisutna i dalje se širi, nastaje potreba za bežičnim sustavima sve većeg kapaciteta. Pošto se s ograničenim spektrom želi postići kvalitetan prijenos, s visokim QoS-om (engl. *Quality of Service* - QoS), prema što većem broju korisnika ideja je višestruko iskorištavanje raspoloživog spektra pomoću metoda višestrukog pristupa, multipleksiranja. Multipleksiranje je način kod kojega više analognih ili slijed digitalnih podataka kombinira u jedan signal korištenjem zajedničkog prijenosnog medija. [10], [11]

Metode višestrukog pristupa omogućuju korisnicima da istovremeno koriste isti frekvencijski spektar. Tri najčešće metode višestrukog pristupa su: [10]

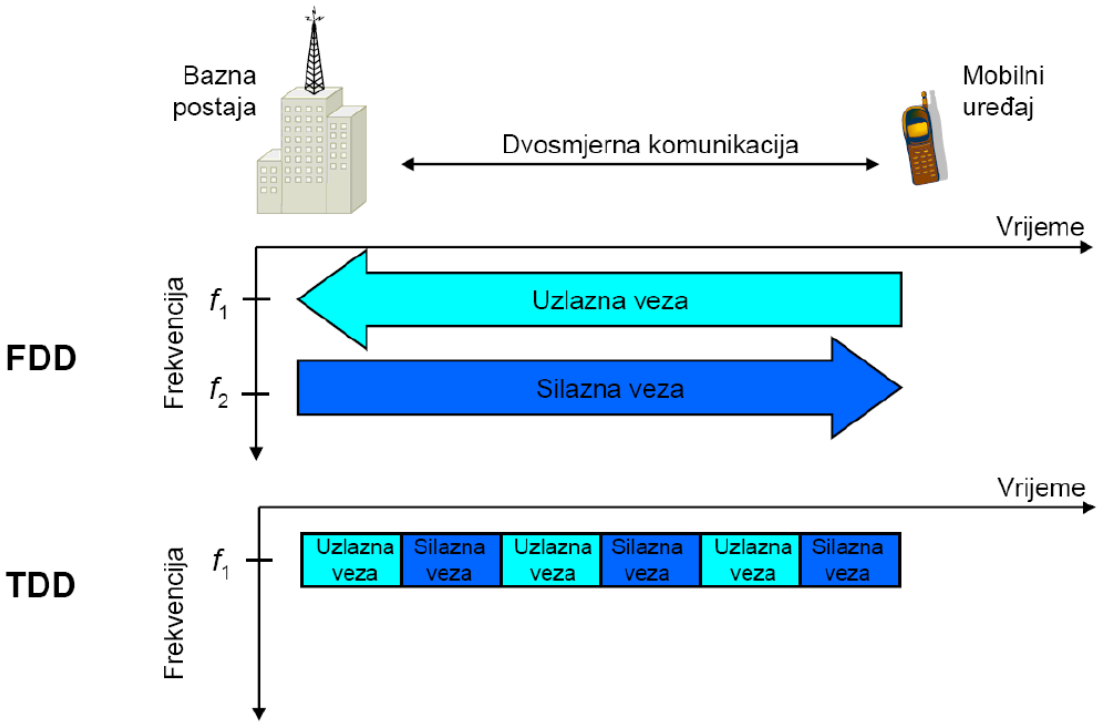
1. Frekvencijski multipleks (engl. *Frequency Division Multiple Access* – FDMA)
2. Vremenski multipleks (engl. *Time Division Multiple Access* – TDMA)
3. Kodni multipleks (engl. *Code Division Multiple Access* – CDMA).

U novije vrijeme uz tri osnovne tehnike višestrukog pristupa sve se više istražuju i implementiraju tehnike prijenosa posredstvom višestrukih podnosioca (engl. *Multicarrier* - MC). Kombinacija MC modulacije i CDMA tehnike prijenosa se koriste prilikom realizacije višestrukog pristupa kod širokopojasnih bežičnih mreža. [10]

Također je bitno osigurati korisnicama razmjenu informacija istovremeno u oba smjera, a takav oblik komunikacije se naziva dupleks. Kako bi to bilo moguće, u kombinaciji s navedenim metodama višestrukog pristupa, koriste se frekvencijski dupleks (engl. *Frequency Division Duplex* – FDD) i vremenski dupleks (engl. *Time Division Duplex* – TDD) pa tako postoje FDMA/FDD, TDMA/FDD, TDMA/TDD, CDMA/FDD, CDMA/TDD i druge tehnike prijenosa. [10]

Kod FDD-a odlazna, ulazna veza (engl. *uplink*) je na nižim frekvencijama u odnosu na dolaznu, silaznu vezu (engl. *downlink*) zbog manjih gušenja pri propagaciji signala. Odlazna veza služi za odašiljanje signala od mobilnog uređaja prema baznoj stanici dok dolazna služi

za prijem signala s bazne stanice. Između veza mora postojati zaštitni pojas (engl. *guard band*) kako ne bi došlo do interferencije signala. Kako se za predaju i prijem signala koristi ista antena neophodno je koristiti metodu dupleksiranja za njihovo odvajanje. [13]

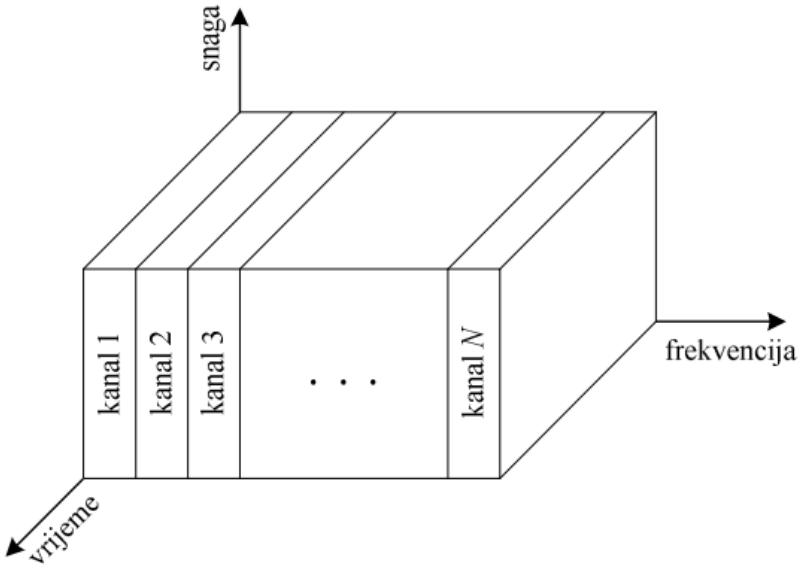


Slika 12. Koncept frekvencijskog i vremenskog dupleksa [13]

Komunikacijski sustavi koji rade na principu TDD-a razdvajaju odlazne i dolazne kanale u vremenskoj domeni na način da se ista frekvencija naizmjence koristi kratko vrijeme za slanje podataka od mobilnog uređaja prema baznoj stanici i obrnuto, što je vidljivo sa slike 12. Ako su vremenski kanali razdvojeni dovoljno mali period, manje od 300 milisekundi, tada će ljudsko uho imati osjećaj da se slanje i prijem podataka odvija simultano, istovremeno. Posljedica ovakvog načina rada je povećanje kašnjenja unutar komunikacijskog sustava jer primopredajnik u jednom trenutku može raditi ili u predajnom ili u prijemnom modu. TDD tehnika omogućuje prijenos na istoj nosećoj frekvenciji tako da zaštitni pojas između dolaznog i odlaznog kanala nije potreban. [10], [11]

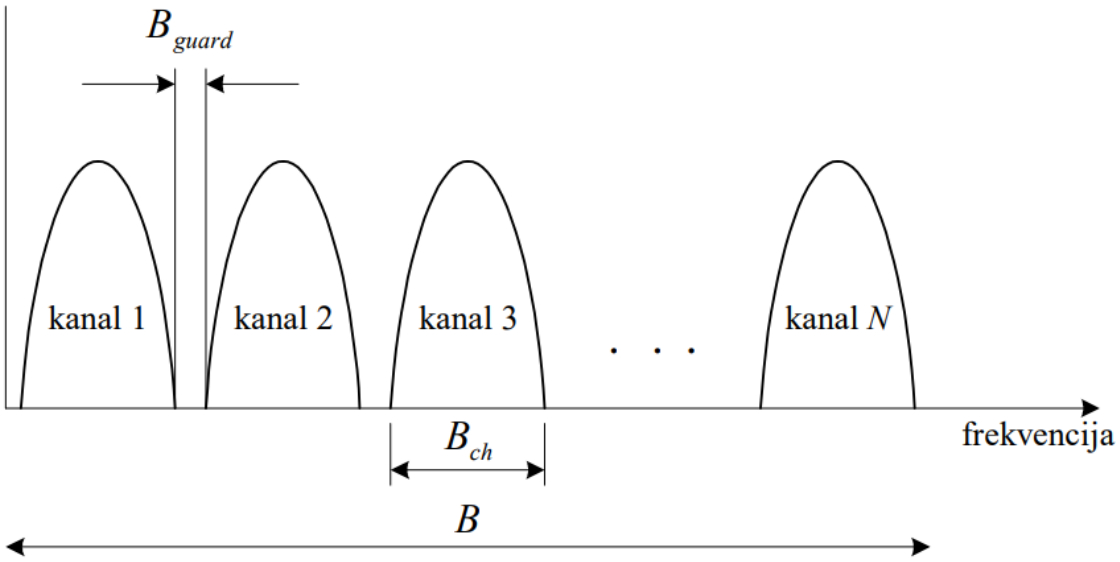
4.1. Višestruki pristup s frekvencijskom raspodjelom kanala

Tehnika višestrukog pristupa FDMA imala je najveći značaj kod prijenosa signala u analognim mobilnim, ćelijskim, mrežama prve generacije. Svakom korisniku dodijeljen je par frekvencija za odvajanje odlaznog i dolaznog kanala u svrhu neprestane istovremene komunikacije u dva smjera. Frekvencijski spektar kod ove pristupne tehnike prijenosa jednako je podijeljen na pojedine frekvencijske kanale, a svaki razgovor, odnosno sesija, odvija se na različitoj frekvenciji, što je vidljivo na 13. slici. [10]



Slika 13. Način raspodjele korisnika FDMA tehnikom [10]

FDMA/FDD radi na način da raspoloživi frekvencijski spektar širine B koji je određen za korištenje kod određenog mobilnog sustava, NMT, AMPS, TACS i dr., dijeli se na N kanala širine B_{ch} koji se ne preklapaju. Kako bi se reducirala interferencija susjednih kanala ostavlja se zaštitni pojas širine B_{guard}, što je vidljivo na slici 14. [10]



Slika 14. Princip raspodjele kanala [10]

Korisnik generira zahtjev za pozivom prema baznoj stanici tada ona dodjeljuje korisniku slobodni odlazni i dolazni kanal, koji korisnik ekskluzivno zadržava tijekom cijelog vremena trajanja sesije razgovora, tako da taj kanal ne može koristiti niti jedan drugi korisnik, u istoj ili susjednoj ćeliji, sve dok postojeći korisnik ne napravi zahtjev za raskidanjem veze. U slučaju da korisnik prijelazi iz jedne ćelije u drugu dolazi preuzimanja poziva (engl. *handover*) na način da se korisniku u novoj ćeliji dodjeljuje slobodan kanal. [11]

Najpoznatiji i najkorišteniji analogni mobilni sustavi prve generaciju su: [13]

- NMT – *Nordic Mobile Telephony* razvijen u ranim '80-im, korišten na području Europe i Azije
- AMPS – *American Mobile Phone System* razvijen u '80-im, korišten na području SAD-a
- TACS – *Total Access Communications System* razvijen početkom '80-ih u SAD-u, korišten na području Europe (Irska, Ujedinjeno Kraljevestvo i Italija) i Azije (Japan, pod pseudonimom JTAC).

Tablica 2. Usporedba standarda mobilnih mreža prve generacije

STANDARDI	NMT	AMPS	TACS
Frekvencijsko područje [MHz] **Silazna veza** **Uzlazna veza**	 453 – 457,5 463 – 467,5	 825 – 845 870 - 870	 890 – 915 935 - 960
Broj radiokanala	180	666	1000
Širina radiokanala [kHz]	25	30	25
Dupleksni razmak [MHz]	10	45	45
Način pristupa	FDMA	FDMA	FDMA
Radijus ćelije [km]	1,8 – 40	2 – 20	2 – 20

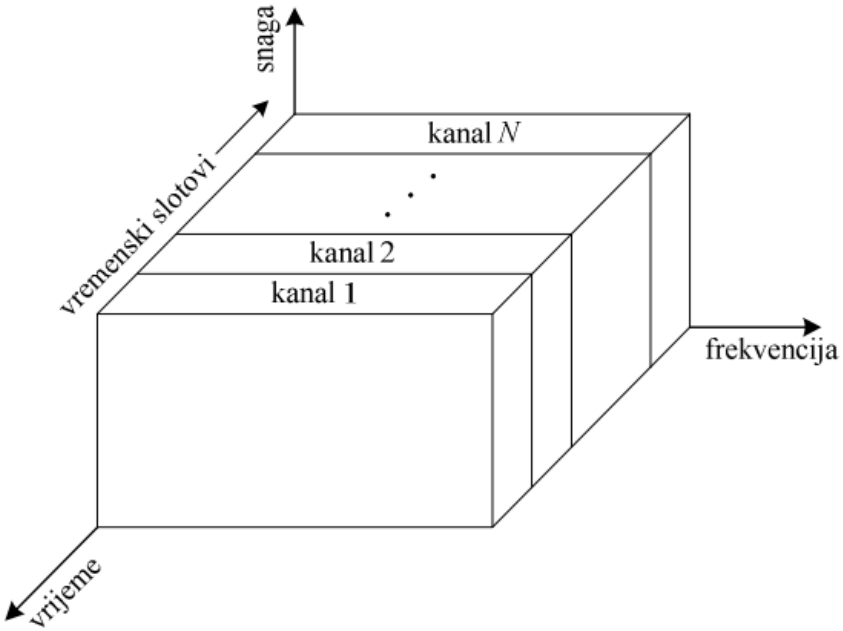
Izvor: [10]

Prednosti tehnike FDMA su hardverska jednostavnost sustava jer se za odvajanje korisnika koriste jednostavni filtri za propuštanje određenih frekvencijskih opsega. Također nema potrebe za sinkronizacijom između bazne stanice i mobilnog terminalnog uređaja iz razloga što kada se korisniku dodjeli kanal on ga koristi kontinuirano i ekskluzivno do prekida.

Uz navedene prednosti, FDMA ima i nedostatke, a jedan od glavnih problema je preslušavanje koje se javlja kao posljedica interferencije susjednih kanala koje je uzrokovano nelinearnošću pojačivača snage na antenama. Propusni filtri koji omogućuju jednostavan hardver moraju imat vrhunske karakteristike gušenja za dobru kvalitetu veze, dakle strme rubove u amplitudno-frekvencijskoj karakteristici. FDMA također neracionalno raspolaže resursima iz razloga što se ne dodijeljeni kanali ne mogu iskoristiti za povećanje kapaciteta na način da se korisniku iz susjedne ćelije dodjeli slobodan kanal ako su trenutno zauzeti svu kanali u ćeliji gdje se korisnik nalazi. Iz toga razloga dio spektra ostaje neiskorišten. Ova tehnika ne omogućuje prijenos digitalnih signala različitim brzinama i nije ju moguće iskoristiti za prijenos digitaliziranog govora i podataka. [10], [11]

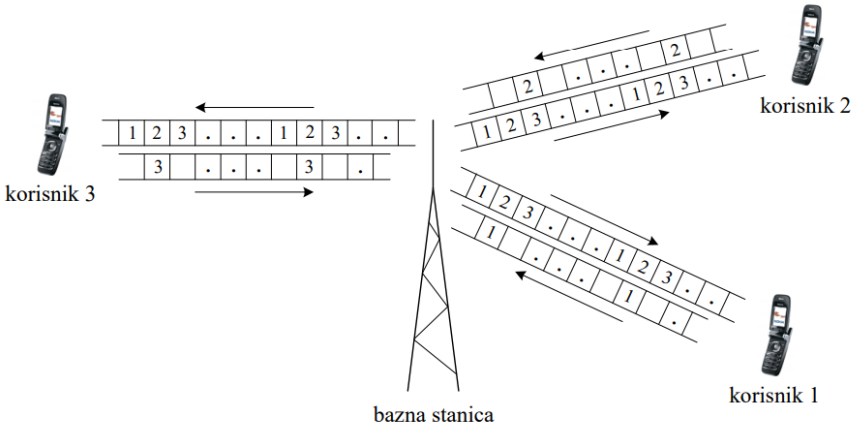
4.2. Višestruki pristup s vremenskom raspodjelom kanala

Tehnika višestrukog pristupa TDMA omogućava korisnicima pristup cijelom frekvencijskom pojasu koji se dodjeljuje na vremenskoj podjeli resursa što je prikazano na slici 15.



Slika 15. Način raspodjele korisnika TDMA tehnikom [10]

Takav kratki vremenski period koji je dan korisniku na korištenje naziva se vremenski odsječak (engl. *slot*). Korisnici pristupaju frekvencijskom spektru periodično odnosno na rotirajući način koji omogućuje kontinuiran prijenos podatkovnih i govornih informacija, ali pod uvjetom da je vrijeme između nadolazećih vremenskih odsječaka dovoljno malo kako korisnik ne bi osjetio prekide u vezi. Princip rada radio sustava sa TDMA tehnikom je prikazan na slici 8.



Slika 16. Princip rada primjenom tehnike TDMA [10]

Na slici 16 također je vidljivo da pri komunikaciji bazna stanica prima podatke od pojedinog korisnika, na uzlaznoj vezi, samo za vrijeme trajanja vremenskog odsječka koji su tom korisniku dodijeljeni. Prilikom odašiljanja signala, na silaznoj vezi, bazna stanica emitira jednak signal prema svim mobilnim terminalima, a svaki uređaj prima signal odnosno informacije iz odsječaka koji su njemu namijenjeni. Kako ne bi došlo do interferencije među korisnicima bitno je održavati sinkronizaciju između terminalnih uređaja i bazne stanice kao i postavljanje zaštitnih intervala između odsječaka. [10]

Odlazni i dolazni promet može se razdvojiti u vremenskoj, tehnikom TDD, ili frekvencijskoj, tehnikom FDD, domeni. Ako se koristi kombinacija TDMA/TDD onda se jedna polovica odsječaka u okviru dijeli na odlazne kanale, a druga polovica na dolazne kanale. U slučaju da se koristi TDMA/FDD tada se odlazni i dolazni kanali razdvajaju frekvencijski. Dobro je napomenuti kako FDD tehnika zahtijeva manji propusni pojas i manje preciznu sinkronizaciju prijenosa za minimiziranje interferencije, dok TDD zahtijeva jednostavniju opremu za dupleksiranje signala. [10], [11]

U praksi se tehnika TDMA kombinira s tehnikom FDMA i FDD dupleksnim razdvajanjem. Funkcionira na način da se raspoloživi spektar podjeli na više frekvencijskih kanala, a zatim se pojedini frekvencijski kanal dijeli u manje vremenske odsječke koji se dodjeljuju korisnicima. U susjednim ćelijama se koriste različite noseće frekvencije kako bi se smanjio utjecaj istokanalne interferencije. Ista frekvencija se može upotrijebiti u dovoljno udaljenim ćelijama, a na to utječu još neki faktori poput snage rada promatrane antene, visina na kojoj je postavljana antena, geografskim konturama prostora. [11]

Jedan od raširenijih sustava koji radi na tome principu je GSM 900. Radi u ograničenom području od 890 MHz do 915 MHz za silaznu vezu i 935 MHz do 960 MHz za uzlaznu vezu. Koristi se frekvencijski dupleksni razmak od 45 MHz (FDD). Razdvajanje frekvencijskih nositelja u GSM-u je 200 KHz, a pojedini kanal se dijeli u 8 vremenskih odsječaka (TDMA). Ukupno postoji 124 radiokanala koji kada se pomnože s 8 odsječaka stvaraju 992 govorna kanala. [12]

Tablica 3. Usporedba standarda mobilnih mreža druge generacije

STANDARDI	**GSM 900**	**D-AMPS**	**PDC**
Frekvencijsko područje [MHz] **Silazna veza** **Uzlazna veza**	 890 – 915 935 – 960	 824 – 849 869 – 894	810 – 826; 1429 – 1441; 1453 – 1465 → Uzlazna 940 – 956; 1477 – 1489; 1501 – 1513 → Silazna
Način pristupa	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA	TDMA/FDMA
Tip dupleksa	FDD	FDD	FDD
Broj korisnika po kanalu	8	3	3
Broj radiokanala	124	832	640; 480; 480
Širina radiokanala [kHz]	200	30	25
Dupleksni razmak [MHz]	45	45	130; 48; 48

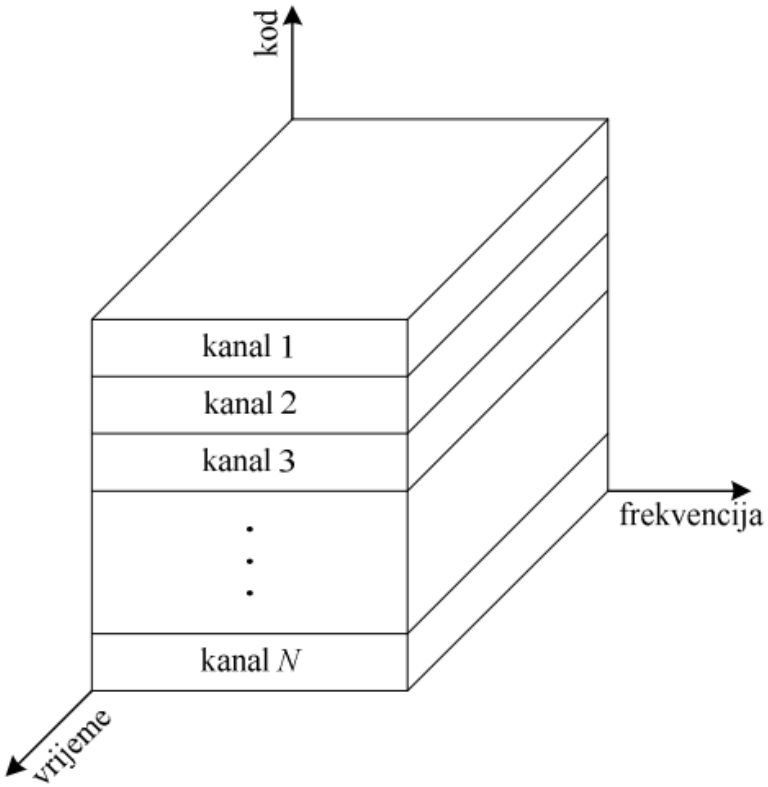
Izvor: [10]

Prednosti tehnike TDMA proizlazi iz stoga što postiže veću efikasnost korištenja spektra u odnosu na FDMA, jednostavniji proces prekapčanja (engl. *handover*), korištenje hijerarhijskih struktura ćelija, komunikacija se odvija u vremenskim odsječcima pa stoga nije potreban duplesker na strani prijemnika. Naravno, uz navedeno TDMA ima nedostatke poput zahtjeva za preciznom sinkronizacijom vremenskih odsječaka koji se razmjenjuju u komunikaciji, vrlo složen hardver koji se nalazi u baznoj stanici i terminalnom uređaju zbog procesa podešavanja frekvencijskog kanala, složenost planiranja mreže. [10]

4.3. Višestruki pristup s kodnom raspodjelom kanala

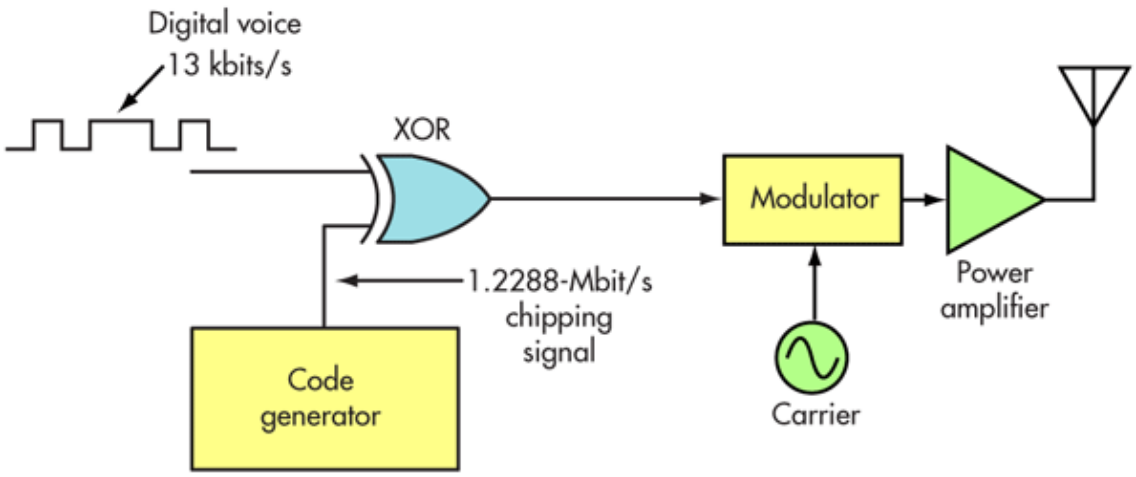
Kod CDMA raspodjele kanala svi korisnici pristupaju cijelom raspoloživom spektru i koriste ga kontinuirano u vremenu. Korisnici su međusobno razdvojeni pseudoslučajnim kodovima kako bi se izbjegla interferencija signala što je vidljivo sa slike 17. [14]

CDMA pripada u tehniku prijenosa s proširenim spektrom (engl. *Spread Spectrum Multiple Access*). Prijenos u proširenom spektru može se realizirati tehnikom izravnog proširenja spektra (engl. *Direct Sequence Spread Spectrum* - DSSS) ili tehnikom skokovite promjene nosive frekvencije (engl. *Frequency Hopping Spread Spectrum* – FHSS). [12]



Slika 17. Način raspodjele korisnika CDMA tehnikom [10]

Tehnika DSSS proširuje digitalizirani ulazni signal, informaciju, u predajniku kombinirajući ga sa pseudo-slučajnim kodom generiranim u generatoru koda (engl. *spreading process*). Najmanja jedinica informacije unutar koda naziva se *chip*. Što je veći intenzitet generiranja *chip*-ova u jedinici vremena (engl. *chip rate*) širi je i frekvencijski pojas emitiranog signala. [14]



Slika 18. Postupak proširenja spektra kod CDMA IS-95 standarda [14]

Kodni niz koji generira pseudoslučajni generator dodjeljuje jedinstveni kod svakom kanalu odnosno korisniku. Taj kod širi dobivenu digitaliziranu informaciju, poput digitaliziranog glasa, na određenoj nosećoj frekvenciji. Dobiveni signal male je snage i sličan je šumu koji se može pojaviti u komunikacijskom kanalu. Više takvih malih signala mogu se prenositi jednim kanalom istovremeno. Na primjer ako koristimo 64 jedinstvena koda generirana pseudoslučajnim generatorom kojim proširujemo kanal noseće frekvencije 1,25 MHz, tada 64 korisnika mogu dijeliti taj isti kanal. Na terminalnom uređaju korisnika se prihvaća samo signal sa jedinstvenim kodom korisnika za koji se koristi filtar kako nepoželjni signali ne bi bili prihvaćeni. Zbog navedenog može se zaključiti kako je frekvencijsko planiranje i dizajniranje ćelija lakše pošto svi korisnici koriste istu noseću frekvenciju. [14]

Dobiveni kodni niz koji se generira za svakog korisnika je ortogonalan na kodove drugih korisnika. Na taj način se izbjegava interferencija signala drugih korisnika (engl. *Multi-User Interference* – MUI), pri čemu se signali ostalih korisnika se tretiraju kao šum. [10]

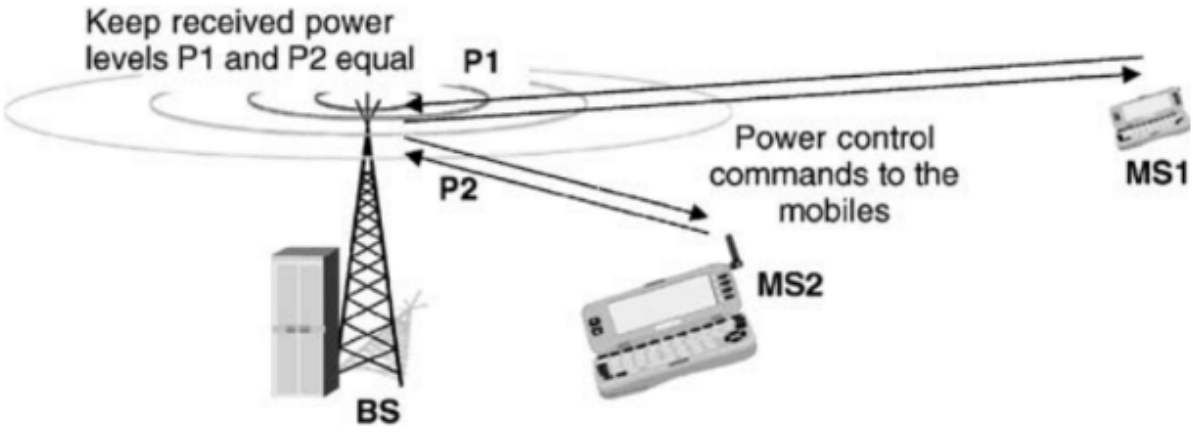
Tehnika prijenosa CDMA nema definiran ograničen broj korisnika, stoga može učinkovito raspolagati s neograničenom količinom korisnika. Bitno je naglasiti da se s povećanjem kapaciteta sustava povećava i mogućnost nastanka šuma u komunikacijskom sustavu. Stoga povećanjem broja korisnika linearno raste i razina šuma. Kako bi se osigurala što manja razina šuma terminalni uređaj komunicira s najbližom baznom stanicom kako bi se koristila

minimalna snaga za prijenos signala, a to doprinosi i manjoj potrošnji baterije. Iz tog razloga se kaže kako DSSS sustavi imaju meko ograničenje kapaciteta (engl. *soft capacity limit*) za razliku od sistema sa FDMA i TDMA pristupom koji imaju striktno ograničenje kapaciteta (engl. *hard capacity limit*). Zbog navedenog se može zaključiti kako je frekvencijsko planiranje i dizajniranje ćelija lakše pošto svi korisnici koriste istu noseću frekvenciju. [10]

Tehnologija koja je omogućila treću generaciju mobilnih mreža je širokopojasni pristup sa kodnom raspodjelom kanala (engl. *Wideband–Code Division Multiple Access* – WCDMA) nastao nadogradnjom GSM-a i IS-95. Posebnu ulogu imaju sustavi iz porodice standarda IMT-2000. U Europi je usvojen UMTS (engl. *Universal Mobile Telecommunications System*) koji se zasniva na WCDMA pristupu. [15]

WCDMA omogućuje veću brzinu prijenosa podataka, od 2 Mbit/s, uz efikasno korištenje raspoloživog spektra. Signal se generira slično kao i kod CDMA tehnike, ali prilikom generiranja koda se koristi veći broj chipova u jedinici vremena (engl. *chip rate*) od 3,84 Mbit/s što omogućava prijenos po većoj nosivoj frekvenciji iznosa 5 MHz. Pošto WCDMA podržava FDD i TDD način prijenosa nosivu frekvenciju možemo podijeliti u vremenskoj domeni kod TDD načina prijenosa ili koristiti dva frekvencijska kanala širine 5 MHz FDD načinom prijenosa. [14], [15]

Propagacija radiosignala u mobilnim mrežama je okarakterizirana refleksijama, defrakcijama i slabljenjem snage signala. Posljedica širenja signala kroz prirodne prepreke poput zgrada, drveća, itd. je „*multipath*“ propagacija ili višestazno širenje signala. Kako signal dolazi iz više smjerova, , njegova snaga slabi te dolazi do pojave brzog Rayleigh-ovog fedinga. Kako bi se izbjegla negativna posljedica pada snage signala i pojave brzog fedinga koristi se uska i brza kontrola snage signala bez koje bi jedan mobilni uređaj mogao blokirati signal cijele ćelije. Slika 19 prikazuje problem i rješenje u obliku kontrole snage transmisijom zatvorene petlje. [15]



Slika 19. Kontrola snage signala tehnikom zatvorene petlje u sustavu CDMA [15]

Za primjer ćemo uzeti da mobilni uređaji MS1 i MS2 rade na istoj nosećoj frekvenciji, ali imaju dodijeljen različiti ortogonalni kod. Može se dogoditi da se MS1 nalazi na rubu ćelije gdje mu je signal povremeno blokiran i gušenje je veće za 70 dB u odnosu na uređaj MS2 koji se nalazi bliže baznoj stanici. Kada ne bi postojala kontrola snage uređaja, u odlaznoj vezi MS2 bi mogao blokirati odlazeći signal MS1 kao i signale ostalih udaljenijih uređaja koji se nalaze u ćeliji, a to se naziva „*near-far*“ problem. [15]

„*Near-far*“ efekt se ograničava zatvorenom petljom kontrole snage, na uzlaznoj vezi, na način da bazna stanica obavlja česte procjene odnosa signala i šuma (engl. *Signal-to-Interference Ratio* – SIR) i uspoređuje ga sa dozvoljenim odnosom. Ako se izmjeri veći SIR od dopuštenoga tada će bazna stanica poslati signal mobilnim uređajima da smanje snagu signala kojega šalju, u slučaju da se izmjeri manji SIR tada će mobilni uređaji morati povećati snagu signala kojega odašilju. Ovu procjenu bazna stanica obavlja 1500 puta u sekundi (1,5 kHz) za svaki mobilni uređaj, što je brže od moguće pojave većih gubitaka signala pa čak i od brzog Rayleigh-ovog fedinga. Bitno je napomenuti kako ovo funkcionira za niže do srednje brzine prijenosa. [15]

Također se ova tehnika može primijeniti na silaznoj vezi, ali ne radi pojave „near-far“ efekta nego kako bi se mogao pojačati dolazni signal od strane mobilnih uređaja koji se nalaze na rubu ćelija, jer se time ublažava efekt među-ćelijske interferencije signala. Isto tako se koristi za poboljšanje signala koji je degradiran od brzog Rayleigh-ovog fedinga kada zakažu metode za ispravljanje grešaka. [15]

Glavne prednosti tehnike CDMA jesu: [10], [11]

- Jednostavnija alokacija frekvencija ćelijama
- *Soft capacity limit*
- Racionalno iskorištenje dostupnog spektra
- Efikasnost pri filtriranju pozadinske buke
- Minimiziranje prekida korištenjem *soft handoffa*
- Poboljšana kontrola snage signala.

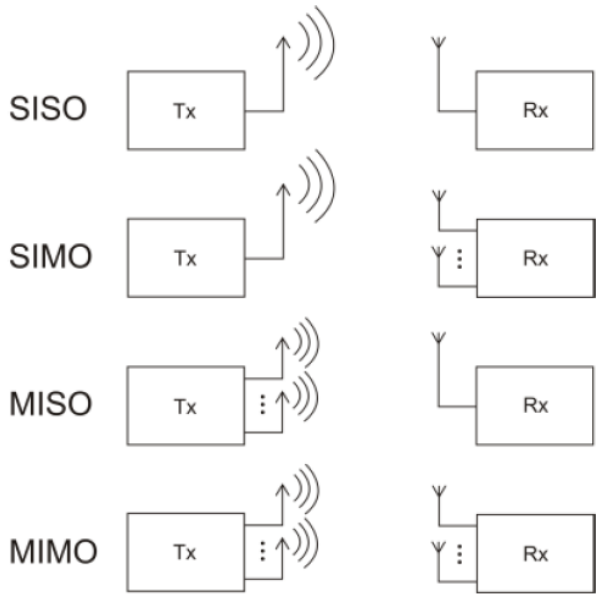
Nedostaci tehnike CDMA:

- Pojava „*near-far*“ problema
- Povećanje korisnika u sustava narušava kvalitetu usluge
- Relativno skupa oprema.

5. MIMO

Sustav MIMO (engl. *Multiple Input Multiple Output*) predstavlja digitalni komunikacijski sustav koji je osmišljen za prijenos informacija pomoću više antena na odašiljačkoj i prijemnoj strani komunikacijskog kanala. Današnji MIMO sustavi koriste niz inteligentnih antena i kao takvi ovise o njihovom razvoju. Ovi sustavi su antenska i komunikacijska osnova mobilnih sustava četvrte generacije kao i radijskih pristupnih mreža IEEE 802.11n standarda. Osmišljeni su kao potreba za rješavanjem problema nedovoljnog kapaciteta sustava, kao i potreba za većim brzinama prijenosa. Pošto sustav može imati više antena samo na odašiljačkoj ili prijemnoj strani na slici 20 su vidljive sve moguće izvedbe radiosustava: [12], [16]

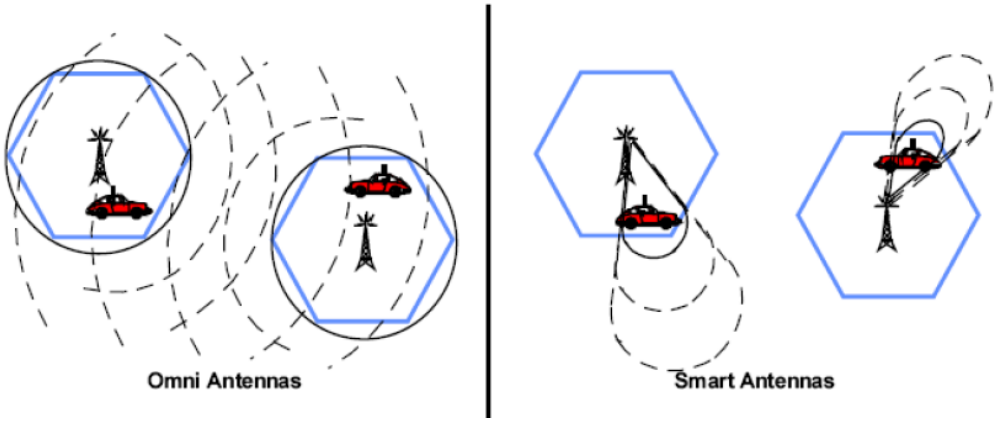
- SISO (engl. *Single Input Single Output*) – klasični sustavi koji se koriste jednom antenom na odašiljačkoj i prijemnoj strani sustava
- SIMO (engl. *Single Input Multiple Output*) – sustavi koji koriste jednu antenu na odašiljačkoj strani, a više antena na prijemnoj strani
- MISO (engl. *Multiple Input Single Output*) – sustav sa više antena na odašiljačkoj i jednom antenom na prijemnoj strani
- MIMO (engl. *Multiple Input Multiple Output*) – sustav sa više antena na odašiljačkoj i prijemnoj strani.



Slika 20. Osnovne izvedbe radio sustava [12]

5.1. Pametne antene

Pametne antene se koriste za upravljanje dijagramima zračenja kako bi se osiguralo povećanje kapaciteta ćelija. Kao osnova se uvijek koriste žične i mikrotrakaste antene. Kako se elektroničkim upravljanje mijenja dijagram zračenja dolazi do promjene u fazi uzbude antenskih elemenata antenskog sustava. To omogućuje izvedbu antenskih nizova sa više simultanih antena dijagrama zračenja i adaptivnih antenskih nizova. [12]



Slika 21. Usporedba klasičnog i prilagodljivog antenskog sustava [12]

Pametne antene omogućuju da se korisnici razdvoje u prostornoj domeni odnosno omogućuje prostornu tehniku višestrukog pristupa (engl. *Space Division Multiple Access* - SDMA) na kojoj se baziraju MIMO sustavi. Ova tehnika omogućava da više korisnika jedne bazne stanice mogu koristiti komunikacijski kanal iste frekvencije u istom vremenskom odsječku i s istim kodom proširenja signala. [16]

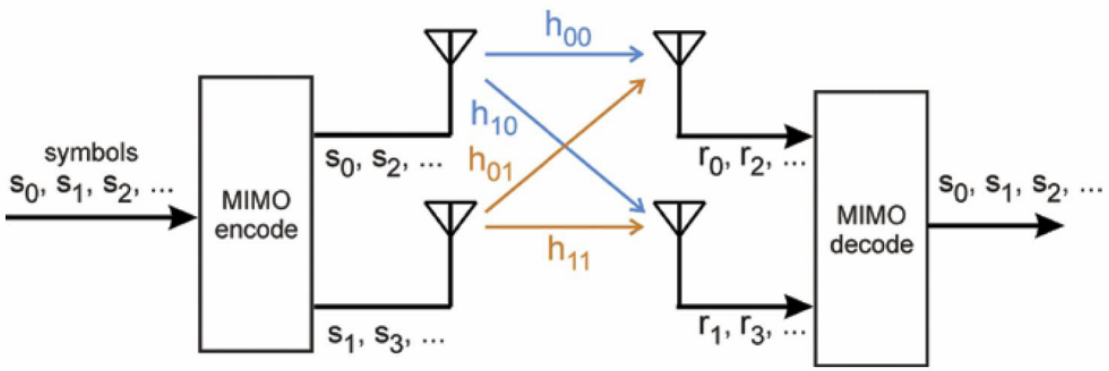
Bazne postaje najčešće koriste sektorske antene gdje svaka pokriva jedan sektor od 120°. Kako se elektromagnetska energija zrači konstantno po cijeloj površini sektora dolazi do nepotrebnoga trošenja energije i elektromagnetskog onečišćenja što je vidljivo na lijevoj strani slike 21. Upotrebom pametne antene snop zračenja se usmjerava prema korisniku, vidljivo na slici 21, kojemu je signal namijenjen čime se učinkovitije koristi snaga i radijski spektar smanjujući šum i razinu smetnje u sustavu. Takav način rada doprinosi povećanju dometa što povećava sigurnost sustava, ali i pridonosi uvođenju novih usluga. Sa strane korisnika pametne antene omogućuju da mobilni uređaj troši manju snagu prilikom komunikacije s baznom stanicom što produljuje trajanje baterije uređaja. Također korisnici su

izloženi manjem elektromagnetskom zračenju. Prednost pametnih antena se leži u njihovoj sposobnosti određivanja smjera dolaska signala. Smjer dolaska signala koriste za izračunavanje vektora kojim se određuje smjer i oblik glavnog snopa zračenja koji će biti odaslan prema pokretnom terminalnom uređaju. [16]

5.2. Princip rada sustava MIMO

Klasični radijski sustavi ostvaruju komunikaciju putem više kanala koji rade na različitim frekvencijama. Kod sustava MIMO je uobičajeno da se u jednom kanalu nalazi više veza koje rade na istoj frekvenciji dok se komunikacija odvija preko prostorno razmaknutih antena. Naravno postoji razlika između koncepta MIMO i koncepta prostornog diverzitija. Iako prostorni diverziti također koristi prostorno pomaknute antene, sustav MIMO preko različitih parova antena prijenosi različite informacije dok se kod prostornog diverzitija preko tih parova antena prenosi ista informacija.

Na slici 22 vidimo princip rada sustava MIMO. Prva komponenta je koder, svrha mu na posložiti digitalne višestruke tokove na više manjih signala koji će biti preneseni preko posebnog para antena. Najjednostavniji primjer kada koder pošalje svaki tok podataka na jednu antenu, naravno to je jedno moguće kada imamo jednak broj tokova podatak koje želimo odaslati i broj antena. Na prijemnoj strani sustava vidimo dekoder. Njegova zadaća je zaprimljene signale postupcima digitalne obrade signala obnovi kako bi se dobio najbolji mogući prijemni signal. [12], [13]



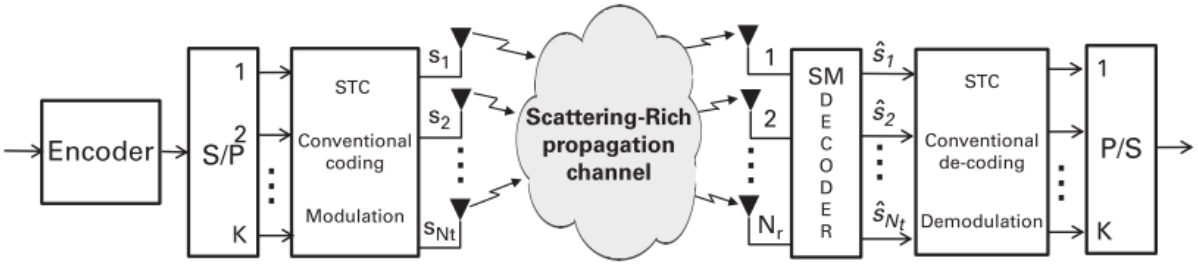
Slika 22. Princip rada sustava MIMO [12]

MIMO se zasniva na načelu prostorno vremenske obrade signala što poboljšava obilježja radijskog sustava po dvjema osnovama, a to su prostorno multipleksiranje i deverziti postupak koji će biti ukratko objašnjeni u daljnjem tekstu. [12]

5.2.1. Prostorno multipleksiranje

Prostorno multipleksiranje (engl. *spatial multiplexing* – SM) je moguće zbog propagacije koja se događa u višesmjernom (engl. *multipath*) komunikacijskom kanalu. U okruženju gdje se događa višestazno širenje, energija od svake antene za odašiljanje stiže na svaku primateljsku antenu nakon što biva reflektirana od strane različitih objekata. Ako je razmak odašiljačkih i prijemnih antena dovoljno velik, tada su karakteristike raspršivanja signala između svakog para prijamnih i odašiljačkih antena dovoljno različite tako da svaki signal postepeno gubi na snazi prilikom prijenosa, neovisno o drugima. Taj se prostor može iskoristiti koristeći tehnike prostornog multipleksiranja. Kako bi se smanjila mogućnost pojavljivanja fedinga, potrebno je osigurati razmak odašiljačkih i prijemnih antena na udaljenost barem pola valne duljine. [17]

Slika 23 pokazuje blok dijagram sustava MIMO s komponentama koje osiguravaju prostorni multipleks. Informacija dolazi na predajnom dijelu sustava do kodera gdje se provjerava ispravnost informacije. Nakon što je informacija kodirana ona prolazi kroz takozvani serijsko-paralelni pretvarač (engl. *serial-to-parallel converter*) koji dijeli signale veće brzine na više manjih paralelnih signala. Sljedeći blok zaprima paralelne signale i pridružuje ih odašiljačkim antenama. Uz to može još obavljati funkcije provjere greške i modulacije. Na prijemnoj strani svaka antena prima signal koji je jednak sumi svih odaslanih signala. Budući da prostorno multipleksiranje uključuje odašiljanje višestrukih različitih tokova podataka, prijemnik mora biti sposoban demultipleksirati, ili odvajati, pojedinačne tokove podataka. To je svrha dekodera prostornog multipleksa (engl. *spatial multiplexing decoder* - SM decoder) prikazanog na blok shemi. SM dekoder izvodi digitalnu obradu nad signalima iz antene za prijam i generira pojedinačni paralelni signal. Za tu svrhu razvijen je niz različitih tehnika dekodiranja. [17]



Slika 23. Prikaz sustava MIMO sa SM koderom/dekoderom [17]

Ovakav prijenos, gdje se različiti tokovi podataka istodobno prenose uz pomoć više antena, omogućuje linearni porast kapaciteta sustava odnosno brzine prijenosa podataka. Naravno radi toga na prijemnoj strani je potrebno razlučiti pojedine tokove podataka jer nastaju smetnje uzrokovane tim višestrukim tokovima. Iz toga razloga je bitno paziti na razmak između odašiljačkih i prijemnih antena koje bi trebale biti na udaljenosti od barem pola valne duljine signala nosioca. Nepovoljni učinci ove vrste se mogu ublažiti uvođenjem vremenskih pomaka između paralelnih tokova podataka implementiranjem prostorno-vremenskih kodova. [17]

5.2.2. Koncept diverzitija

Okolina u kojoj rade bežične pokretne mreže je puna prepreka iz toga razloga snaga primljenog signala varira u vremenu što se naziva feding. Nažalost utjecaj fedinga narušava kvalitetu prijenosa i time povećava vjerojatnost greške po prenesenom bitu (engl. *Bit Error Rate* – BER), narušava odnos signala i šuma odnosno energije po bitu u odnosu na gustoću snage šuma na prijemnoj strani sustava. [16]

Kako bi se smanjio utjecaj fedinga koristi se diverziti. Diverziti se odnosi na odašiljanje replike signala preko komunikacijskog kanala na takav način da svaka replika osigura veći broj putova s nezavisnim fedinzima kojima se prijenosi ista poruka. Postoji više načina kako se generira divreziti signal pa tako razlikujemo frekvencijski, vremenski, polarizacijski i prostorni diverziti. [2], [17]

U praksi je češće zastupljen prostorni diverziti. On se dijeli na prijemni diverziti i odašiljački diverziti. Prijemni diverziti višestruko vrednuje primljeni signal i konačni signal nastaje kombiniranjem signala iz više antena. Kod odašiljačkog diverzitija kopija signala se

šalje preko druge antene. Kako bi se odašiljački diverziti mogao primijeniti nužna je kompletna informacija o komunikacijskom kanalu na strani odašiljača radi prilagodbe signala uvjetima kanala. Tako se pomoću prostorno-vremenskih kodova kombiniraju prostorne i vremenske kopije signala. Kako se kopija signala ne emitira samo preko prostorno razmaknute antene, nego i u drugom trenutku, nastaje kombinacija prostorno-vremensko diverzitija. [2], [16]

5.3. Kapacitet komunikacijskog kanala MIMO sustava

Da bi lakše opisali kapacitet kanala MIMO sustava pretpostavit ćemo da imam frekvencijske neselektivne kanale koji su poznati prijemniku. Kanal karakterizira matrica H koja povezuje komponente signala na odašiljačkoj strani s_i i komponente r_i na prijemnoj strani komunikacijskog sustava. [2], [16]

$$R = H \times S + N \tag{4}$$

Gdje R, S i N predstavljaju vektore komponenti prijemnog signala, odašiljačkog signala i šuma. Za primjer ćemo uzeti sustav MIMO vidljiv sa slike 22 koji ima konfiguraciju 2×2 zatim dobijemo: [16]

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Izravne komponente ukazuju na ravnomjernost kanala, a određene su elementima na dijagonali matrice $\{h_{ii}\}$, dok neizravne komponente određene elementima matrice vrste $\{h_{ij}\}$ ukazuju na spregu među elementima. Elementi matrice H određuju se uz pomoć ispitnog slijeda.

Kapacitet standardnog komunikacijskog kanala, SISO kanala, određen je poznatim Shannonovim izrazom: [16]

$$C_{SISO} = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \tag{6}$$

koji pokazuje teorijski najvišu ostvarivu brzinu prijenosa u kanalu širine pojasa B u kojem je ostvaren omjer signala i šuma dat izrazom S/N.

Kapacitet MIMO kanala dodatno još ovisi o broju prostornih tijekova podataka M, iz čega slijedi: [16]

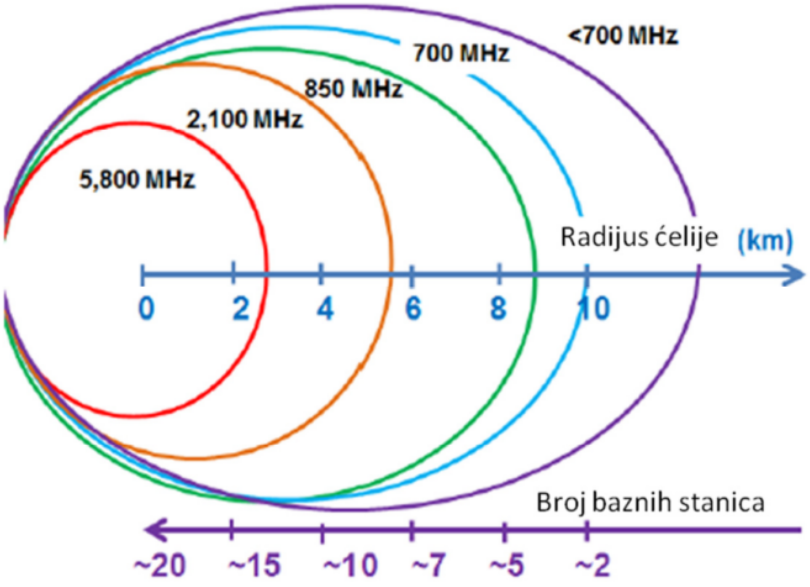
$$C_{MIMO} = M \cdot C_{SISO} \tag{7}$$

$$C_{MIMO} = M \cdot B \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \tag{8}$$

6. Elektronički spektar u mobilnim komunikacijskim sustavima

Kako je navedeno u prijašnjim cjelinama, frekvencijski spektar je ograničeni resurs, pa je radi bolje iskoristivosti potrebno pomno planiranje njegove dodjele. U Republici Hrvatskoj su se za potrebe analogne televizije koristili frekvencijski pojasevi VHF I, VHF III te pojasevi UHF IV i UHF V. Analogna televizija je u potpunosti koristila namijenjeni frekvencijski spektar te nije ostavila prostora za uvođenje novijih tehnologija. Kako bi se poboljšala iskoristivost frekvencijskog spektra počela se je provoditi digitalizacija sustava za emitiranje TV signala. Budući da digitalni sustavi koriste tehnologiju veće spektralne učinkovitosti za prijenos iste količine informacije, oslobodio se je dio spektra koji nazivamo digitalna dividenda.

Digitalnu dividendu možemo definirati kao dio oslobođenog radiofrekvencijskog spektra nakon prelaska s analognog na digitalno emitiranje televizijskih programa te adekvatne zamjene postojećih analognih programa novom digitalnom platformom. [18]

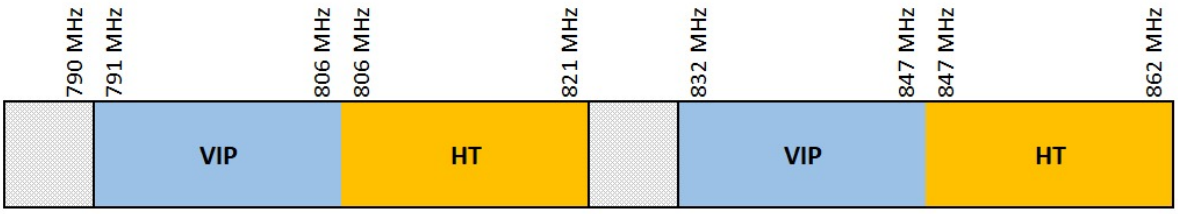


Slika 24. Promjena radijusa ćelije s obzirom na promjenu frekvencije [18]

Zadnjih nekoliko godina u mobilnim komunikacijskim sustavima susrećemo se sa trendom naglog rasta podatkovnog prometa kao posljedicom korištenja pametnih uređaja koji koriste širokopojasni pristup Internetu. Iz toga razloga bitno je prilagoditi digitalnu dividendu,

alocirati je, tehnologijama koje će proširiti mogućnost pristupa takvom načinu spajanja. Digitalnu dividendu je moguće koristiti za omogućavanje međunarodnog roaminga te uvođenje LTE tehnologije kao brzog pristupa Internetu. S obzirom na to da broj baznih stanica za pokrivanje nekog područja raste s rastom frekvencije, korist od upotrebe digitalne dividende u mobilnim mrežama je mogućnost pristupa nižim frekvencijama koje omogućuju povećanje područja pokrivanja baznih stanica, što je vidljivo sa slike 24. [18]

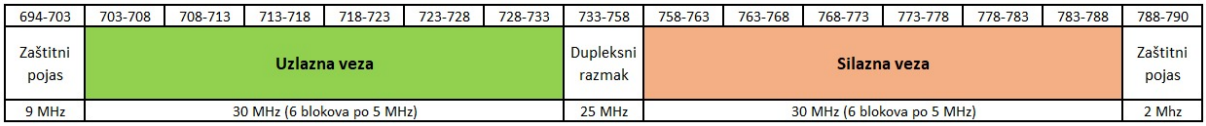
Kako bi se digitalna dividenda iskoristila, HAKOM je u rujnu 2012. godine raspisao javni poziv za izdavanje dozvola korištenja frekvencijskog spektra od 791 MHz do 821 MHz na području Republike Hrvatske za javne pokretne komunikacije mreže u trajanju od 12 godina. Predviđena je bila dodjela tri para frekvencijskih blokova od 2x10 MHz. Budući da su se na javni poziv odazvala samo dva operatera, HAKOM je donio odluku o dodijeli dva para frekvencijskih blokova od 2x10 MHz VIPnet-u i HT-u. Raspored blokova vidljiv je na slici 25.



Slika 25. Raspodjela frekvencijskih blokova za LTE [18]

S obzirom na to da je jedan blok ostao neiskorišten, radi manjka interesa na tržištu telekomunikacijskih usluga, on je danas dodijeljen kao proširenje blokova s 10 MHz na 15 MHz. Frekvencijski pojas 791-821/832-862 MHz se koristi za primjenu LTE tehnologije u FDD dupleksnom način rada s dupleksnim razmakom od 11 MHz. Za silaznu vezu koristi se frekvencijsko područje od 791 MHz do 821 MHz, a za uzlazne veze frekvencijsko područje od 832 MHz do 862 MHz. Širina jednog bloka je 5 MHz. Budući da operatori imaju na korištenje blokove od 15 MHz, sustav LTE im omogućava brzine 64,8 Mbit/s na uzlaznoj vezi i 128,9 Mbit/s na silaznoj vezi korištenjem 2×2 MIMO sustava. [18], [19]

Bitno je napomenuti da postoji dio frekvencijskog spektra digitalne dividende koji je u budućnosti namijenjen kao proširenje kapaciteta za LTE mreže mobilnih komunikacija. Radi se o frekvencijskom spektru 694 MHz - 790 MHz, a moguća raspodjela frekvencija za uzlazne i silazne veze kao i zaštitne pojaseve je vidljiva na slici 26. [18]



Slika 26. Podjela frekvencijskih blokova LTE sustava u pojasu 694 MHz - 790 MHz [18]

Budući da je jedan dio spektra ostao neiskorišten prilikom prvog javnog poziva, radi manjka interesa, ostaje upitno hoće li operateri biti zainteresirani za kupnju dodatnog spektra što bi predstavljalo dodatna ulaganja u nadogradnju mreže.

7. Zaključak

Mobilne mreže prve generacije izgrađene su kao analogne mreže koje su koristile frekvencijsku modulaciju sa malom vrijednosti spektralne učinkovitosti te FDMA tehniku višestrukog pristupa. Kako se je u to vrijeme mreža koristila samo za prijenos govora nije bilo potrebe za boljim tehnologijama. Budući da je sustav mobilne telefonije bio dobro prihvaćen uskoro dolazi do razvoja druge generacije mreža koja predstavlja digitalnu revoluciju jer uz prijenos govora omogućuje prijenos digitalnih kodova što je bio prvi korak prema Internet pristupu. Kako tehnologije prve generacije više ne zadovoljavaju potreban standard prijelazi se na nove metode moduliranja signala i višestrukog pristupa poput TDMA tehnika.

Veći iskorak prema korištenju podatkovnog prometa i multimedijski aplikacija predstavlja pojava treće generacije mobilnih mreža koja koristi WCDMA tehniku multipleksiranja. Omogućuje se brži pristup Internetu, ali pritom se pazi na efikasno korištenje spektra.

U današnje vrijeme brzim razvojem tehnologije, pojavom sve većeg broja korisnika koji zahtijevaju veće brzine prijenosa i bolju razinu kvalitete usluge, razvija se LTE tehnologija četvrte generacije s mogućnostima širokopojasnog pristupa Internetu. Uvodi se novi način modulacije, frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosioca ili kraće OFDM. Njime je omogućena visoka spektralna učinkovitost, prijenos u *non line-of-sight* sustavima. Kombinirajući ga sa više-antenskim sustavima MIMO, koji koriste pametne antene za usmjeravanje dijagrama zračenja, predstavlja revoluciju u svijetu telekomunikacija.

Kako su sustavi velikih brzina podložniji utjecaju šuma potrebno je implementirati nešto složeniji način zaštite što predstavlja veći trošak implementacije sustava.

U budućnosti će se težiti korištenju sustava masivnog MIMO-a koji će omogućiti korištenje milimetarski radio valova, dodatnog dijeljenja spektra, energetsku učinkovitost dok će kapacitet bazirati na puno većem broju odašiljačkih antena od sadašnje MIMO tehnologije. Razvoj u ovome smjeru će omogućiti veću kvalitetu usluga te uvođenje novih multimedijskih aplikacija.

Literatura

[1] Haykin, S., Moher, M.: Introduction to Analog and Digital Comunications, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 2007.

[2] Proakis, J., G., Salehi, M.: Digital Communications, Fifth Edition, McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2008.

[3] URL: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/SKT09_13-14_Modulacije.pdf (pristupljeno 20.06.2017)

[4] Xiong, F.: Digital Modulation Techniques, Artech House Inc., Second Edition, Norwood, 2006.

[5] URL: http://www.electronicdesign.com/communications/understanding-modern-digital-modulation-techniques (pristupljeno 23.06.2017)

[6] Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J.: 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Second Edition, Elsevier, Oxford, 2014.

[7] URL: http://digitalnatv.site90.net/dtv/ofdm.html (pristupljeno 28.08.2017)

[8] URL: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/KVAZUPred7b.pdf (pristupljeno 28.08.2017)

[9] URL: http://www.revolutionwifi.net/revolutionwifi/2015/3/how-ofdm-subcarriers-work (pristupljeno 28.08.2017)

[10] URL: https://drakic.files.wordpress.com/2012/02/mobilne-na-jednom-mjestu.pdf (pristupljeno 27.06.2017)

[11] URL: http://www.iitg.ernet.in/scifac/qip/public_html/cd_cell/chapters/a_mitra_mobile_communication/chapter8.pdf (pristupljeno 26.06.2017)

[12] doc. dr. sc. Mario Muštra, Separati s predavanja iz kolegija „Mobilni komunikacijski sustavi“, Zagreb, 2016

[13] URL: http://www.devx.com/wireless/Article/11422 (pristupljeno 26.06.2017).

[14] URL: http://www.electronicdesign.com/communications/fundamentals-communications-access-technologies-fdma-tdma-cdma-ofdma-and-sdma#”TDMA” (pristupljeno 27.06.2017)

[15] Holma, H., Toskala, A.,: WCDMA for UMTS Radio Access For Third Generation Mobile Communications, Third Edition, John Wiley & Sons, Cornwall, 2004.

[16] Fakultet elektrotehnike i računarstva: Radijske tehnologije za širokopojasni nepokretni pristup i mjerenja, Zagreb, 2008.

[17] Hampton, J., R.,: Introduction To MIMO Communications, Cambridge University Press, Cambridge, 2014.

[18] Fakultet elektrotehnike i računarstva: Mogućnost korištenja dividende u Republici Hrvatskoj, Zagreb, 2012.

[19] URL: https://www.hakom.hr/UserDocsImages/2015/radiokomunikacije/baza%20za%20javne%20pokretne%20komunikacijske%20mre%C5%BEe_20151117.pdf (pristupljeno 31.08.2017)

Popis ilustracija

Slika 1. Grafički prikaz binarne diskretne modulacije amplitude [3] 3
Slika 2. Grafički prikaz diskretne modulacije frekvencije [3] 4
Slika 3. Grafički prikaz diskretne modulacije faze [3] 6
Slika 4. QPSK dijagrami stanja [5] 7
Slika 5. Usporedba 8-QAM i 8-PSK modulacija [8] 8
Slika 6. Podjela OFDM kanala u frekvencijskoj i vremenskoj domeni [7] 9
Slika 7. Prikaz oblika impulsa podnosioca a) i spektra b) za osnovni OFDM prijenos [6] 11
Slika 8. Prikaz OFDM podnosioca [9] 11
Slika 9. Blok shema OFDM sustava [2] 12
Slika 10. Prikaz umetanja zaštitnog intervala u OFDM simbolu [6] 14
Slika 11. Prikaz prijenosa tehnikom OFDMA pristupa [6] 15
Slika 12. Koncept frekvencijskog i vremenskog dupleksa [12] 18
Slika 13. Način raspodjele korisnika FDMA tehnikom [10] 19
Slika 14. Princip raspodjele kanala [10] 20
Slika 15. Način raspodjele korisnika TDMA tehnikom [10] 22
Slika 16. Princip rada primjenom tehnike TDMA [10] 23
Slika 17. Način raspodjele korisnika CDMA tehnikom [10] 25
Slika 18. Postupak proširenja spektra kod CDMA IS-95 standarda [14] 26
Slika 19. Kontrola snage signala tehnikom zatvorene petlje u sustavu CDMA [15] 28
Slika 20. Osnovne izvedbe radio sustava [12] 30
Slika 21. Usporedba klasičnog i prilagodljivog antenskog sustava [12] 31
Slika 22. Princip rada sustava MIMO [12] 32
Slika 23. Prikaz sustava MIMO sa SM koderom/dekoderom [17] 34
Slika 24. Promjena radijusa ćelije s obzirom na promjenu frekvencije [18] 37
Slika 25. Raspodjela frekvencijskih blokova za LTE [18] 38
Slika 26. Podjela frekvencijskih blokova LTE sustava u pojasu 694 MHz - 790 MHz [18] ... 39

Popis tablica

Tablica 1. Prikaz binarnih znakova sa pridruženim fazama..... 7
Tablica 2. Usporedba standarda mobilnih mreža prve generacije 21
Tablica 3. Usporedba standarda mobilnih mreža druge generacije 24

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj završni rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

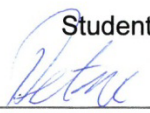
Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog rada pod naslovom **UNAPRJEĐENJE MODULACIJSKIH POSTUPAKA I PRJENOSA SIGNALA ZA POVEĆANJE BRZINE MOBILNIH MREŽA 4. GENERACIJE** na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 6.9.2017.

Student:



(potpis)