Analiza silazne veze LTE mobilnog sustava

Mendelski, Vedran

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:184258

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

ANALIZA SILAZNE VEZE LTE MOBILNOG SUSTAVA

Diplomski rad

Vedran Mendelski

Osijek, 2019.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Osijek, 08.09.2019.

Odboru za završne i diplomske ispite

Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada

Ime i prezime studenta:	Vedran Mendelski
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika'
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 1071, 21.09.2018.
OIB studenta:	08351361002
Mentor:	Prof.dr.sc. Snježana Rimac-Drlje
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	Izv. prof. dr. sc. Mario Vranješ
Član Povjerenstva:	Dr.sc. Denis Vranješ
Naslov diplomskog rada:	Analiza silazne veze LTE mobilnog sustava
Znanstvena grana rada:	**Radiokomunikacije (zn. polje elektrotehnika)**
Zadatak diplomskog rada:	LTE mobilni 4G sustav donio je brzine prijenosa podataka veće od 200 Mb/s s tendencijom daljnjeg porasta. Za ostvarivanje ovih brzina LTE koristi niz naprednih tehnologija modulacije, zaštitnog kodiranja, MIMO antenskih sustava, estimacije kanala, multipleksiranja i ostalih. U radu treba opisati tehnologije koje koristi LTE na razini radio sučelja za silaznu vezu. Pomoću LTE simulatora napraviti usporedbu performansi sustava za različite konfiguracije silazne veze.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	08.09.2019.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 18.09.2019.

Ime i prezime studenta:	Vedran Mendelski
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika'
Mat. br. studenta, godina upisa:	D 1071, 21.09.2018.
Ephorus podudaranje [%]:	9 %

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Analiza silazne veze LTE mobilnog sustava**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Snježana Rimac-Drlje

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

1. UVOD 6
2. RAZVOJ I ARHITEKTURA LTE/SAE MREŽE 8
2.1. Povijesni razvoj 8
2.1.1. Od 1G do 3G 8
2.1.2. Sustavi treće generacije 9
2.1.3. Potreba za LTE mrežom 10
2.1.4. Od UMTS do LTE mreže 11
2.2. Arhitektura EPS sustava 12
2.2.1. Korisnička oprema – UE 13
2.2.2. Pristupna mreža - E-UTRAN 15
2.2.3. Jezgrena mreža – EPC 17
2.3. LTE protokolni složaj 18
2.3.1. Struktura kanala 22
2.3.2. Raspoređivanje resursa 25
2.3.3. Adaptacija veze 28
3. ZRAČNO SUČELJE 30
3.1. Digitalna bežična komunikacija 30
3.1.1. Odašiljanje signala 30
3.1.2. Prijem signala 31
3.1.3. Tehnike višestrukog pristupa 31
3.1.4. Upravljanje pogreškama 32
3.2. OFDMA 37
3.2.1. OFDM 37
3.2.2. SC-OFDMA 41

3.2.3. OFDMA u mobilnoj ćelijskoj mreži 42
3.3. Tehnike višestrukih antena 48
3.3.1. Prostorni diverziti 49
3.3.2. MIMO 51
3.3.3. Digitalno oblikovanje 55
4. LTE simulacija silazne veze 58
4.1. Parametri simulacije 58
4.2. Simulacija LTE mreže – scenarij A 66
4.2.1. Rezultati simulacije za scenarij A 67
4.3. Usporedba rezultata različitih scenarija 78
4.3.1. Usporedba rezultata simulacija za različite propagacijske okoline 78
4.3.2. Usporedba rezultata simulacija za različite geometrije ćelijske mreže 83
4.3.3. Usporedba rezultata simulacija za mreže sa i bez femtoćelija 87
5. ZAKLJUČAK 95
LITERATURA 97
SAŽETAK 100
ANALYSIS OF THE LTE MOBILE SYSTEM DOWNLINK 100
ABSTRACT 100

1. UVOD

Mobilne mreže se razvijaju već dugi niz godina kako bi pratili sve veće potrebe korisnika. Nekad je mobilni uređaj bio namijenjen za glasovnu komunikaciju, a danas je glavni podatkovni komunikacijski uređaj za krajnje korisnike koji omogućava pretraživanje interneta, društveno povezivanje i mnoge druge usluge. Mnogi mobilni sustavi i mreže su razvijeni i proširen kako bi omogućili kvalitetnu i pouzdanu bežičnu komunikaciju. Prva generacija celularnih mreža, poznatijih još i kao 1G, zasnovane su na analognom FDMA (engl. *Frequency Division Multiple Access*) pristupu i govornim uslugama a svoj razvoj su započele sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Već u mrežama druge generacije, kao što je GSM (engl. *Global System for Mobile Communications*) tehnologija, koristio se digitalni prijenos govora i podataka. 3G mreže nastaju početkom 2001. godine uvođenjem paketnog prijenosa podataka u mreže druge generacije. Ovaj se rad bavi svjetski dominantnom 4G mobilnom telekomunikacijskom sustavu, LTE (engl. *Long Term Evolution*). Sustav razvijen od strane 3GPP tijela koji omogućava 4G mobilni pristup s brzinama prijenosa većim i od 200 Mb/s. LTE je standard u bežičnim podatkovnim sustavima i evoluirao je iz UMTS (engl. *Universal Mobile Telecommunication System*) standarda, a točan naziv mu je EPS (engl. *Evolved Packed System*) no uobičajeno je da se koristi naziv LTE. LTE je sustav sljedeće generacije mobilnih tehnologija koji je dramatično promijenio pristup informacijama i međusobnu interakciju korisnika. Sustav donosi novi nivo mobilnosti, smanjene troškove i veću efikasnost. Cilj rada je pomoću LTE simulatora napraviti usporedbu performansi sustava za različite konfiguracije silazne veze.

Strukturno, rad se sastoji od pet glavnih poglavlja. Prvo poglavlje je uvodno poglavlje koje upoznaje čitatelja sa ciljem i sadržajem rada. Drugo poglavlje daje kratak osvrt na povijest razvoja LTE sustava te put preko kojeg je došao razvoj i potreba za sustavima četvrte generacije. Nadalje, objašnjena je arhitektura EPS sustava odnosno LTE, sustav četvrte generacije mobilnih mreža. Ovo poglavlje detaljno opisuje protokolni slog odnosno protokole, kanale i tehnologije potrebne za ispravan rad sustava. Treće poglavlje opisuje radio sučelje za silaznu vezu odnosno modulacijske tehnike potrebne za digitalnu bežičnu komunikaciju. Također, dan je i detaljni opis OFDMA napredne modulacijske tehnologije koja je zaslužna za ostvarivanje pouzdanog prijenosa velikim brzinama. Na kraju poglavlja opisuju se tehnike višestrukog pristupa kao što je multipleksiranje i MIMO (engl. *multiple input multiple output*) antenski sustav. Četvrto poglavlje opisuje mogućnosti LTE simulatora i daje analizu nekoliko simulacijskih scenarija za silaznu vezu.

U petom i završnom poglavlju dani su rezimirajući zaključci o LTE sustavu i rezultatima simulacija.

2. RAZVOJ I ARHITEKTURA LTE/SAE MREŽE

2.1. Povijesni razvoj

LTE (engl. *Long Term Evolution*) mreža je dizajnirana u suradnji nacionalnih i regionalnih telekomunikacijskih tijela za standarde, pod zajedničkim nazivom 3GPP (engl. *Third Generation Partnership Project*) [1] i puni naziv LTE mreže je 3GPP *Long Term Evolution*. LTE se razvila iz prijašnjeg 3GPP sustava, UMTS-a (engl. *Universal Mobile Telecommunication System*), koji se razvio iz GSM-a (engl. *Global System for Mobile Communications*).

2.1.1. Od 1G do 3G

Mobilni telekomunikacijski sustavi su se prvi puta pojavili u ranim 1980.-im. Prva generacija (1G) mreža je koristila analogne komunikacijske tehnike, koje su bile slične onim tehnikama koje su koristili tradicionalni analogni radio uređaji. Najpoznatiji 1G sustavi su bili NMT u nordijskim zemljama, AMPS u Sjevernoj Americi, TACS u Europi i J-TACS u Japanu. Individualne ćelije su bile velike i sustav nije efikasno koristio dostupni radio spektar, tako da je mrežni kapacitet, za današnje standarde, bio veoma mali. Mobilni uređaji su bili veliki i skupi te korišteni samo od strane poslovnih korisnika [4, str. 6].

Mobilne telekomunikacije su se približile korisnicima s predstavljanjem druge generacije (2G) mreža ranih 1990.-ih. Ovaj sustav je prvi koristio digitalnu tehnologiju, što je omogućilo efikasniju upotrebu radijskog spektra te pojavu manjih, jeftinijih uređaja. Isprva su bili dizajnirani samo za govor, no kasnije su poboljšani kako bi omogućili slanje poruka preko SMS-a (engl. *Short Message Service*). Najpoznatiji 2G sustav je GSM, koji je isprva bio namijenjen za Europsko tržite, no kasnije je postao svjetski poznat [27]. Također 2G sustav vrijedan spomena je bio IS-95, poznat i kao cdmaOne, dizajnirao ga je Qualcomm te je postao dominantni 2G sustav za Sjedinjene Američke Države. GSM je bio zasnovan na TDMA (engl. *Time-Division Multiple Access*) standardu dok je CDMA (engl. *Code-Division Multiple Access*) bio standard za IS-95. Uspjeh 2G sustava se zasnivao na dobroj pokrivenosti signalom i pristupačnim cijenama za mobilnu telefoniju. Razvoj interneta potaknuo je potrebu skidanja podataka na mobilne uređaje. Da bi to bilo moguće, tzv. 2.5G sustavi su se nadogradili na postojeće 2G sustave, tako što su stvorili jezgrenu mrežu za pristup podatcima i ubacili je u zračno sučelje kako bi se uz govor, mogli razmjenjivati i podatci. GPRS (engl. *General Packet Radio Service*) je pripojio te tehnike u GSM, a IS-95 je razvio sustav zvan IS-95B.

U isto vrijeme, dostupne su se brzine prijenosa podataka preko interneta progresivno povećavale. Kao odgovor tome, prvo su se unaprijedile performanse 2G sustava pomoću tehnika kao što su EDGE (engl. *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), a zatim se uveo novi jači sustav treće generacije (3G) u ranim 2000.-im [28]. 3G sustavi koriste drugačije tehnike za radio prijenos i prijem od njihovih 2G prethodnika, što povećava vrijednosti najvećih brzina prijenosa podataka te naposljetku omogućava efikasniju uporabu radio spektra.

Nažalost, rani 3G sustavi su bili preopterećeni i njihov učinak nije ispočetka ispunio očekivanja. Zbog toga, 3G je tek propisno zaživio nakon uvođenja 3.5G sustava, 2005. godine. U ovim sustavima, zračno sučelje je uključivalo dodatnu optimizaciju koja se zahtijevala u podatkovnim aplikacijama, što je povećavalo prosječnu brzinu kojom korisnik može skinuti ili poslati informaciju, nauštrb promjenjivosti u brzinama prijenosa i vremenu dolaska podatka.

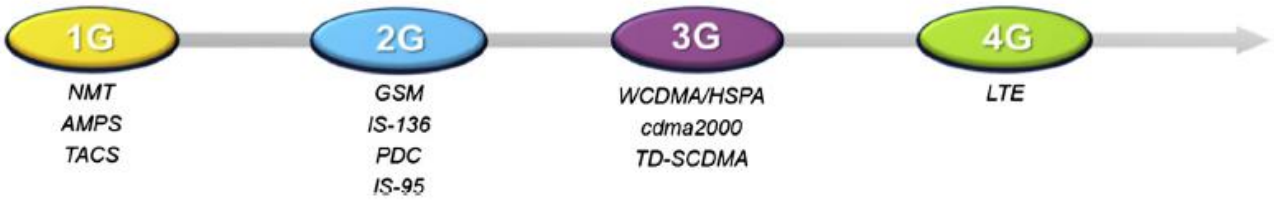
2.1.2. Sustavi treće generacije

Svjetski dominantni 3G sustav je UMTS koji se razvio iz GSM-a tako što je potpuno promijenio tehnologije korištene na zračnom sučelju, dok je jezgrenu mrežu ostavio nepromijenjenu. Sustav je kasnije unaprijeđen za podatkovne aplikacije, uvodeći 3.5G tehnologije kao što su HSDPA (engl. *high speed downlink packet access*) i HSUPA (engl. *high speed uplink packet access*), koji se jednim imenom zovu HSPA (engl. *high speed packet access*).

Zračno sučelje UMTS-a je imalo dvije nove implementacije. WCDMA (engl. *Wideband Code Division Multiple Access*) tehnologija je uvedena i još uvijek korištena u većini područja. Druga implementacija je TD-SCDMA (engl. *Time Division Synchronous Code Division Multiple Access*) i ona je izvedenica iz WCDMA te je nastala u Kini. Dvije su razlike između spomenutih tehnologija: prva, WCDMA obično razdvaja prijenose baznih i mobilnih stanica tako što koristi frekvencijski dupleks, dok TD-SCDMA koristi vremenski dupleks i druga, WCDMA koristi frekvencijski pojas od 5MHz, a TD-SCDMA koristi pojas od 1.6MHz [4, str. 7].

Zadnja 3G tehnologija je WiMAX (engl. *Worldwide Interoperability for Microwave Access*). Razvijena je od strane IEEE (engl. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) pod standardom 802.16. Sustav je zamišljen tako da obavlja prijenos podataka preko mikrovalnih veza od jedne točke do druge, umjesto fiksnih kablova. Kasnije verzije su podržavale i prijenos od jedne točke do više njih, tako omogućavajući komunikaciju između bazne stanice i većeg broja fiksnih

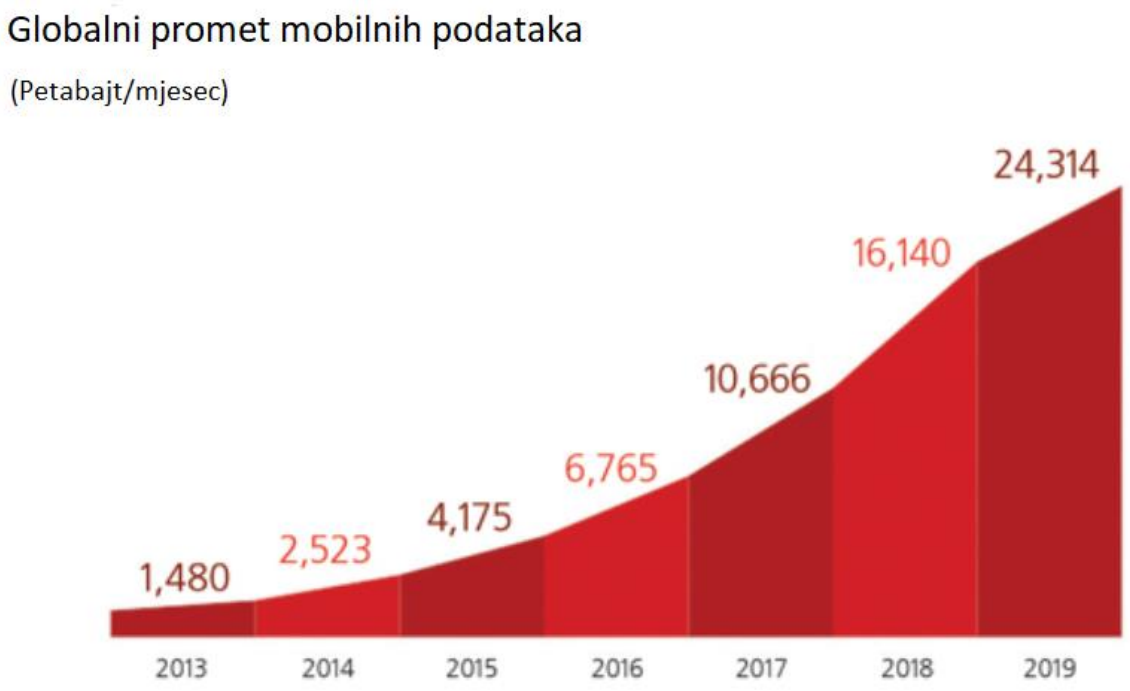
uređaja. Zadnje unaprjeđenje nazvano „mobile WiMAX“ je omogućavalo uređajima kretnju i prebacivanje njihove komunikacije s jedne bazne stanice na drugu.



Sl.2.1. Generacije mobilnih telekomunikacijskih sustava [2, str.2]

2.1.3. Potreba za LTE mrežom

Dugi niz godina, glasovni pozivi su dominirali prometom u mobilnim komunikacijskim mrežama. Rast mobilnih podataka je isprva bio spor, ali u godinama do 2010., njihova uporaba se dramatično povećala. Na slici 2.2., dani su rezultati mjerenja koja pokazuju ukupni mobilni promet u svijetu, u petabajtima (milioni gigabajta) mjesečno [3]. Slika pokriva period od 2013. do 2019., u kojem se promet mobilnih podataka povećao za više od 10 puta, a naspram 2007. godine, čak više od 100 puta. Rast je potaknut povećanom dostupnošću 3.5G komunikacijskih tehnologija i još važnije, predstavljanjem Apple iPhonea 2007. godine. Nakon toga je Google 2008. predstavio Android operativni sustav. Ti novi pametni mobilni uređaji su bili atraktivniji i lakši za korištenje nego njihovi predci i dizajnirani su kako bi mogli podržati sve vrste aplikacije, ne samo Google ili Apple aplikacije. Rezultat je bio veliko povećanje broja kako korištenja, tako i samih aplikacija. Mrežni operateri su prethodno htjeli ohrabriti korisnike za upotrebu mobilnih podataka uvođenjem naplate neograničenog prometa. To je dovelo do preopterećenosti 2G i 3G mreža, koje su morale povećati svoje kapacitete.



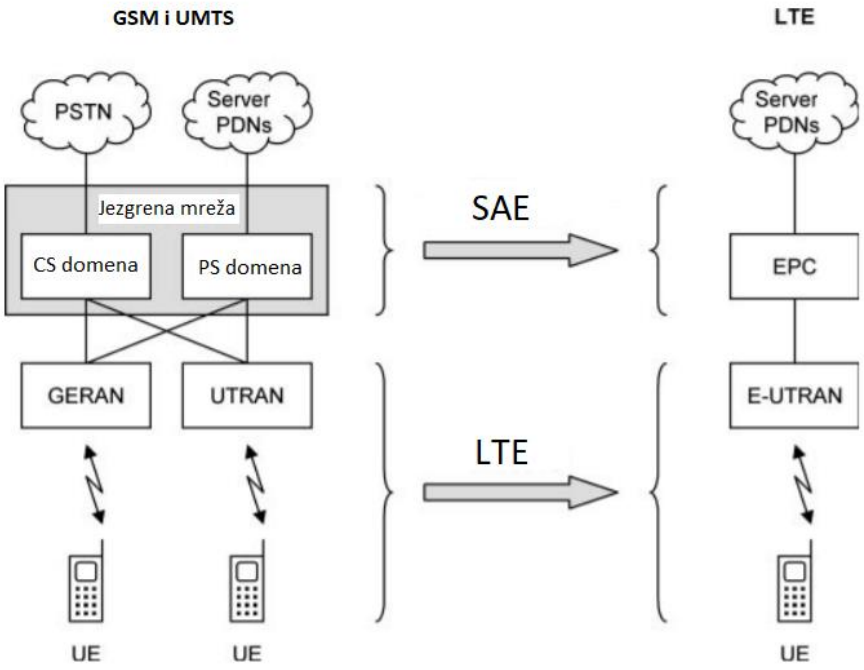
Sl.2.2. Mjerenja prometa mobilnih podataka u svjetskim mobilnim telekomunikacijskim mrežama, od 2013. do 2019. [3]

2.1.4. Od UMTS do LTE mreže

Slika 2.3. prikazuje način na koji se arhitektura razvila iz UMTS mreže. U novoj arhitekturi, evoluirana jezgrena mreža (engl. EPC – *Evolved Packet Core*) je izravna zamjena za PS (engl. *Packet Switched*) domenu UMTS i GSM mreže. Ona distribuira sve vrste podataka korisnicima, kako glasovne tako i mobilne podatke, koristeći tehnologiju zamjene paketa koja se tradicionalno koristila samo za mobilne podatke. Za CS (engl. *Circuit Switched*) domenu nema ekvivalentne zamjene, umjesto toga, glasovni pozivi su ostvareni korištenjem VoIP (engl. *Voice Over Internet Protocol*). E-UTRAN (engl. *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) se brine za radio komunikaciju evoluirane jezgrene mreže i mobilnih uređaja, tako da je izravna zamjena za UTRAN. Mobilni uređaji su još uvijek znani kao UE (engl. *user equipment*), iako su njihove unutarnje operacije mnogo drugačije nego kod 3G mreže.

Nova arhitektura mreže se sastoji od dva glavna dijela: SAE (engl. *System Architecture Evolution*), koji pokriva jezgrenu mrežu, i LTE, koji se odnosi na radijsku pristupnu mrežu, zračno

sučelje i mobilne uređaje. Službeno, cijeli sustav je znan kao EPS (engl. *Evolved Packet System*), dok akronim LTE označava evoluciju zračnog sučelja. No, bez obzira na to, LTE je postao kolokvijalno ime za cijeli sustav, i regularno je korišteno od strane 3GPP-a.

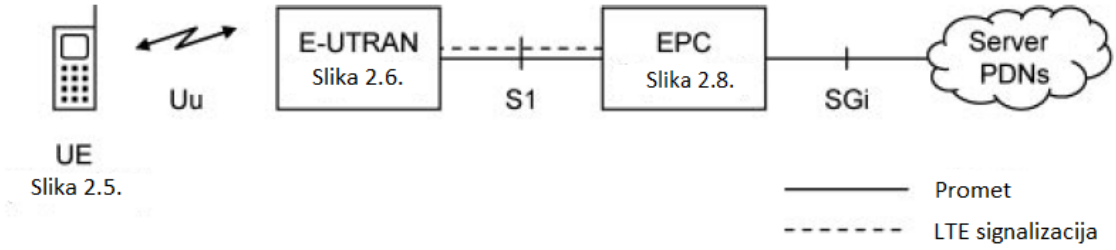


Sl.2.3. Evolucija sustavne arhitekture od GMS i UMTS do LTE mreže [4, str. 12]

2.2. Arhitektura EPS sustava

Slika 2.4. prikazuje generalnu arhitekturu evoluiranog paketnog sustava (EPS). Sastoji se od tri glavne komponente: UE, E-UTRAN i EPC. EPC naizmjenične komunicira sa paketnim mrežama u vanjskom svijetu kao što su internet, privatne korporacijske mreže ili IP multimedijski podsustavi te s operaterskim servisima (npr. MMS, MBMS) te ujedno upravlja funkcijama vezanima uz sigurnost (autentifikacija, dodjela sigurnosnih ključeva), pretplatničke informacije, naplatu i mobilnost prema drugim pristupnim mrežama. E-UTRAN obavlja sve radijske funkcije za aktivne terminale. Sučelja između različitih dijelova EPS sustava su Uu, S1 i SGi. EPS podržava

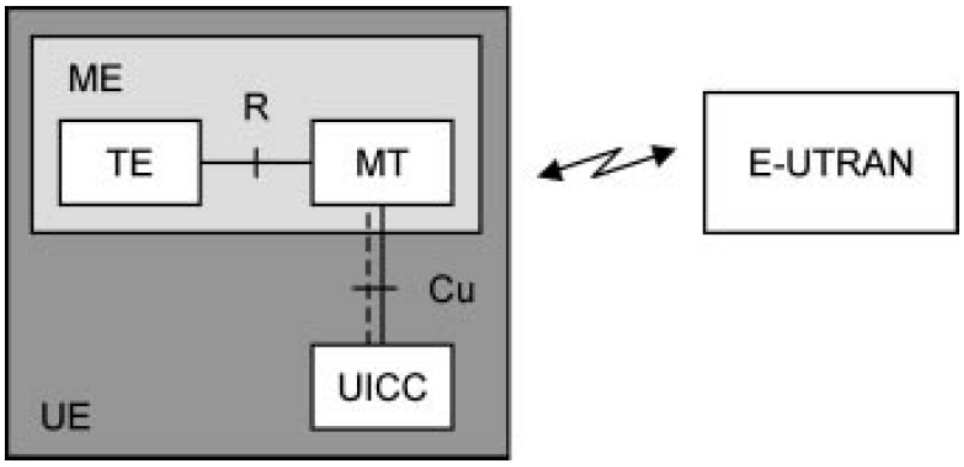
isključivo paketsku domenu – servisi koji tradicionalno koriste komutaciju kanala (CS) prenositi će se također preko PS nositelja.



Sl.2.4. Generalna EPS arhitektura [4, str. 22]

2.2.1. Korisnička oprema – UE

Slika 2.5. prikazuje unutarnju arhitekturu korisničke opreme. Arhitektura je identična s onom iz UMTS i GSM mreže. Komunikacijski uređaj je znan kao ME (engl. *Mobile Equipment*). Oprema može biti podijeljena u dvije komponente, MT (engl. *Mobile Termination*), koja upravlja svim komunikacijskim funkcijama, i TE (engl. *Terminal Equipment*), koja omogućava podatkovne prijenose. MT može biti LTE kartica koja se uključuje u laptop, i u tom slučaju, laptop je TE. UICC (engl. *Universal Integrated Circuit Card*) je pametna kartica, kolokvijalno znana kao SIM kartica.



Sl.2.5. Interna arhitektura korisničke opreme [4, str. 22]

Pokreće aplikaciju poznatu kao USIM [5] (engl. *Universal Subscriber Identity Module*), koja sprema sve specifične korisničke podatke kao što su broj mobitela i identitet poznate mreže. USIM se također brine za razna sigurnosna pitanja, koristeći sigurnosne ključeve koje pametna kartica sprema. LTE podržava mobilne uređaje koje koriste USIM od izdanja 99 i kasnije, ali ne podržava SIM kartice korištene u izdanjima prije GSM mreže.

LTE podržava mobilne uređaje koje koriste IP verziju 4 (IPv4), IP verziju 6 (IPv6), ili dualnu verziju IPv4/IPv6. Uređaj prima jednu IP adresu za svaki mrežni paketni podatak koji komunicira, npr. jednu za Internet i jednu za bilo koju privatnu korporacijsku mrežu. Alternativno, uređaj može primiti IPv4 adresu kao i IPv6 adresu, ukoliko i uređaj i mreža podržavaju obje verzije protokola. Mobilni uređaji mogu imati razne radio karakteristike, kao što je maksimalna brzina prijenosa koju mogu ostvariti, različite vrste pristupnih tehnologija koje podržavaju i različite prijenosne frekvencije na kojima šalju i primaju pakete. Mobilni uređaji prosljeđuju informaciju o svojim karakteristikama pristupnoj mreži pomoću signalizacijskih poruka, tako da E-UTRAN zna kako ih pravilno kontrolirati. Najvažnije karakterisitke su grupirane zajedno u UE kategorije. U tablici 2.1. dan je pregled UE kategorija i njihov razvoj karakteristika kroz različita izdanja.

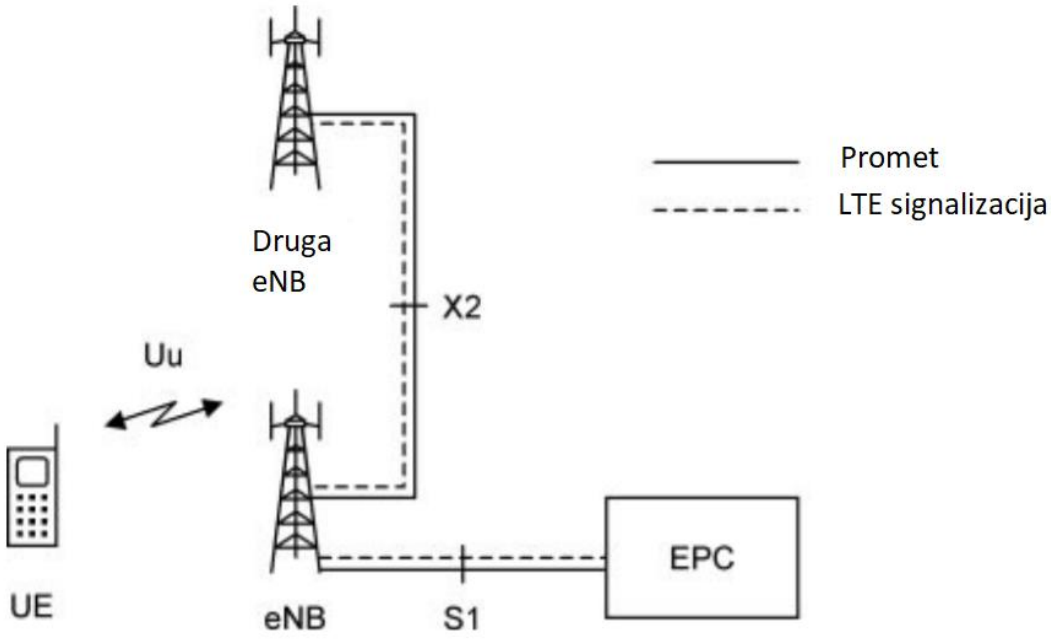
Tab.2.1. UE kategorije [4, str. 23]

UE kategorije	Izdanja	Maksimalni broj DL bita po ms	Maksimalni broj UL bita po ms	Maksimalni broj DL slojeva	Maksimalni broj UL slojeva	Podrška za UL 64-QAM
1	R8	10296	5160	1	1	NE
2	R8	51024	25456	2	1	NE
3	R8	102048	51024	2	1	NE
4	R8	150752	51024	2	1	NE
5	R8	299552	75376	4	1	DA
6	R10	301504	51024	4	1	NE
7	R10	301504	102048	4	2	NE
8	R10	2998560	1497760	8	4	DA

2.2.2. Pristupna mreža - E-UTRAN

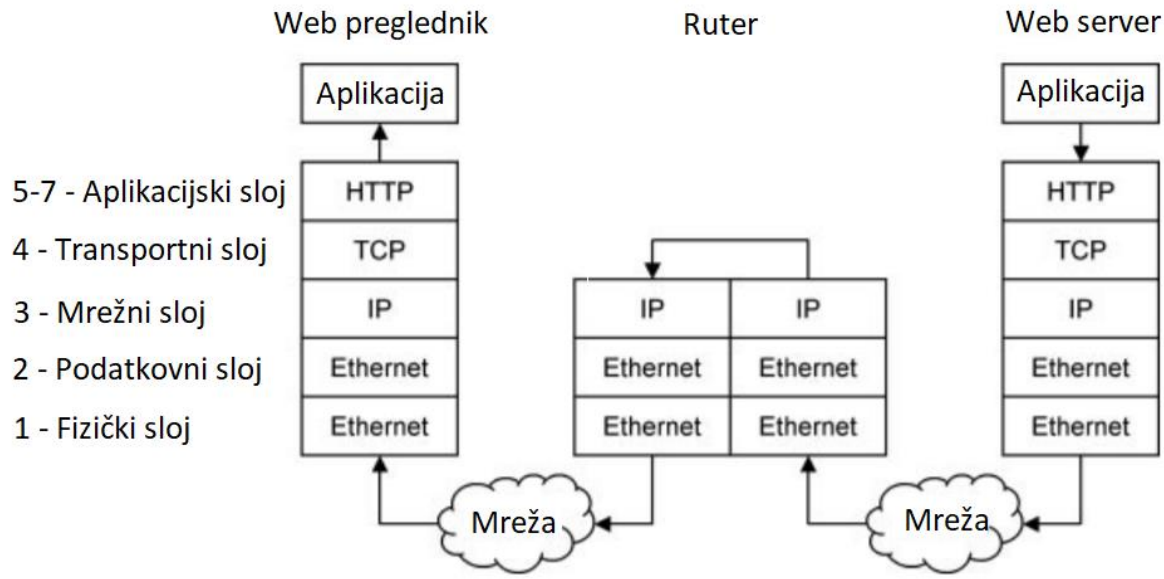
Evoluirana UMTS zemaljska pristupna radio mreža (E-UTRAN) je prikazana na slici 2.6. E-UTRAN je zaslužan za radio komunikaciju između mobilnih uređaja i evoluirane jezgrene mreže (EPC) te ima samo jednu komponentu, evoluiranu radijsku osnovnu postaju - eNB (engl. *evolved Node B*). Svaka postaja je bazna stanica koja kontrolira mobilne uređaje u jednoj ili više ćelija. Mobiteli komuniciraju sa samo jednom baznom stanicom i jednom ćelijom u isto vrijeme, tako da nema stanja sporog preuzimanja (engl. *handover*), koje je bilo u UMTS mreži. Bazna stanica koja komunicira s mobilnim uređajem se naziva uslužna radijska postaja (eNB).

eNB ima dvije glavne funkcije. Prva, šalje radijski signal svim mobilnim uređajima na silaznoj vezi i prima signal od svih na uzlaznoj vezi, koristeći analogne i digitalne funkcije za obradu signala s LTE zračnog sučelja. Druga, eNB kontrolira sve operacije na niskoj razini, za sve mobilne uređaje, tako što im šalje signalizacijske poruke kao što su naredbe za preuzimanje i sl. Da bi radio postaja ostvarila te funkcije, kombinira sposobnosti koje su imale radio postaje u UMTS mreži sa kontrolorom radijske mreže, kako bi se smanjila latencija koja se pojavljuje kada mobilni uređaji razmjenjuju informacije s mrežom.



Sl.2.6. Arhitektura E-UTRAN [4, str. 23]

Svaka bazna stanica je povezana s evoluiranom jezgrenom mrežom pomoću S1 sučelja. Može biti povezana s drugom radio postajom pomoću X2 sučelja, koje se uglavnom koristi za signalizaciju i prosljeđivanje podataka tijekom preuzimanja. X2 sučelje je proizvoljno jer S1 sučelje može obavljati sve funkcije X2 sučelja, ali indirektno i sporije. Uglavnom, S1 i X2 sučelja nisu direktne fizičke veze te se umjesto toga, informacije šalju preko IP transportne mreže po shemi na slici 2.7.



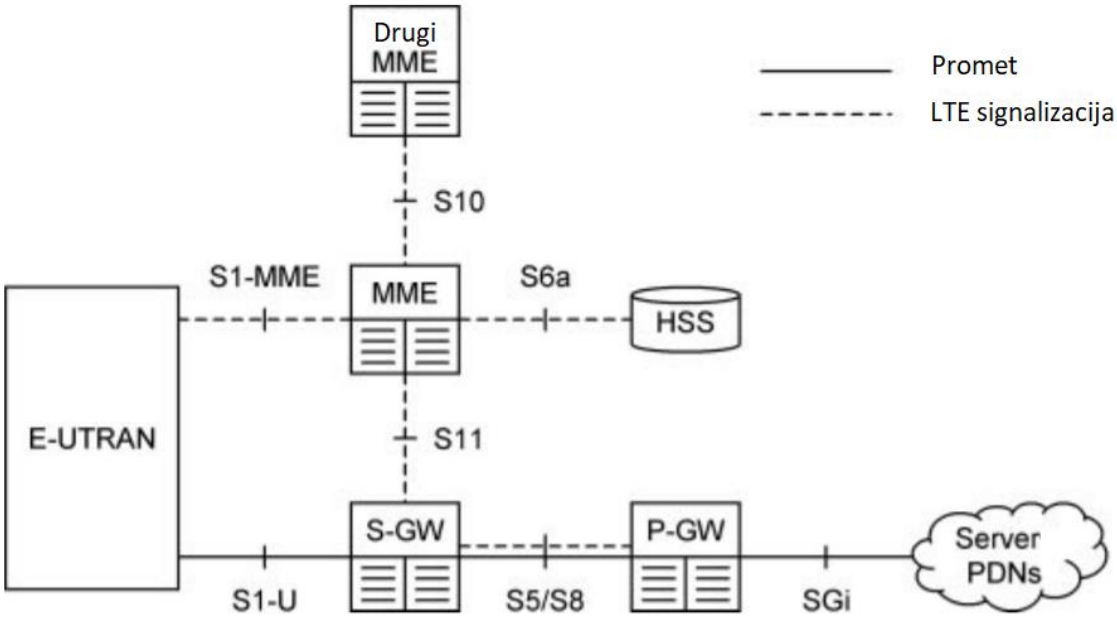
Sl.2.7. Primjeri komunikacijskih protokola koje koristi Internet te njihovo mapiranje na slojeve OSI modela [4, str. 5]

Kućna radio postaja HeNB (engl. *home eNB*) je bazna postaja koja je kupljena od strane korisnika kako bi omogućio stvaranje femtoćelije unutar kuće [4]. HeNB pripada zatvorenoj grupi korisnika CSG (engl. *Closed Subsriber Group*). S arhitektonskog pogleda, kućna radio postaja može biti direktno spojena na EPC na isti način kao i svaka druga radio postaja, ili može biti spojena na uređaj poznat kao kućni eNB izlaz (engl. *home eNB gateway*) koji prikuplja informacije sa većeg broja kućnih radio postaja.

2.2.3. Jezgrena mreža – EPC

Slika 2.8. prikazuje glavne komponente evoluirane jezgrene mreže [4]. HSS (engl. *Home Subscriber Server*) je centralna baza podataka koja sadrži informacije o pretplatnicima mrežnih operatera te je jedna komponenta koja se prenijela iz UMTS i GSM mreže.

P-GW (engl. *PDN-gateway*) je dio paketne mreže (PDN – engl. *Packet Data Network*) preko koje jezgrena mreža ostvaruje kontakt s vanjskim svijetom. Preko SGi sučelja, svaki P-GW razmjenjuje podatke s jednim ili više vanjskih uređaja ili paketnih mreža, kao što su serveri mrežnih operatera, Internet ili podsustavi IP multimedije. Svaka paketna mreža je identificirana pomoću APN-a (engl. *Access Point Name*). Mrežni operater tipično koristi veći broj različitih APN-ova, npr. jedan za vlastiti server i jedan za Internet.



Sl.2.8. Glavne komponente evoluirane jezgrene mreže [4, str. 24]

Svaki mobilni uređaj je dodijeljen zadanom P-GW-u kada se prvi puta uključi, kako bi uvijek imao mogućnost povezivanja na zadanu paketnu mrežu kao što je Internet. Kasnije, uređaj može biti dodijeljen jednom ili većem broju PDN prolaza, ukoliko se želi povezati na dodatnu paketnu mrežu kao što su privatne korporativne mreže. Svaki PDN prolaz ostaje isti za cijeli životni vijek podatkovne veze. Uslužni prolaz S-GW (engl. *Serving Gateway*) služi kao ruter i prosljeđuje podatke između bazne stanice i PDN prolaza. Tipična mreža može sadržavati veći broj

uslužnih prolaza, gdje se svaki od njih brine za uređaje na određenom geografskom području. Svaki mobilni uređaj je dodijeljen jednom uslužnom prolazu, ali uslužni prolaz se može promijeniti ukoliko uređaj napusti geografsko područje istog. Entitet upravljanja mobilnošću MME (engl. *Mobility Management Entity*) kontrolira operacije visokog nivoa mobilnih uređaja šaljući signalne poruke o problemima kao što su sigurnost i upravljanje podatkovnim prijenosima. Kao i s uslužnim prolazima, tipična mreža može sadržavati veći broj MME-a, svaki za određeno geografsko područje. Svaki mobilni uređaj je dodijeljen jednom MME-u koji se naziva uslužni MME, ali se može promijeniti ukoliko se mobilni uređaj odmakne dovoljno daleko od geografskog područja koje pokriva trenutni uslužni MME. MME također kontrolira druge elemente mreže pomoću signalnih poruka koje ostaju unutar evoluirane jezgrene mreže.

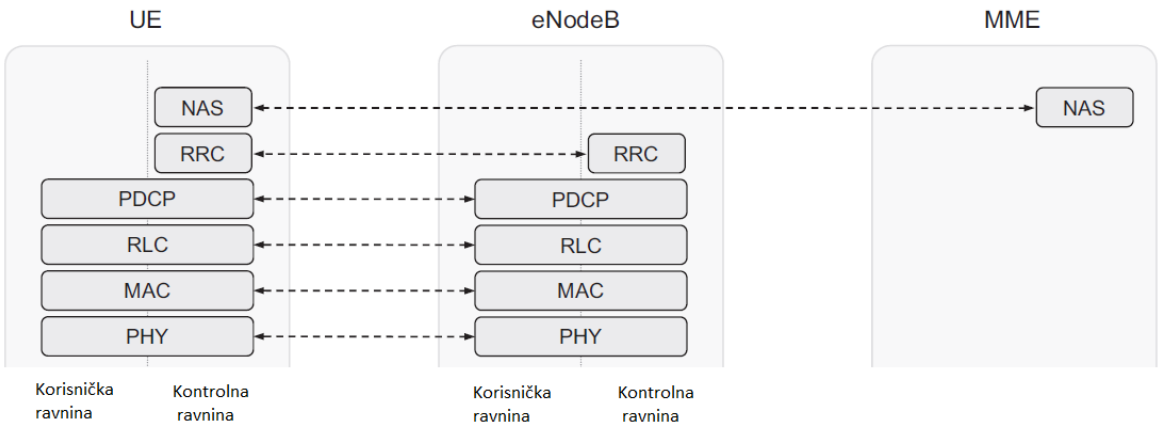
U usporedbi s UMTS i GSM mrežom vidi se da PDN prolaz ima istu ulogu kao i GGSN (engl. *Gateway GPRS Support Node*), dok uslužni prolaz i MME zamjenjuju usmjeravanje podataka i signalne funkcije koje je u UMTS i GSM mreži obavljao SGSN (engl. *Serving GPRS Support Node*). Podjela SGSN-a na dva entiteta olakšava operateru upravljanje mrežom pod velikim opterećenjem: operater može dodati više uslužnih prolaza kako se promet povećava, dok dodavanje većeg broja MME-a omogućava veći broj mobilnih uređaja u području. Kako bi se podržalo ovo razdvajanje, S1 sučelje ima dvije komponente: S1-U sučelje prenosi promet uslužnog prolaza dok S1-MME sučelje prenosi signalne poruke MME-a.

EPC ima još neke komponente koje nisu prikazane na slici 2.8. CBC (engl. *Cell Broadcast Centre*) je korišten u UMTS mreži za rijetko implementirani CBS (engl. *Cell Broadcast Service*). U LTE mreži, ta oprema je ponovno korištena za ETWS (engl. *Earthquake and Tsunami Warning System*). EIR (engl. *Equipment Identity Register*) je također usvojen iz UMTS mreže te prikazuje detalje izgubljenih ili ukradenih mobilnih uređaja.

2.3. LTE protokolni složaj

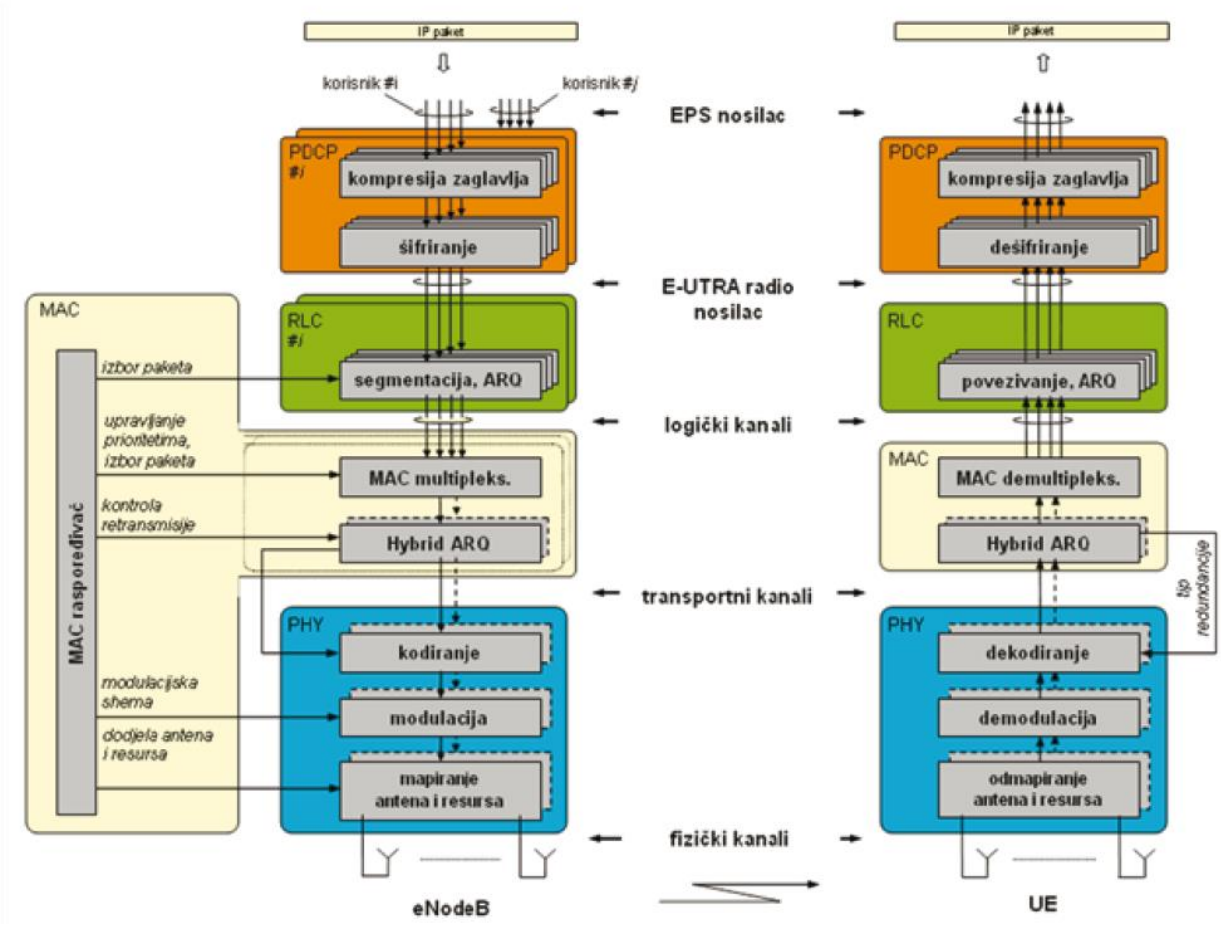
RAN (engl. *Radio Access Network*) protokolna arhitektura se sastoji od dvije ravnine, korisničke i kontrolne. Svako fizičko sučelje je povezano s protokolnim slogom pomoću kojeg mrežni elementi razmjenjuju podatke i signalne poruke. Slika 2.9. prikazuje RAN protokolnu arhitekturu (uključujući i već spomenuti MME, koji nije dio RAN protokolne arhitekture, ali je

uključen u sliku zbog cijelosti). Kao što se vidi na slici, mnogi protokolni entiteti su zajednički kontrolnoj i korisničkoj ravnini.



Sl.2.9. RAN protokolna arhitektura [2, str. 124]

LTE radio pristupna mreža pruža jednog ili više radio nositelja preko kojih su IP paketi mapirani prema QoS (engl. *Quality of Service*) zahtjevima. Protokoli u korisničkoj ravnini obrađuju podatke vezane za korisnike dok protokoli u kontrolnoj ravnini obrađuju signalne poruke koje zanimaju samo mrežne elemente. Protokolni složaj se sastoji od dva glavna sloja: radijskog mrežnog sloja i transportnog mrežnog sloja. Struktura LTE radijskog sučelja (korisničke ravnine) za silaznu vezu je prikazana na slici 2.10. Različiti protokolni entiteti radio pristupne mreže su sažeti u nastavku.



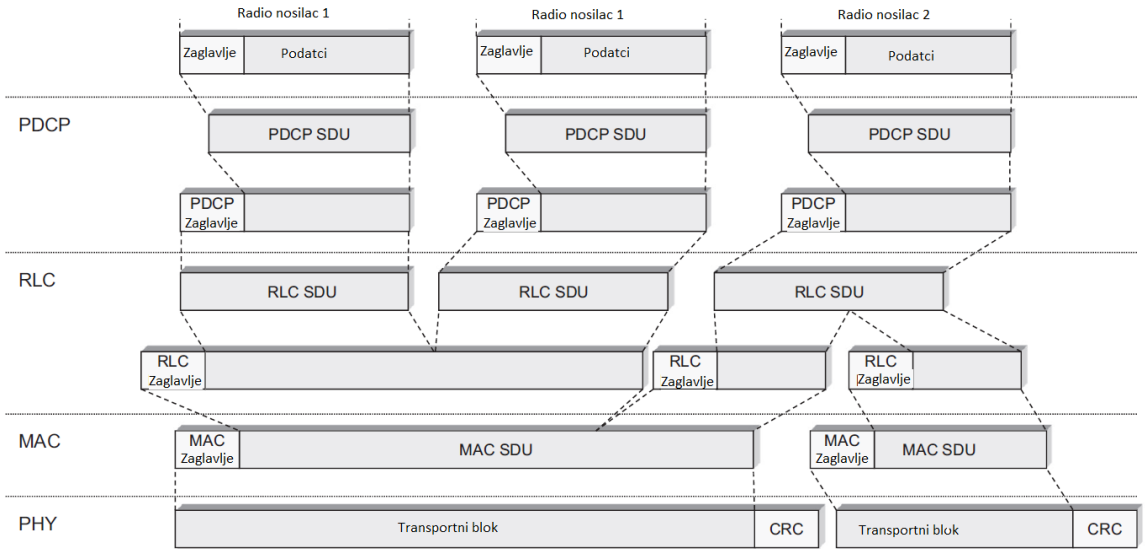
Sl.2.10. Struktura LTE radijskog sučelja [6, str. 74]

PDCP (engl. *Packet Data Convergence Protocol*) obavlja kompresiju IP zaglavlja kako bi se smanjio broj bita koje je potrebno poslati preko radijskog sučelja. PDCP je također odgovoran za šifriranje i, u kontrolnoj ravnini, osiguravanje integriteta poslanih podataka. Osigurava dostavu po pravilnom redoslijedu (engl. *in-sequence*) i uklanja duplikate tijekom promjene mreže. Na prijemnoj strani, PDCP protokol obavlja odgovarajuće procese dešifriranja i dekompresije. Konfiguriran je samo jedan PDCP entitet za svaki mobilni uređaj.

RLC (engl. *Radio-Link Control*) je odgovoran za segmentaciju/povezivost, retransmisiju, detekciju duplikata i dostavu podataka po pravilnom redoslijedu za više slojeve. RLC omogućava uslugu za PDCP. Konfiguriran je samo jedan RLC entitet za svaki mobilni uređaj.

MAC (engl. *Medium-Access Control*) obavlja multipleksiranje logičkih kanala, hibridnu-ARQ retransmisiju te raspoređivanje (engl. *scheduling*) za silaznu i uzlaznu vezu. MAC omogućuje uslugu za RLC u vidu logičkih kanala.

PHY (engl. *Physical Layer*) obavlja kodiranje/dekodiranje, modulaciju/demodulaciju i mapiranje antena. Fizički sloj omogućuje uslugu za MAC sloj u vidu transportnih kanala. Kako bi sumirali tok podataka silaznom vezu kroz sve protokolne slojeve, na slici 2.11. dan je primjer s tri IP paketa, dva na jednom radijskom nositelju i jedan na drugom. Tok podataka za uzlaznu vezu je sličan.



Sl.2.11. LTE podatkovni tok [2, str. 126]

PDCP obavlja kompresiju IP-zaglavlja nakon čega slijedi šifriranje. PDCP zaglavlje je dodano na paket te se u zaglavlju nalazi informacija potrebna za dešifriranje. Takav paket se predaje na RLC sloj. RLC protokol obavlja povezivanje i segmentaciju te se dodaje RLC zaglavlje. Zaglavlje se koristi za dostavu po pravilnom redoslijedu (za svaki logički kanal) te za identifikaciju RLC paketa u slučaju retransmisije. RLC paket se predaje na MAC sloj koji multipleksira broj RLC paketa i dodaje MAC zaglavlje kako bi se napravio transportni blok. Veličina transportnog bloka varira zavisno o brzini prijenosa odabrane od strane mehanizma za prilagodbu veze. Naposljetku, fizički sloj dodaje CRC (engl. *Cyclic Redundancy Check*) na transportni blok u svrhu detekcije pogrešaka.

Fizički sloj obavlja i kodiranje i modulaciju te šalje dobiveni signal koristeći odašiljanje pomoću većeg broja antena.

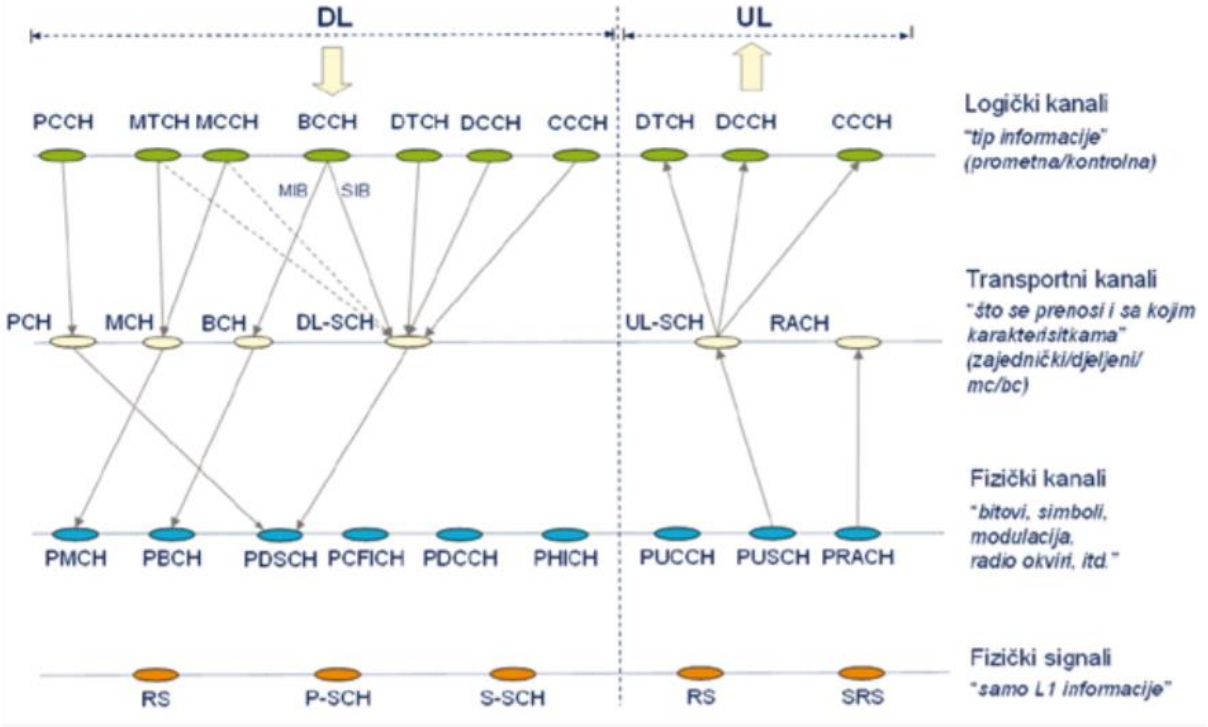
2.3.1. Struktura kanala

MAC omogućuje procese za RLC u vidu logičkih kanala. Logički kanal je definiran prema tipu informacije koju prenosi i generalno su klasificirani ili kao kontrolni kanali, korišteni za kontrolu prijenosa i konfiguraciju informacija neophodnih za rad LTE sustava, ili kao prometni kanali, korišteni za korisničke podatke. Logički kanali korišteni u LTE sustavima su [2] :

- odašiljački kontrolni kanal (BCCH – engl. *Broadcast Control Channel*) – koristi se za odašiljanje sistemskih kontrolnih informacija s mreže do svih terminala u ćeliji
- kontrolni kanal za upravljanje radio pozivima (PCCH – engl. *Paging Control Channel*) – koristi se za prijenos radio poziva (engl. *paging*) za one ćelije za koje mreža ne zna točnu lokaciju mobilne stanice unutar te ćelije
- zajednički kontrolni kanal (CCCH – engl. *Common Control Channel*) – koristi se za odašiljanje kontrolnih informacija između mreže i UE zajedno sa slučajnim pristupom (engl. *random access*)
- pridijeljeni kontrolni kanal (DCCH – engl. *Dedicated Control Channel*) - dvosmjerni kanal koji se koristi za odašiljanje kontrolnih informacija te konfiguraciju pojedinog mobilnog uređaja
- kontrolni kanal za grupno odašiljanje (MCCH – engl. *Multicast Control Channel*) – koristi se za prijenos kontrolnih informacija potrebnih za prijem MTCH (vidi ispod)
- pridijeljeni prometni kanal (DTCH – engl. *Dedicated Traffic Channel*) – kanal dodijeljen samo jednoj mobilnoj stanici za prijenos korisničkih informacija
- prometni kanal za grupno odašiljanje (MTCH – engl. *Multicast Traffic Channel*) – za prijenos prometnih podataka prema mobilnim stanicama koje koriste MBMS (engl. *Multimedia Broadcast Multicast Services*)

MAC sloj koristi transportne kanale koji su definirani na koji način i s kojim karakteristikama se informacija prenosi preko radijskog sučelja. Podatci na transportnim kanalima su organizirani u transportne blokove. U svakom vremenskom prijenosnom intervalu (TTI – engl.

Transmission Time Interval) je barem jedan transportni blok poslan preko radijskog sučelja u odsutnosti prostornog multipleksiranja. TTI je vrijeme potrebno raspoređivaču da obradi najmanju jedinicu resursa. U slučaju da ima prostorno multipleksiranje (MIMO), može biti do dva transportna bloka po TTI-u.



Sl.2.12. Mapiranje kanala za silaznu i uzlaznu vezu [6, str. 76]

Uz svaki transportni blok veže se transportni format (TF – engl. *Transport Format)* koji definira kako će transportni blok biti poslan preko radijskog sučelja. TF sadrži informacije o veličini transportnih blokova, o kodno-modulacijskog shemi i o mapiranju antena. Pomoću TF-a se definira i brzina prijenosa. Logički kanali mapiraju se na transportne kanale. Broj transportnih kanala za LTE je sveden na minimum kako bi se izbjegle česte promjene tipova kanala koje uvode nepotrebna kašnjenja:

- odašiljački kanal (BCH – engl. *Broadcast Channel*) – ima fiksni TF i koristi se za prijenos BCCH sustavnih informacija – MIB (engl. *Master Information Block*)

- pozivni kanal (PCH – engl. *Paging Channel*) – koristi se za prijenos informacija od PCCH logičkog kanala. PCH podržava diskontinuirani prijem (DRX – engl. *Discontinuous Reception)* te se tako štedi snaga baterije jer se PCH budi samo u dogovoreno vrijeme
- dijeljeni kanal u silaznoj vezi (DL-SCH – engl. *Downlink Shared Channel*) – glavni transportni kanal koji se koristi za prijenos silaznih podataka u LTE sustavima. Podržava adaptaciju veze izmjenama modulacije, kodiranja ili odašiljačke snage, diskontinuirani prijem te ima mogućnost raspodjele resursa u vremenskoj i frekvencijskoj domeni. Također podržava HARQ i MIMO
- kanal za grupno odašiljanje (MCH – engl. *Multicast Channel*) – MBMS transportni kanal, podržava MBMS odašiljanje s više ćelija (MBSFN – engl. *MBMS Single Frequency Network*)
- dijeljeni kanal u uzlaznoj vezi (UL-SCH – engl. *Uplink Shared Channel*) – kanal suprotan DL-SCH kanalu jer se koristi u uzlaznoj vezi te ima identične funkcije
- kanal za slučajni pristup (RACH – engl. *Random Access Channel*) – kanal u uzlaznoj vezi koji se koristi za ostvarivanje vremenske sinkronizacije, sadrži informacije za odobravanje odašiljanja

Na slici 2.12. se jasno vidi kako su DL-SCH i UL-SCH glavni silazni i uzlazni transportni kanali. Fizički sloj prima podatke za odašiljanje s MAC sloja u obliku transportnih blokova.

Osim fizičkih kanala na koje se izravno mapiraju odgovarajući transportni kanali postoje i fizički kanali koji nose kontrolne informacije sa MAC sloja ili prema njemu:

- fizički kontrolni kanal u silaznoj vezi (PDCCH – engl. *Physical Downlink Control Channel)* – kontrolna signalizacija (za kontrolu snage, raspoređivanje u silaznoj vezi i odobravanje raspoređivanja u uzlaznoj vezi),
- fizički kontrolni kanal u uzlaznoj vezi (PUCCH – engl. *Physical Uplink Control Channel*) – kontrolna signalizacija (zahtjevi za raspoređivanjem u uzlaznoj vezi, CQI, ACK/NACK),
- kanal indikatora kontrolnog formata (PCFICH – engl. *Physical Control Format Indicator Channel*) – definira format PDCCH na silaznoj vezi,
- kanal HARQ indikatora (PHICH – engl. *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*) – prenosi HARQ informacije (ACK/NACK) u silaznoj vezi.

Osim fizičkih kanala postoje i fizički signali koji podržavaju funkcije fizičkog sloja, ali ne prenose nikakvu informaciju s MAC sloja:

- referentni signali (RS – engl. *Reference Signals*) – za mjerenja i koherentnu detekciju u silaznoj i uzlaznoj vezi, prenesena sekvenca jednoznačno definira ćelije (produkt 3 ortogonalne sekvence i 168 pseudo-slučajnih sekvenci – ukupno 504 moguće sekvence),
- sinkronizacijski signali (P-SCH i S-SCH – engl. *Primary and Secondary Synchronization signals*) – koriste se u silaznoj vezi u procesu izbora ćelije (definiraju sinkronizaciju na okvire i služe za detekciju identiteta ćelije),
- referentni signal za ispitivanje (SRS – engl. *Sounding Reference Signal*) – za mjerenja radi raspoređivanja u uzlaznoj vezi.

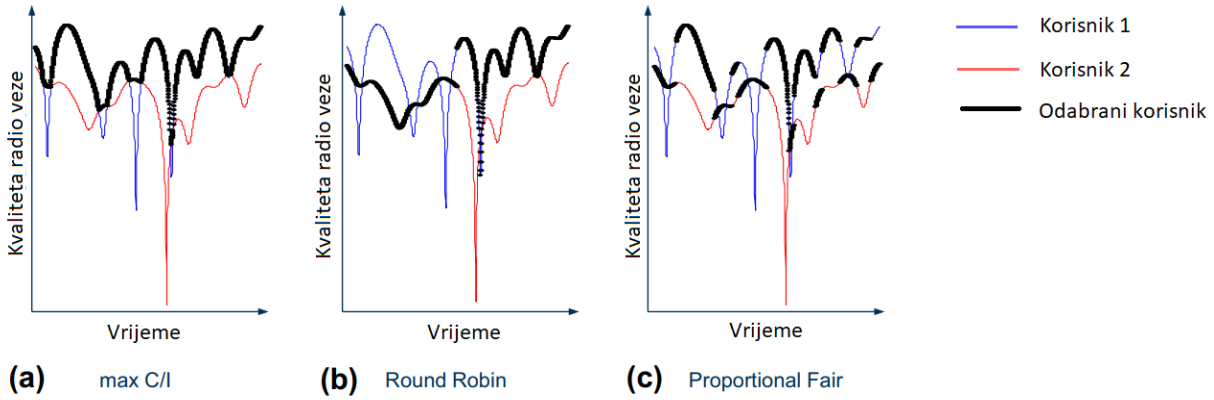
2.3.2. Raspoređivanje resursa

Raspoređivanje resursa (engl. *scheduling*) kontrolira alokaciju dijeljenih resursa u svakom vremenskom trenutku. Ova će tehnika biti prikazana na primjeru raspoređivanja resursa u silaznoj vezi. U uzlaznoj vezi se također koristi i većina principa je jednaka kao i u silaznoj vezi uz neke manje izmjene i ograničenja. Raspoređivanje se odvija na razini jednog odsječka od 1 ms, u trajanju od dva RB (engl. *resource block*). Širina jednog RB-a je 12 OFDM podnositelja što definira rasporednih blok (engl. *scheduling block*). Svaki OFDM podnositelj prenosi 7 OFDM simbola što daje 84 resursna elementa u resursnom bloku. Rasporedni blokovi se dodjeljuju korisnicima s obzirom na vrstu raspoređivanja.

U silaznoj vezi, transmisija različitih međusobno ortogonalnih podnositelja unutar ćelije u teoriji znači da ne bi trebalo biti interferencije između njih. Ortogonalnost unutar ćelije može biti ostvarena u vremenskoj, frekvencijskoj ili kodnoj domeni. Za paketne podatke u kojima promet stiže u naletima, u teoriji se može reći da se preferira vremenska domena i zato je vremensko multipleksiranje glavna komponenta u silaznoj vezi [2]. Vremensko multipleksiranje je često povezano s dijeljenjem radijskih resursa u frekvencijskoj ili kodnoj domeni. Multipleksiranje u silaznoj vezi u LTE sustavu je kombinacija vremenskoj i frekvencijskog multipleksiranja. Osim dijeljenja resursa u vremenskoj/frekvencijskoj/kodnoj domeni, dijeli se i odašiljačka snaga ćelije što će biti objašnjeno u sljedećoj sekciji o adaptaciji veze. Strategija raspoređivanja resursa koja

uzima u obzir trenutno stanje radijske veze se naziva raspoređivanje ovisno o kanalu (engl. *channel-dependent scheduling*).

Raspoređivanje za korisnika koji trenutno ima najbolje uvjete radijske veze se često naziva max-C/I (engl. *maximum rate*) raspoređivanje. U svakom trenutku za jednu radijsku vezu se nastoji osigurati kvaliteta kanala blizu maksimalno moguće i stoga se taj kanal koristi za odašiljanje i imati će visoku kvalitetu i samim time i visoku brzinu prijenosa. Iz toga se dobije sustav velikog kapaciteta. Slanjem podataka s favoriziranim stanjem radio vezeostvaruje se dobitak za korisnike , a ta tehnika se naziva višekorisnički diverziti. Dobitak je sve veći i veći što je veći broj korisnika u ćeliji. Neželjeni efekt koji u ovom tipu raspoređivanja je brzo slabljenje signala – brze varijacije u kvaliteti radijske veze.. Ukoliko u prosjeku svi korisnici imaju slične kanalne uvjete i ukoliko nema velikih oscilacija u kvaliteti radio veze, tada će ova vrsta raspoređivanja biti nepravedna prema uređajima s lošim kanalnim uvjetima te uređaji s najgorim kanalnim stanjem neće nikada biti uključeni u raspoređivanje. To je pokazano na slici 2.13a gdje se max-C/I raspoređivanje odvija između dva korisnika s različitom prosječnom kanalnom kvalitetom. Iz slike se može zaključiti da će jedan korisnik biti u raspoređivanju cijelo vrijeme. Iako se uz ovo raspoređivanje dobije najveći kapacitet sustava, u praksi često ne zadovoljava QoS (engl. *quality-of-service*) zahtjeve.



Sl.2.13. Primjer tri različita raspoređivanja za dva korisnika s različitom kvalitetom radio veze: a) max-C/I, b) round-robin i c) proportional fair [2]

Alternativno max-C/I raspoređivanju može se koristiti *round-robin* raspoređivanje (slika2.13b). Ova strategija raspoređivanja omogućava korisnicama izmjenjivanje korištenja dijeljenih resursa bez uzimanja u obzir trenutnih kanalnih uvjeta. Round-robin raspoređivanje se može gledati kao poštena strategija jer svaka komunikacijska veza dobije jednaku količinu radijskih resursa. Iako, s pogleda jednake kvalitete usluge svim komunikacijskim vezama, ova vrsta raspoređivanja nije poštena. Kako round-robin raspoređivanje ne gleda trenutne kanalne uvjete, dolazi do nižih ukupnih performansi sustava, ali do ravnopravnije usluge kvalitete između različitih komunikacijskih veza.

Stoga, potrebna je strategija raspoređivanja koja je sposobna obraditi brze kanalne varijacije kako bi unaprijedila ukupnu propusnost u ćeliji i sve to uz osiguravanje jednake prosječne propusnosti za sve korisnike (ili makar određenu minimalnu propusnost za sve korisnike). Praktična strategija raspoređivanja mora raditi negdje između max-C/I i round-robin raspoređivanja tj. mora uzimati u obzir brze varijacije u kanalnim uvjetima dok zadovoljava određeni stupanj raspodjele prioriteta (engl. *fairness* [20]) između korisnika.

Primjer takvog raspoređivanja je *proportional-fair* prikazano na slici 2.13c. U ovoj strategiji, dijeljeni resursi su dodijeljeni korisniku s relativnim najboljim uvjetima radio veze – tj. u svakom trenutku, korisnik *k* je izabran za prijenos prema:

$$k = \arg\max_i \frac{R_i}{\overline{R_i}} \tag{2-1}$$

gdje je:

- R_i – trenutna brzina prijenosa podataka za korisnika *i*
- R_i – prosječna brzina prijenosa podataka za korisnika *i*

Prosječna vrijednost se izračunava za vrijeme određenog prosječnog vremena T_{PF}.

U dosadašnjem scenariju pretpostavljeno jeda se svi radijski resursi u silaznoj vezi raspoređuju za jednog korisnika u nekom trenutku – raspoređivanje se događa samo u vremenskoj domeni između korisnika. No, vremenska domena je najčešće kombinirana s kodnom ili vremenskom domenom. U slučaju nedovoljnog korisnog prometa gdje je količina podataka za prijenos do korisnika nedovoljna za iskorištenje punog kanalnog kapaciteta nakon raspoređivanja za korisnika u vremenskoj domeni, manja količina resursa se alocira za drugog korisnika u frekvencijskoj ili kodnoj domeni.

2.3.2.1. Indikator kvalitete kanala

CQI (engl. *Channel Quality Indicator*) je mjera koja reflektira kvalitetu kanala silazne veze i mjeren je od strane UE. Ovisno o implementaciji mobilnih uređaja i arhitekture prijemnika, performanse mogu biti bolje ili lošije nego za druge UE pri istim kanalnim uvjetima. Napredniji prijemnici u uređajima omogućuju bolje CQI procjene i stoga i unaprijeđenu korisničku propusnost te kapacitet i pokrivenost ćelije. Bazne stanice korisne CQI mobilnih uređaja u algoritmima raspoređivanja. Prijavljeni CQI odgovara najvećoj mogućoj brzini prijenosa koje UE može dekodirati pri čemu stopa pogreške nije veća od 10% i pri tome da kanalni uvjeti i odašiljačka snaga ostanu nepromijenjeni u referentnom vremenu. S ovim pravilom, raspoređivač može prilagoditi veličinu transportnog bloka (TBS – engl. *transport block size*) kako bi prijavljeni CQI zadovoljio prosjek od 10% stope pogreške bloka (BLER – engl. *block error rate*)

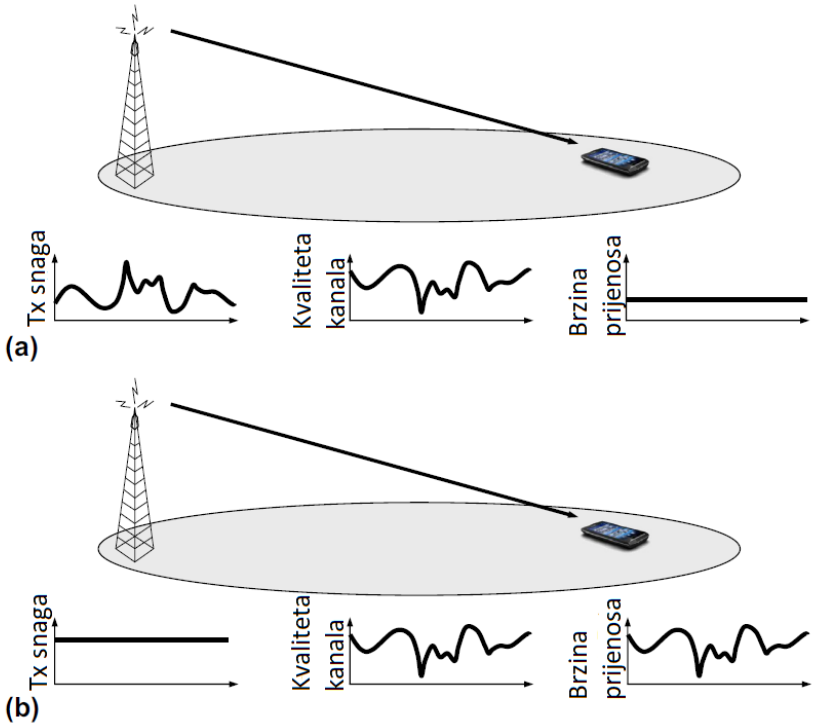
Konstante promjene u radijskom okruženju, prouzrokovane višestaznim okruženjem i mobilnošću mobilnih uređaja, vode do fluktuacija u kvaliteti kanala. Dodatno, mobilni uređaji mogu raditi drugačije u sličnim radijskim uvjetima. Zbog svega navedenog, izbor TBS bloka samo na osnovu prijavljenog CQI indikatora otežava osiguravanje optimalne silazne propusnosti. Stoga, algoritmi raspoređivanja dopuštaju mobilnim uređajima da precijene CQI kako bi TBS zadovoljio 10% prosječni BLER u promjenjivim radijskim uvjetima. Raspoređivač bazne stanice prati fluktuacije u kanalnim uvjetima za korisnike u ćeliji i dinamički određuje prikladni TBS kako bi ostvario veću silaznu propusnost za korisnike, sve dok je BLER ispod 10%.

2.3.3. Adaptacija veze

U mnogim slučajevima mobilne komunikacije, posebno u slučaju podatkovnog prometa, nema velike potrebe za omogućavanjem konstantne brzine prijenosa preko određene radio veze. Umjesto toga, iz korisničke perspektive, brzine prijenosa omogućene preko radijskog sučelja bi trebale biti što veće moguće u tom trenutku. Čak i u slučajevima konstantnih brzina kao što je prijenos glasa ili videa, varijacije u brzinama prijenosa nisu problem sve dok je prosječna brzina prijenosa konstantna. Za prijenos podataka s nekonstantnim brzinama prijenosa, umjesto kontrole odašiljačke snage, u LTE sustavu se koristi adaptacija veze zvana dinamička kontrola brzine (engl. DRC – *Dynamic Rate Control*). DRC ne cilja na održavanje konstantne brzine prijenosa radio veze, bez obzira na nepredvidljiva stanja kanala nego je brzine prijenosa dinamički prilagođena

kako bi se nadoknadili nepredvidljivi kanalni uvjeti. U povoljnim kanalnim uvjetima, brzina prijenosa je povećana i obratno. Stoga, brzina prijenosa ostaje najveća moguća u određenom trenutku i to zbog prilagodbe brzine prijenosa R, a ne odašiljačke snage P.

U sustavima prije LTE mreže, koristila se prilagodba odašiljačke snage za uspostavu konstante brzine prijenosa. Na slici 2.14. dana je usporedba prilagodbe odašiljačke snage (Slika 2.14a) i prilagodbe brzine prijenosa (Slika 2.14b)



Sl.2.14. a) Kontrola snage b) kontrola brzine [2]

Može se zaključiti da je kontrola brzine efikasnija nego kontrola snage. Kontrola brzine implicira da pojačalo snage odašilje punom snagom u svakom trenutku i stoga je efikasno iskorišteno [2, str. 87]. Pri kontrolni snage dolazi do prilagodbe snage odašiljanja i samim time je odašiljačka snaga manja od maksimuma. U praksi, brzina prijenosa radio veze se kontrolira izborom modulacijske sheme i/ili brzine kodiranja kanala.

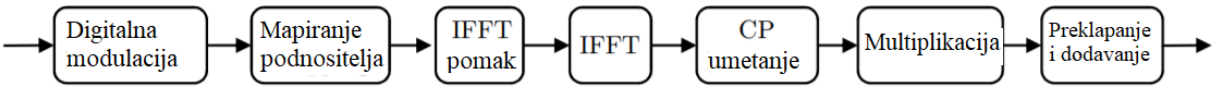
3. ZRAČNO SUČELJE

3.1. Digitalna bežična komunikacija

U ovom potpoglavlju se opisuju principi prijenosa i prijema radijskog signala u LTE sustavima. Objasniti će se principi modulacije i prijema signala te se prikazuje kako se primljeni signal degradira u višestaznom okruženju zbog slabljenja (engl. *fading*) i interferencije među simbolima (engl. *inter-symbol interference*). Nakon toga će se opisati tehnike koje se koriste za smanjenje broja pogrešaka u primljenom signalu: FEC (engl. *Forward Error Correction*), retransmisija i HARQ (engl. *Hybrid Automatic Repeat Request*).

3.1.1. Odašiljanje signala

Bežični komunikacijski LTE sustava se sastoji od digitalnih prijemnika i predajnika (Slika 3.1.).



Sl.3.1. Putanja arhitekture za LTE OFDM modulator u silaznoj vezi [32]

Modulator modulira prijenosni signal (engl. *carrier*) koristeći jednu od modulacijskih shema, pri čemu mijenja parametre prijenosnog signala (amlitudu i fazu) u ovisnosti o ulaznom toku bita. LTE koristi četiri modulacijske sheme. BPSK (engl. *Binary Phase Shift Keying*) šalje bit po bit, koristeći dva stanja koja predstavljaju početnu fazu od 0° i 180°, ili amplitudu signala od +1 ili -1. Ova se modulacijska shema koristi za ograničeni broj kontrolnih tokova, ali se ne koristi za odašiljanje prometnih podataka. 16-QAM (engl. *16 Quadrature Amplitude Modulation*) šalje četiri bita odjedanput, koristeći 16 stanja koja imaju različite amplitude i faze. Slično tome, 64-QAM šalje šest bitova odjedanput uz korištenje 64 različitih stanja, tako da je brzina slanja podataka šest puta veća nego pri korištenju BPSK modulacijske sheme. Nakon modulacije s jednom od modulacijskih shema, ulazni podatci prolaze kroz cijelu arhitekturu digitalnog LTE predajnika. Svaki od navedenih dijelova modulatora sa slike 3.1. će se objasniti kroz rad.

3.1.2. Prijem signala

U bežičnom komunikacijskom sustavu, signal se širi pri prostiranju od predajnika do prijemnika, tako da je prijemna snaga P_R manja nego odašiljačka snaga P_T. Gubitci propagacije ili gubitci puta (engl. *path loss*) PL je omjer tih spomenutih snaga:

$$PL = \frac{P_T}{P_R} \qquad (3\text{-}1)$$

Ukoliko signal putuje kroz prazan prostor, onda na udaljenosti r od odašiljača, signal okupira sfernu površinu s područjem od $4\pi r^2$. Gubitci propagacije su tada proporcionalni s r^2. U mobilnoj mreži, signal može biti apsorbiran i reflektiran od strane objekata kao što su zgrade ili tlo, što uvelike utječe na gubitke propagacije. Eksperimentalno je dokazano [4, str. 49] da su gubitci propagacije u mobilnoj mreži ugrubo proporcionalni s r^m, gdje je m tipično između 3.5 i 4.

Da su gubitci propagacije jedini koji utječu na signal, to ne bi bio problem. Prijemni signal je izobličen i zbog termalnog šuma te interferencije od strane drugih odašiljača [4, str. 50]. Ovi efekti znače da prijemnik ne može u potpunosti točno procijeniti amplitudu i fazu odaslanog signala. Prijemnik adresira ovaj problem na sljedeći način. U fazi estimacije simbola izvlači amplitudu i fazu iz nadolazećeg signala u obliku realnih brojeva. Demodulator koristi tu informaciju za procjenu primljenih bitova. Ukoliko su šum i interferencija dovoljno veliki, bit 1 može poprimiti vrijednost 0 i obrnuto, vodeći tako do pogrešaka u prijemniku. Razina pogrešaka ovisi o vrijednosti SINR (engl. *Signal To Interference Plus Noise Ratio*) u prijemniku. U brzim modulacijskim shemama kao što su 64-QAM, signal može biti odaslan na velik broj načina, koristeći stanja koja su u konstelacijskom dijagramu blizu jedno drugome. Kao rezultat, 64-QAM je podložan pogreškama i može se koristiti samo u slučaju kad je vrijednost SINR visoka. Suprotno tome, QPSK ima samo par stanja tako da je manje podložna pogreškama i može biti uspješno korištena i pri nižim SINR vrijednostima. LTE koristi to tako što dinamički bira između različitih modulacijskih shema: koristi 64-QAM pri visokim SINR vrijednostima, ali se vraća na 16-QAM ili QPSK pri niskim SINR vrijednostima kako bi se smanjio broj pogrešaka.

3.1.3. Tehnike višestrukog pristupa

Do sada opisane tehnike rade dobro pri komunikaciji jedan na jedan. U mobilnoj mreži, bazna stanica mora odašiljati na veliki broj različitih uređaja istovremeno. Uspijeva to tako što dijeli resurse zračnog sučelja, a ta tehnika se naziva tehnika višestrukog pristupa.

Mobilni komunikacijski sustavi koriste par različitih tehnika višestrukog pristupa. FDMA (engl. *Frequency Division Multiple Access*) se koristila u prvoj generaciji analognih sustava. U ovoj tehnologiji, svaki mobilni uređaj prima prijenosnu frekvenciju, koja se razdvaja od drugih frekvencija koristeći analogne filtere. U TDMA (engl. *Time Division Multiple Access*) tehnologiji, mobilni uređaji primaju informaciju s iste prijenosne frekvencije, ali u različito vrijeme [28].

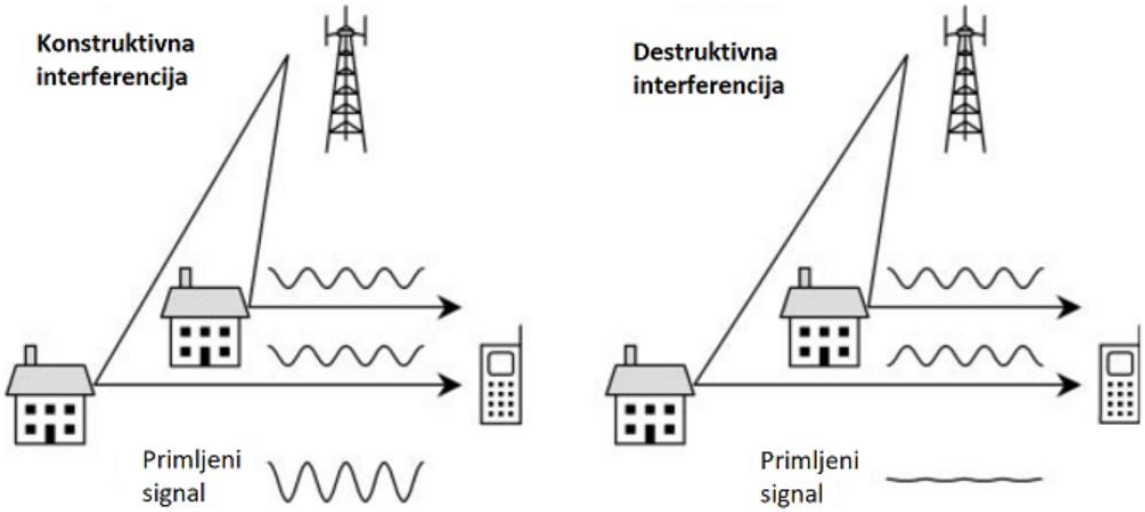
GSM koristi kombinaciju tih dvaju tehnologija, u kojoj svaka ćelija ima više nositelja frekvencije koje se dijele između osam različitih mobilnih uređaja. LTE koristi drugačiju kombinaciju tih tehnologija koja se naziva OFDMA (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), koja će biti detaljnije obrazložena u sljedećem poglavlju. Treća generacija komunikacijskih sustava koriste potpuno drugačiju tehnologiju, znanu kao CDMA (engl. *Code Division Multiple Access*). U ovoj tehnologiji, mobilni uređaji primaju istu prijenosnu frekvenciju u isto vrijeme, ali su signali označeni upotrebom kodova koji omogućavaju mobilnim uređajima da raspoznaju i izdvoje svoj ciljani signal od drugih. LTE koristi par koncepata CDMA tehnologije, ali samo pri slanju nekih kontrolnih signala.

Mobilni komunikacijski sustavi mogu raditi u različitim odašiljačkim načinima rada. Ukoliko koriste FDD (engl. *Frequency Division Duplex*), bazna stanica i mobilna stanica odašilju i primaju u isto vrijeme, ali koristeći različite nositelje frekvencije. Ako se pak koristi TDD (engl. *Time Division Duplex*), oni odašilju i primaju na istoj frekvenciji, ali u različito vrijeme. U FDD načinu rada, širina pojasa za silaznu i uzlaznu vezu je fiksna i često ista. To je pogodno za prijenos glasovne komunikacije, u kojima su brzine prijenosa podataka u silaznoj i uzlaznoj vezi jako slične. U TDD načinu rada, sustav može prilagoditi koliko će vremena alocirati za silaznu, a koliko za uzlaznu vezu. To je pogodno za aplikacije kao što je pretraživanje po webu, u kojem silazne brzine prijenosa mogu biti znatno veće od brzina prijenosa korištenih u uzlaznoj vezi. LTE podržava oba načina rada. Ćelija može koristiti ili FDD ili TDD način rada.

3.1.4. Upravljanje pogreškama

Gubitci propagacije i šum nisu jedini problemi pri prijenosu signala u mobilnim mrežama. Od predajnika do prijemnika signal može doći po više različitih putanja zbog refleksije od zemlje i raznih objekata, ogiba oko rubova zgrada i na krovovima te raspršenja na neravnim površinama. Kao rezultat superpozicije dijelova signala koji prelaze različite puteve i dolaze na prijemnik s različitim fazama, gubici snage mogu biti značajno veći nego kod prostiranja radio vala samo

direktnom zrakom. Takvi gubitci se nazivaju gubitci višestaznog prostiranja. U prijemniku, nadolazeće zrake se mogu superponirati na više načina što je prikazano na slici 3.3. Ukoliko su signali koji dolaze po različitim putanjamau fazi (ili s malom razlikom u fazi), ukupan signal je pojačan te je ta situacija znana kao konstruktivna interferencija. Ukoliko je razlika u fazi blizu 180^0, rezultat je destruktivna interferencija u kojoj se zrake poništavaju. Destruktivna interferencija može smanjiti snagu signala na vrlo niske razine, što se još naziva i slabljenje (engl. *fading*).



Sl.3.3. Generiranje konstruktivne interferencije, destruktivne interferencije i slabljenja u višestaznom okruženju [4, str. 54]

Ukoliko se mobilni uređaj kreće s jednog mjesta na drugo, geometrija zrake se mijenja s čime se ujedno i mijenja obrazac interferencije iz konstruktivne u destruktivnu i obrnuto. Slabljenje signala je stoga, funkcija vremena (Slika 3.4a). Amplituda i faza primljenog signala se značajnije mijenjaju u vremenskim intervalima koji su definirani vremenom koherencije ili povezanosti, T_c , koje se može računati kao:

$$T_c \approx \frac{1}{f_D} \tag{3-2}$$

gdje je:

- f_D – Doplerova frekvencija (zbog kretanja mobilnog uređaja) [29]

$$f_D = \frac{v}{c} f_C \tag{3-3}$$

gdje su:

- f_C – frekvencija nositelja
- v – brzina mobilnog uređaja
- c – brzina svjetla ($3x10^8\ ms^{-1}$)

Ukoliko se prijenosna frekvencija promijeni, valna duljina radio vala se također mijenja. To također utječe na promjenu obrasca interferencije između destruktivne i konstruktivne tako da je slabljenje signala funkcija i frekvencije (Slika 3.4b). Pri tome unutar pojasa koherencije, B_c, neće biti većih varijacija amplitude i faze. Pojas koherencije se može izračunati kao:

$$B_c \approx \frac{1}{\tau} \tag{3-4}$$

gdje je:

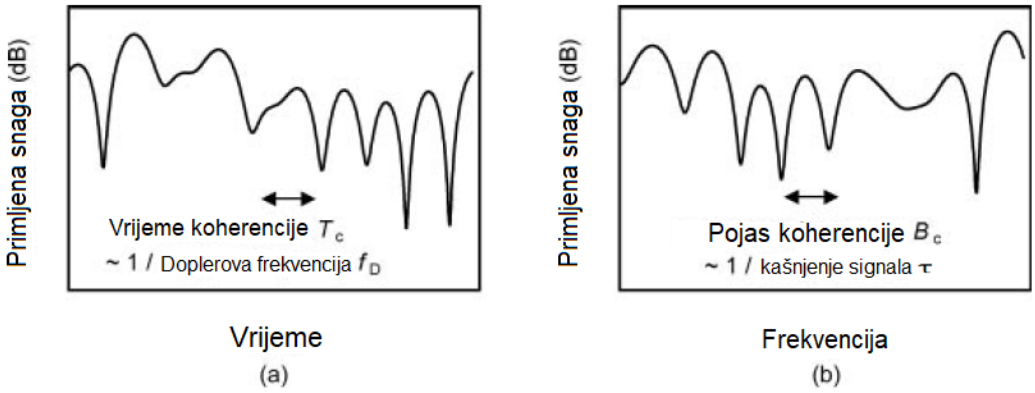
- τ – maksimalno kašnjenje signala zbog višestaznog prostiranja (razlika u vremenima pristizanja najranije i najkasnije zrake)
- B_c – pojas koherencije

$$\tau = \frac{\triangleq \mathrm{L}}{c} \tag{3-5}$$

gdje su:

- $\triangleq$L – razlika između duljine puta najdulje i najkraće zrake
- c – brzina svjetla ($3x10^8\ ms^{-1}$)

Ukoliko su duljine puta najdulje i najkraće zrake različite, tada će simboli koji se prenose tim zrakama stići u različito vrijeme u prijemnik. To znači da prijemnik može početi primati simbol s kraće zrake dok još uvijek prima prethodni simbol zrake duljeg puta. Ta dva simbola će se onda preklapati u prijemniku i tako uzrokovati još jedan problem znan kao ISI (engl. *Inter-Symbol Interference*).



Sl.3.4. Slabljenje kao funkcija a) vremena i b) frekvencije [4, str. 54]

Kako se povećava brzine prijenosa, tako i trajanje simbola opada te problem postaje značajno gori. ISI je stoga najveći problem u komunikacijskim sustavima s velikim brzinama prijenosa.

3.1.4.1. FEC

Najvažnija tehnika za rješavanja ovih problema je FEC (engl. *Forward Error Correction*). U ovoj tehnici, poslana informacija je predstavljena korištenjem kodne riječi koja je tipično do dva ili tri puta duža nego originalna informacija. Ti dodatni bitovi predstavljaju redundantne podatke pomoću kojih će prijemnik obnoviti originalnu informaciju. Kodna brzina je broj informacijskih bitova podijeljen s brojem poslanih bitovi. Promjene u kodnoj brzini imaju sličan utjecaj kao i promjene u modulacijskoj shemi. Ukoliko je kodna brzina niska, tada poslani podatci sadrže mnogo redundantnih bitova. To omogućuje prijemniku da ispravi veliki broj pogrešaka te da ispravno funkcionira i pri niskim SINR vrijednostima, ali pri tome je količina primljenih informacija mala. Istom logikom vrijedi da ako je kodna brzina blizu 1, tada je brzina slanja podataka veoma visoka, ali je sustav podložan pogreškama. LTE, kao i kod odabira modulacijske sheme, određuje kodnu brzinu na osnovu SINR vrijednosti.

3.1.4.2. ARQ

ARQ (engl. *Automatic Repeat Request*) je još jedna tehnika upravljanja pogreškama. U ovoj tehnici predajnik uzima blok informacijskih bitova i koristi ih kako bi izračunao dodatne bitove znane kao CRC (engl. *Cyclic Redundancy Check*). Dodatne bitove dodaje originalnom informacijskom bloku te ih onda odašilje u dva seta podataka. Prijemnik odvaja dva polja i koristi informacijske bitove kako bi izračunao očekivane CRC bitove. Ukoliko su vrijednosti poslanih i primljenih CRC bitova isti, tada je informacija ispravno primljena te ARQ šalje potvrdu o pozitivnom prijemu natrag prema predajniku. Ukoliko su CRC bitovi različiti, zaključuje da je došlo do pogreške i šalje negativnu potvrdu kao zahtjev za retransmisijom. Sustav često koristi kombinaciju FEC i ARQ tehnika za uklanjanje pogrešaka.

3.1.4.3. Hibridni ARQ

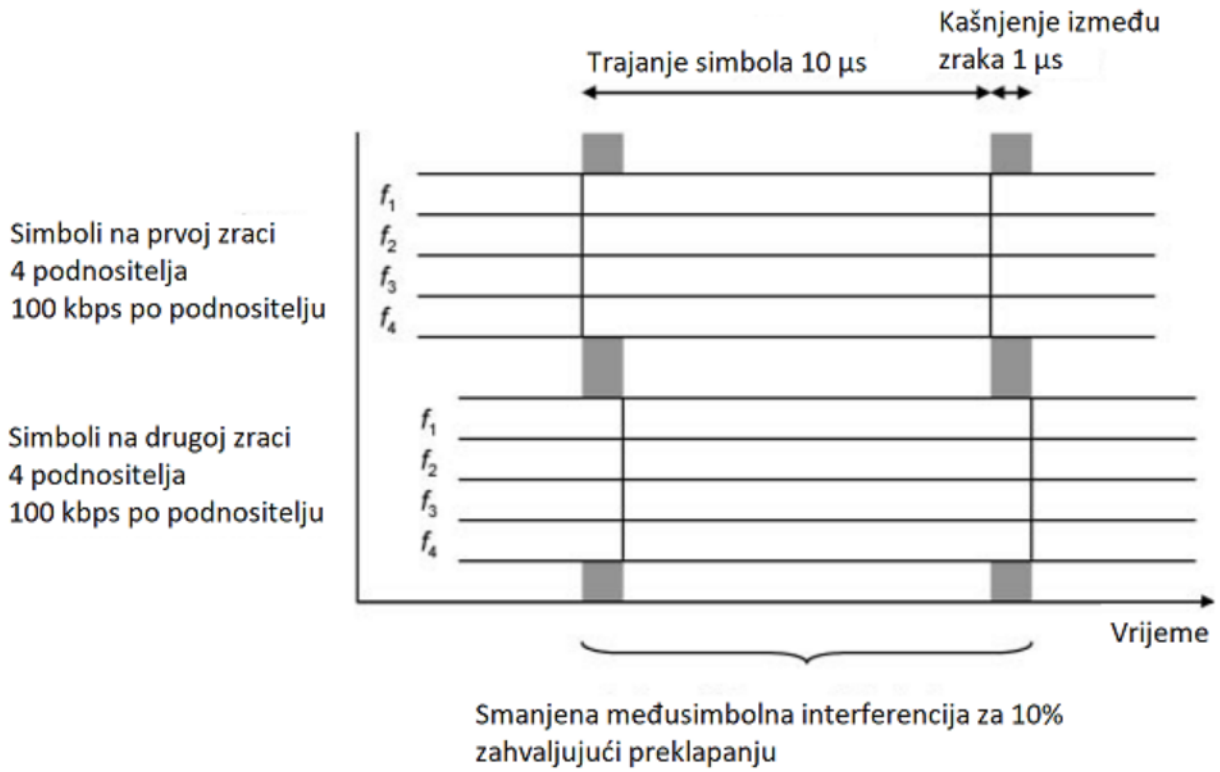
ARQ tehnika ima jedan nedostatak: ukoliko blok podataka ne prođe CRC provjeru, prijemnik odbacuje čitavi blok, bez obzira da li sadrži i neoštećeni dio podataka. Kako bi se iskoristilo taj dio podataka, osmišljena je tehnika HARQ (engl. *hybrid ARQ*). U ovoj tehnici, predajnik šalje podatke kao i prije. Prijemnik demodulira nadolazeće podatke te stvara kodnu riječ koja predstavlja sve one bite koji su se uklonili. Ta kodna riječ se onda provjerava putem FEC tehnike i tehnike detekcije pogrešaka, te se šalje potvrda natrag u predajnik. Ukoliko se ne zadovolji CRC, predajnik ponovno šalje podatke. U ponovnom prijemu podataka, prijemnik kombinira podatke iz prvog prijema te podatke iz retransmisije i tako povećava energiju signala te ujedno i povećava vjerojatnost prolaska CRC provjere. Problem je u tome da ako je originalna transmisija jako oštećena od interferencija, potreban je veći broj retransmisija kako bi se prevladala ta interferencija. Kako bi se spriječilo veće kašnjenje u prijenosu, HARQ je najčešće konfiguriran da odustane od retransmisije nakon par pokušaja. LTE implementira ove tehnike tako da koristi HARQ na fizičkom sloju i kao sigurnost koristi osnovnu ARQ shemu u kontrolnom radio link protokolu.

3.2. OFDMA

U LTE sustavima za odašiljanje i prijem signala koristi se OFDMA (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). OFDMA obavlja iste funkcije kao i ostale tehnike višestrukog pristupa, tako što omogućava baznoj stanici komuniciranje s više različitih mobilnih uređaja u isto vrijeme. Nadalje, također je i veoma koristan način smanjenja problema frekvencijsko selektivnog slabljenja te ISI pogreške U nastavku će biti opisani osnovni principi OFDMA te kako se tehnika primjenjuje u mobilnoj ćelijskoj mreži. Također će se predstaviti i modificirana tehnika radio odašiljanja znana kao SC-FDMA (engl. *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) koja se koristi u LTE uzlaznoj vezi. OFDMA se koristi u još nekim radio komunikacijskim sustavima, kao što su lokalna bežična mreža (engl. *Wireless Local Area Networks*) IEEE 802.11, verzije a,g i n, WiMAX (IEEE 802.16), digitalna televizija te digitalni radio (DAB - eng. *Digital Radio Broadcasting*). SC-FDMA se po prvi puta i jedino koristi u LTE sustavu.

3.2.1. OFDM

Kako bi se smanjio problem interferencije, umjesto da informaciju šalje kao jedan tok, OFDM predajnik dijeli informaciju u veći broj paralelnih pod-tokova (engl. *sub-streams*) te šalje svaki tok preko različite frekvencije znane kao podnositelj (engl. *sub-carrier*). Ukoliko ukupna brzina prijenosa podataka ostane ista, tada je na svakom od nositelja brzina prijenosa podataka manja čime se dobiva dulje trajanje svakog simbola, a time i smanjeni nivo pogrešaka. Slika 3.4. prikazuje jednostavan primjer u kojem je originalni tok podataka podijeljen na 4 pod-toka s frekvencijama od f_1 do f_4.

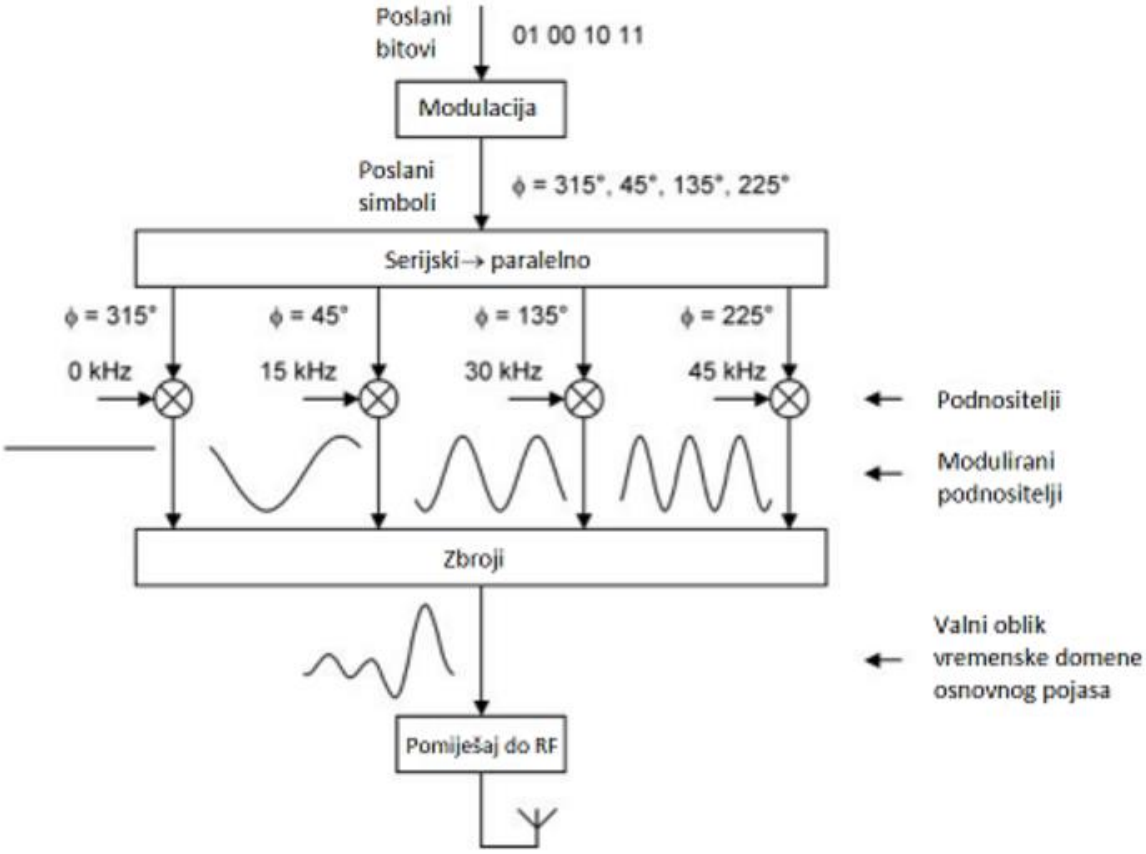


Sl.3.4. Smanjenje interferencije između simbola pomoću podnositelja [4, str. 62]

Ukupna brzina prijenosa ovog toka je 400 ksps (engl. *kilosample(s) per second*), kašnjenje između zraka je 1 µs, a trajanje simbola je 2.5 µs tako da se simboli u prijemniku preklapaju i do 40% što dovodi do značajne interferencije i pogrešaka na prijemniku. Sada je brzina prijenosa na svakom podnositelju 100 ksps tako da se trajanje simbola povećava na 10 µs. Ukoliko kašnjenje između zraka ostane jednako s iznosom od 1 µs, tada se preklapanje zraka smanjuje za 10%. Ovim postupkom smanjuje se ISI za četvrtinu. U praksi, LTE može koristiti veliki broj podnositelja, s maksimalnim brojem do 1200, što smanjuje interferenciju do zanemarivih vrijednosti.

Slika 3.5. prikazuje blok dijagram analognog OFDM predajnika. Dijagram sadrži neke pojednostavljene dijelove u svrhu ilustracije osnovnih principa ove tehnike. Predajnik prima tok bita s viših slojeva protokola i pretvara ih u simbole koristeći odabranu modulacijsku shemu (primjer: QPSK). Pretvarač serijskog u paralelni tok uzima blok simbola, točnije 4 u prikazanom primjeru, te svakim simbolom modulira jedan od podnositelja nekom od modulacija faze i amplitude LTE koristi fiksni razmak između podnositelja, a to je 15 kHz tako da podnositelju u

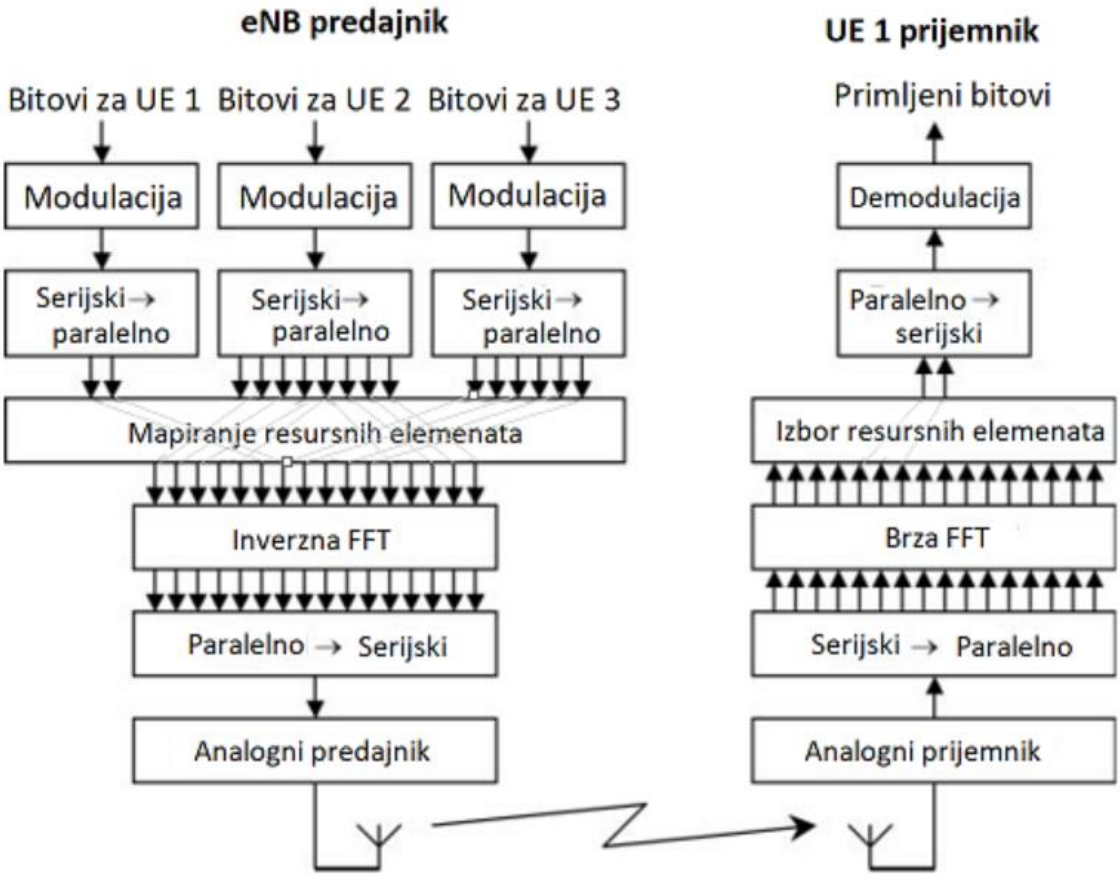
primjeru na slici 3.5 imaju frekvencije od 0, 15, 30 i 45 kHz. Duljina trajanja simbola je recipročna razmaku između podnositelja i iznosi 66.7 μs. To znači da podnositelj od 15 kHz ima jedan period tijekom 66.7 μs duljine trajanja simbola, podnositelj od 30 kHz dva perioda, podnositelj od 45 kHz tri perioda.



Sl.3.5. Koraci obrade u pojednostavljenom analognom OFDM predajniku [6, str. 63]

Rezultat su četiri sinusna vala na četiri različite frekvencije , čije amplitude i faze predstavljaju kombinacije osam poslanih bita. Spajanjem sinusnih valova zajedno, generira se ukupan signal, koji je reprezentacija izlaznog signala, ali na niskoj frekvenciji. Ovaj se signal u digitalnom OFDM predajniku generira na digitalnoj razini, a izlazni signal na prijenosnoj frekvenciji se generira D/A pretvorbom i miješanjem s odgovarajućim signalom visoke frekvencije.

Modulacija i generiranje OFDM signal na nižoj frekvenciji odvija se u digitalnoj domeni primjenom inverzne diskretne Fourierove transformacije IDFT (engl. *Inverse Discrete Fourier Transform*). DFT se može implementirati iznimno brzo korištenjem brze Fourierove transformacije FFT (engl. *fast Fourier transform*) [7]. Ova transformacija omogućava generiranje OFDM signala na računalno najefikasniji način.



Sl.3.6. Blok dijagram OFDM predajnika i prijemnika [6]

Na slici 3.6. prikazano je formiranje signala u silaznoj vezi tako da je predajnik bazna stanica, a prijemnik mobilni uređaj. Bazna stanica šalje tokove bita za tri različita mobilna uređaja. Modulira svaki tok posebno, s mogućnošću korištenja različitih modulacijskih shema za svaki tok. Nakon modulacije svaki tok simbola prosljeđuje u pretvarač iz serijskog u paralelno, kako bi podijelio tok na više pod-tokova. Broj pod-tokova po uređaju ovisi o brzini prijenosa podataka: glasovne aplikacije mogu koristiti mali broj pod-tokova dok video aplikacije obično moraju

koristiti puno više. REM (engl. *Resource Element Mapper*) uzima svaki pod-tok pojedinačno i bira podnositelje na kojima će ih poslati. Dobivena informacija je amplituda i faza za svaki podnositelj kao funkcija frekvencije. Daljnjom obradom kroz IFFT (engl. *Inverse* FFT), računaju se komponente u fazi i kvadraturne komponente koje odgovaraju valnom obliku u vremenskoj domeni. Taj valni oblik prolazi D/A pretvorbu, filtrira se i miješanjem prebacuje na radio frekvenciju za odašiljanje.

Mobilni uređaj invertira proces. Sve kreće s uzorkovanjem nadolazećeg signala, filtriranjem istog i pretvaranjem u osnovni frekvencijski pojas. Tada podatci prolaze kroz FFFT (engl. *Forward* FFT) kako bi se obnovila amplituda i faza svakog podnositelja. Bazna stanica preko kontrolnih kanala šalje informaciju mobilnom uređaju koje podnositelja treba demodulirati i to čini uz pomoć tehnike raspoređivanja (engl. *scheduling*). Koristeći stečeno znanje, mobilni uređaj odabire podnositelja i obnavlja odaslanu informaciju dok odbacuje ostale nepotrebne podnositelje.

3.2.2. SC-OFDMA

OFDMA radi odlično u silaznoj LTE vezi no ima jedan nedostatak: snaga odaslanog signala je podložna velikim varijacijama. Te varijacije u snazi mogu proizvesti probleme pojačalu snage u predajniku. Ukoliko je pojačalo linearno, tada je izlazna snaga proporcionalna ulaznoj i samim time valni oblik je željenog oblika. U slučaju da je pojačalo nelinearno, izlazna snaga više nije proporcionalna ulaznoj i valni oblik je izobličen. Svako izobličenje valnog oblika signala izobličiti će i spektar signalatako da se spekar signala može proširiti u susjedne frekvencijske pojaseve i izazvati interferenciju u drugim prijemnicima. U silaznoj vezi, predajnici baznih stanica su veliki i skupi uređaji koji mogu izbjeći taj problem koristeći skupa pojačala snage koja su veoma blizu linearnosti. U uzlaznoj vezi, mobilni odašiljač mora biti jeftin tako da nema tu opciju. Zbog toga je OFDMA neiskoristiva u LTE uzlaznoj vezi.

Varijacije u snazi se pojavljuju zbog jedan na jedan mapiranja između simbola i podnositelja. Ukoliko bi predajnik pomiješao simbole prije nego modulira podnositelje, tada bi se moglo tako podesiti modulacije da se smanje varijacije u snazi. Na primjer, umjesto da se šalju dva simbola x_1 i x_2 na dva podnositelja, mogao bi se poslati njihov zbroj $x_1 + x_2$ na jednom podnositelju i njihovu razliku $x_1 - x_2$ na drugom. Primjenom različitih računskih operacija može se naći ona operacija koja minimizira varijacije u snazi poslanog signala. Prigodna računska

operacija je još jedna Fourierova transformacija, FFFT (engl. *forward* FFT). Primjenom FFFT na OFDMA signal generira se SC-FDMA (engl. *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) signal [30].

U procesu obrade signala, postoje tri razlike između SC-FDMA i OFDMA. Glavna razlika je ta da SC-FDMA predajnik uključuje dodatnu FFFT što smanjuje varijacije u snazi izlaznog signala. U prijemniku se provodi inverzna transformacija primjenom IFFT bloka.

Druga razlika je ta da se ova tehnika koristi u uzlaznoj vezi. Zbog toga, mobilni predajnik može koristiti samo neke od podnositelja dok drugi imaju vrijednost nula i dostupni su za korištenje drugim mobilnim uređajima u istoj ćeliji.

Naposljetku, svaki mobilni uređaj odašilje koristeći jedan kontinuirani blok podnositelja, bez unutarnjih praznina. To se implicira iz naziva SC (engl. *Single Carrier*) i ključno je kako bi se varijacije u snazi spustile na najmanje moguće razine.

3.2.3. OFDMA u mobilnoj ćelijskoj mreži

OFDMA je tehnika koju koristi bazna stanica za dinamičko dijeljenje resursa između svih mobilnih uređaja.

U OFDMA, bazna stanica dijeli resurse između mobilnih uređaja tako što odašilje na različitim frekvencijama u različitim vremenima kako bi se zadovoljili zahtjevi individualnih aplikacija. Bazna stanica također može i reagirati na frekvencijsko slabljenje i na osnovu toga premjestiti podnositelje s mobilnog uređaja koji prima veoma jak signal. Preraspodjelom podnositelja kao odgovor na promjene u obrascu slabljenja, OFDMA predajnik može uvelike smanjiti frekvencijsko i vremensko slabljenje.

3.2.3.1. Ponovno korištenje frekvencije

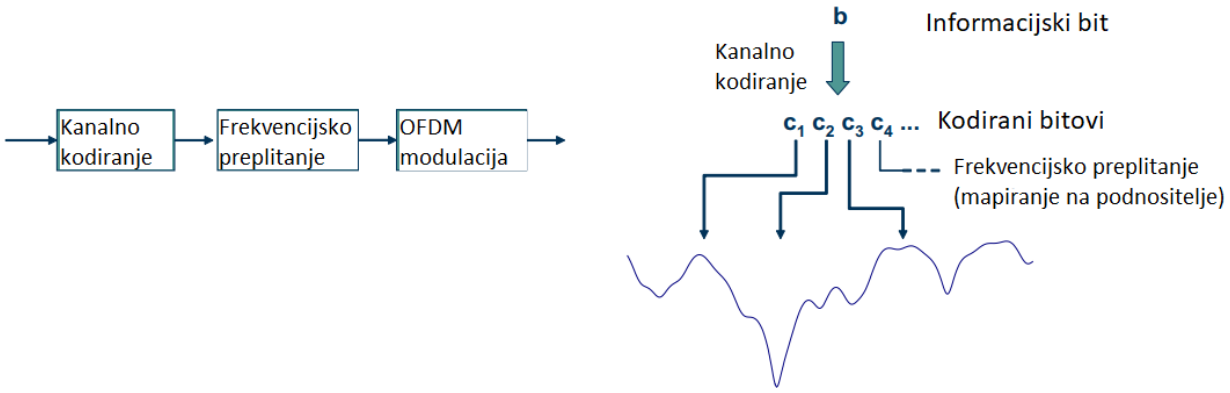
Koristeći tehniku opisanu iznad, jedna bazna stanica može slati informacije velikom broju mobilnih uređaja. No, mobilni komunikacijski sustav ima također i veliki broj baznih stanica tako da svaki mobilni uređaj primat signal s jedne bazne stanice uz prisustvo interferencije s drugih baznih stanica.

U LTE mreži, svaka bazna stanica može slati u istom frekvencijskom pojasu, ali također može i preraspodijeliti podnositelje na fleksibilan način unutar pojasa koristeći tehniku djelomičnog ponovnog korištenja frekvencije (engl. *fractional frequency re-use*). Svaka bazna

stanica kontrolira jednu ćeliju i svaka ćelija dijeli isti frekvencijski pojas. Unutar tog pojasa, svaka bazna stanica odašilje obližnjim mobilnim uređajima koristeći iste podnositelje s frekvencijom f_0. Ovaj princip radi odlično jer su mobilni uređaji blizu svojih baznih stanica i primljeni signal je dovoljno jak kako bi prevladao sve interferencije. Udaljeni mobilni uređaji primaju mnogo slabiji signal koji je pod velikim utjecajem interferencija susjednih baznih stanica. Kako bi se to izbjeglo, susjedne ćelije mogu odašiljati tim mobilnim uređajima koristeći drugi set podnositelja. Pola frekvencijskog pojasa je rezervirano za obližnje uređaje, dok je ostatak podijeljen u tri seta frekvencija, f_1, f_2 i f_3, na uslugu udaljenim uređajima. Dobiveni faktor ponovnog korištenja je 67%.

3.2.3.2. Zaštitno kodiranje

Zaštitno (kanalno) kodiranje se koristi u većini slučajeva digitalne komunikacije i posebice u mobilnim komunikacijama. Kanalno kodiranje implicira da se svaki informacijski bit odašilje preko većeg broja kodnih bitova. Ukoliko se ti kodni bitovi tada, preko modulacijskih simbola, mapiraju na set OFDM podnositelja koji su dobro distribuirani preko cijelog transmisijskog pojasa OFDM signala (Slika 3.7.), svaka informacija će biti podvrgnuta frekvencijskom diverzitiju. Distribucija kodnih bitova u frekvencijskoj domeni često se naziva frekvencijsko preplitanje (engl. *frequency interleaving*).



Sl.3.7. Kanalno kodiranje u kombinaciji s frekvencijskim preplitanjem u svrhu frekvencijskog diverzitija u OFDM prijenosu [2, str.40]

Zaštitno kodiranje (u kombinaciji s frekvencijskim preplitanjem) je esencijalni dio OFDM prijenosa kako bi se ostvario frekvencijski diverziti u frekvencijski selektivnom kanalu.

3.2.3.3. Estimacija kanala

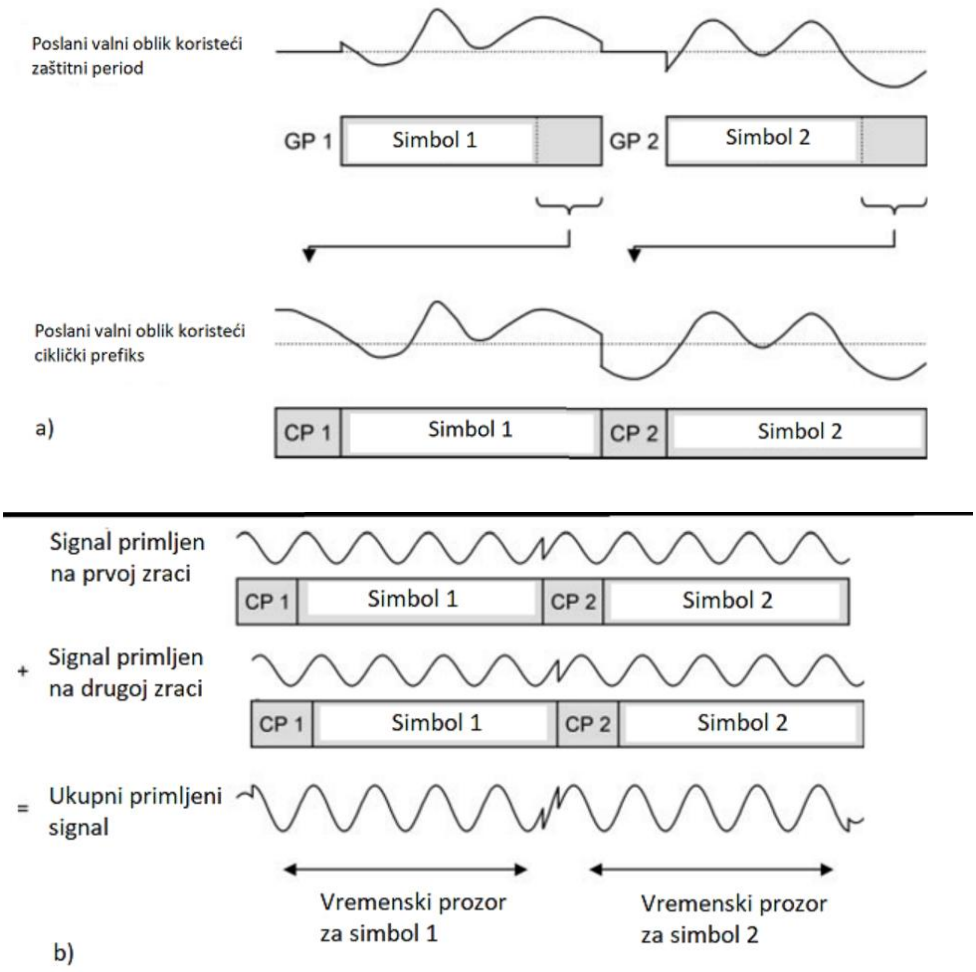
Svaki podnositelj može doći do prijemnika s potpuno proizvoljnom amplitudom i fazom. Kako bi se to riješilo, OFDMA predajnik ubacuje referentne simbole u poslani tok podataka. Prijemnik mjeri dolazne referentne simbole, uspoređuje ih s poslanim i koristi rezultat kako bi uklonio promjene u amplitudi i fazi u nadolazećem signalu.

U prisustvu frekvencijsko-selektivnog slabljenja, promjene amplitude i faze su funkcije frekvencije, ali i vremena i to utječe na različite podnositelje na različite načine. Kako bi se osiguralo da prijemnik može izmjeriti sve potrebne informacije, LTE referentni simboli su raspršeni preko cijele vremenske i frekvencijske domene. Referentni simboli zauzimaju otprilike 10% poslanog toka podataka.

3.2.3.4. Umetanje cikličkog prefiksa

Uz sve do sada navedene tehnike koje osiguravaju robusnost LTE signala, koristi se i tehnika koja omogućava rješavanje međusimbolne interferencije i zove se CPI (engl. *Cyclic Prefix Insertion*). Osnovna ideja je da se ubaci zaštitni period GP (engl. *guard period*) prije svakog OFDM simbola . Unutar zaštitnog perioda ne šalje, odnosno ne dekodira se OFDM simbol.Ukoliko je zaštitni period dulji od raspršenja kašnjenja, tada će prijemnik dekodirati samo jedan simbol točnije neće doći do preklapanja sa prethodnim simbolima koji su došli s kašnjenjem zbog višestaznog prostiranje.

LTE koristi spomenutu napredniju tehniku CPI. U njoj, predajnik kreće s umetanjem zaštitnog perioda prije svakog simbola, ali onda kopira podatke s kraja sljedećeg simbola i njima popunjava zaštitni period. To ne mijenja efikasnost same tehnike, a sprječava proširenje spektra koje se događa ako se u zaštitnom periodu ne šalje nikakav signal. Na slici 3.8a možprikazana je razlika između zaštitnog i cikličkog perioda,a na slici 3.8b je prikazan princip rada cikličnog prefiksa na jednom podnositelju.



Sl.3.8. a) razlika između zaštitnog i cikličkog perioda b) princip rada cikličkog prefiksa na jednom podnositelju

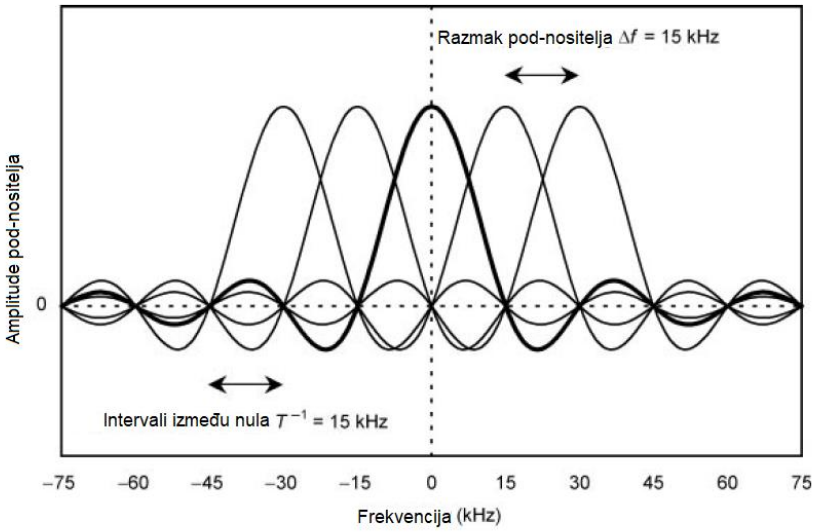
U višestaznom okruženju, prijemnik hvata višestruke kopije poslanog signala u više vremenskih perioda. Svi oni se zbrajaju na prijemnoj anteni dajući sinusni val s istom frekvencijom ali različitom amplitudom i fazom. Bez obzira na to, prijelaz s jednog simbola na drugi se još uvijek odvija glatko zbog cikličkog prefiksa. Prijemnik obrađuje primljeni signal unutar vremenskog prozora čija je duljina jednaka duljini trajanja simbola. Ukoliko je vremenski prozor ispravno postavljen, tada je primljeni signal jednak poslanom, bez ikakvih pogrešaka i podložan je samo promjeni amplitude i faze. Taj dio prijemnik rješava tehnikom estimacije kanala. . LTE koristi ciklički prefiks duljine 4.7 μs. To odgovara maksimalnoj razlici puteva od 1.4 km između zraka s najduljim i najkraćim putem što je i više nego dovoljno čak i za najveće i najgušće ćelije.

Ciklički prefiks smanjuje brzinu prijenosa za otprilike 7%, ali je to zanemarivo s obzirom da u potpunosti uklanjanja međusimbolnu interferenciju.

3.2.3.5. Korištenje frekvencijske domene

U analognoj FDMA, mobilni uređaj detektira signal na jednom podnositelju uz prisutnost interferencije svih ostalih. Kako bi se minimizirala količina interferencije, podnositelji moraju biti odvojeni široki zaštitnim pojasevima. Zbog korištenja tih pojaseva, sustav je koristio frekvencijsku domenu na neefikasan način.

U OFDMA, unutar vremenske domene, modulacijski procesi stvaraju promjene u amplitudi i fazi na podnositeljima u intervalima duljine simbola T, što je jednako 66.7 μs. To definira pojasnu širinu moduliranog podnositelja na T^{-1}. Slika 3.9. prikazuje amplitude signala poslanih na susjednim podnositeljima.



Sl.3.9. Amplitude signala poslane na susjednim podnositeljima, kao funkcija frekvencije [4, str. 71]

U spektar svakog podnositelja prolazi kroz nulu u regularnim intervalima vrijednosti T^{-1}= 15 kHz. Spektar moduliranog podnositelja se može opisati i funkcijom:

$$x^{-1} \sin x \tag{3-6}$$

Intervali između susjednih podnositelja su udaljeni za razmak podnositelja Δf. Ukoliko je:

$$\Delta f = T^{-1} \tag{3-7}$$

tada se podnositelji preklapaju u frekvencijskoj domeni, ali se vršni odziv jednog podnositelja preklapa sa nulama svih ostalih. Kao rezultat toga, mobilni uređaj može uzorkovati jednog podnositelja te može izmjeriti amplitudu i fazu bez interferencije s drugim podnositeljima bez obzira na to što se nalaze tako blizu jedni drugima. Za podnositelje s ovim svojstvom kaže se da su ortogonalni. To svojstvo ortogonalnosti u OFDMA znači da ista koristi frekvencijsku domenu na veoma efikasan način i to je jedan od glavnih razloga zašto je spektralna efikasnost u LTE puno veća nego u prijašnjim mobilnim telekomunikacijskim sustavima. Također i opravdava da je vrijednost trajanja simbola T jednaka recipročnoj vrijednosti razmaka podnositelja Δf.

3.2.3.6. Odabir razmaka između podnositelja

Vrijednosti i argumenti u prethodnom odjeljku vrijede ukoliko je mobilni uređaj stacioniran. Ukoliko se mobilni uređaj kreće, tada su dolazne zrake pomaknute na više ili niže frekvencije i to zbog Dopplerovog pomaka frekvencije [29].

U višestaznom okruženju, mobilni uređaj se može kretati tako da mu dio radio vala dolazi u susret što će povećati frekvenciju dolaznog signala, a da dio zraka dolazi iz smjera suprotnog kretanju što će smanjiti frekvenciju dolaznog signala. Kao rezultat, podnositelji nisu jednostavno pomaknuti na više ili niže frekvencije. Umjesto toga, oni su raspršeni kroz raspon frekvencija. Ukoliko mobilni uređaj pokuša detektirati vršni odziv jednog podnositelja, tada će pokupiti interferenciju s drugih zbog Dopplerova pomaka. Samim time, gubim se svojstvo ortogonalnosti OFDM signala.

Količina interferencije je još uvijek prihvatljiva ukoliko je Dopplerov pomak puno manji od razmaka podnositelja. Stoga se razmak između podnositelja mora odabrati prema slijedećem pravilu:

$$\Delta f \gg f_D \tag{3-8}$$

LTE je dizajniran da radi s maksimalnim brzinama mobilnog korisnika od 350 km/h i s maksimalnom frekvencijom nositelja kanala od otprilike 3.5 GHz što daje maksimalni Dopplerov pomak od približno 1.1 kHz. To je 7% razmaka između podnositelja čime se zadovoljava pravilo 3-8.

Postoji još jedno ograničenje u vezi LTE parametara. Kako bi se smanjio utjecaj međusimbolne interferencije, mora se odabrati duljina trajanja simbola T po sljedećem pravilu:

$$T \gg \tau \tag{3-9}$$

gdje je τ maksimalno kašnjenje signala u višestaznom okruženju. LTE obično radi u okruženju s maksimalnim raspršenjem kašnjenja od približno 4.7 μs. Ta vrijednost je 7% od vrijednosti trajanja simbola 66.7 μs tako da zadovoljava ograničenje 3-9.

Može se zaključiti sljedeće: ukoliko je razmak između podnositelja mnogo manji od 15 kHz, tada će sustav biti sklon interferenciji između podnositelja pri velikim brzinama mobilnih uređaja. Ukoliko je frekvencijski razmak mnogo veći od 15 kHz, tada će sustav biti sklon međusimbolnoj interferenciji u velikim ćelijama s višestaznim prostiranjem radio vala. Izabrana vrijednost je kompromis između ova dva ekstrema.

3.3. Tehnike višestrukih antena

LTE je dizajniran kako bi i bazna i mobilna stanica mogle koristiti višestruke antene za odašiljanje i prijem radijskog signala. Najpoznatija tehnika je raspodjela tj. diverziti (engl. *diversity*) koji može biti frekvencijski, prostorni, vremenski i polarizacijski. Najčešće se koristi prostorni diverziti koji omogućava smanjivanje gušenja signala tako što koristi veći broj antena na odašiljačkoj, prijemnoj ili na obje strane.

U prostornom multipleksiranju (engl. *spatial multiplexing*), i predajnik i prijemnik koriste veći broj antena kako bi se povećale brzine prijenosa podataka. Kako bi se povećala pokrivenost ćelije primjenjuje se digitalno oblikovanje snopa (glavne latice) dijagrama zračenja antena (engl. *beamforming*) za što se koriste sustavi s većim brojem antena na baznoj stanici.

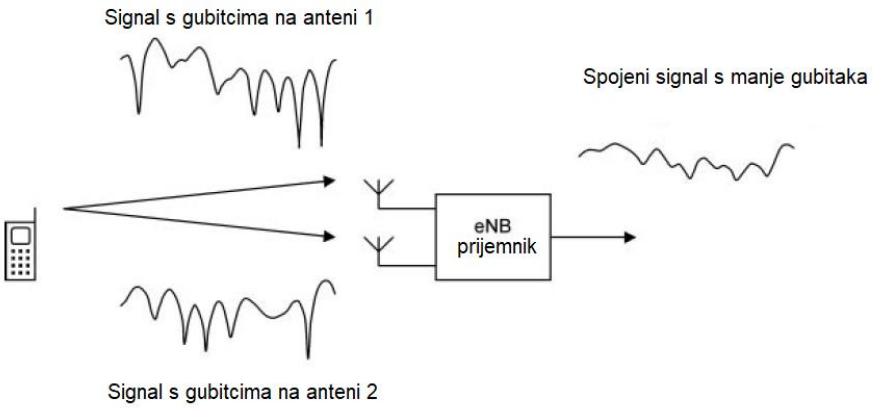
Prostorno multipleksiranje je često opisano i kao sustav s višestrukim ulazima i višestrukim izlazima – MIMO (engl. *multiple input multiple output*). Postoji razlika između MIMO koncepta i prostornog diverzitija. Iako oba koncepta koriste višestruke antene i na odašiljačkoj i na prijemnoj

strani, sustav MIMO preko različitih parova antena prenosi različite informacije dok se kod prostornog diverzitija preko tih parova antena prenosi ista informacija.

3.3.1. Prostorni diverziti

3.3.1.1. Prijemni diverziti

Prijemni diverziti je najčešće korišten u uzlaznoj vezi na način prikazan na slici 3.10. Bazna stanica koristi dvije antene za prijem dvije kopije primljenog signala. Signal dolazi do prijemnih antena s drugačijim faznim pomakom, no to se može ukloniti već spomenutom estimacijom kanala. Bazna stanica onda može zbrojiti primljene signale , bez ikakve destruktivne interferencije među njima.



Sl.3.10. Smanjivanje slabljenja signala koristeći prijemni diverziti [4]

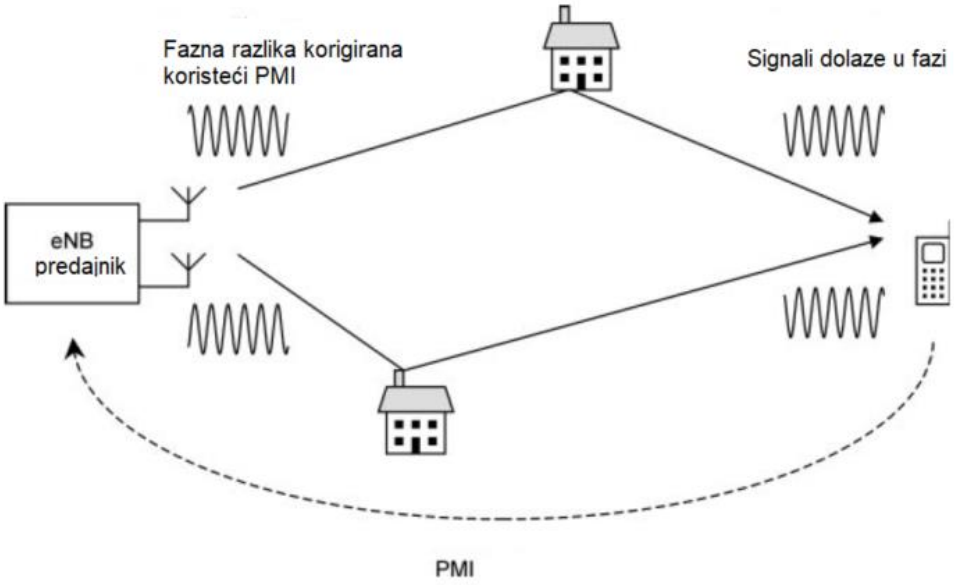
Oba signala su sastavljena od većeg broja manjih zraka koje su podložne slabljenju. Ukoliko oba individualna signala slabe u istom trenutku, tada će snaga kombiniranog signala biti mala. Ali, ako su antene prostorni dovoljno udaljene (par valnih duljina na frekvenciji nositelja) tada će se slabljenja dogoditi u različitim trenucima. Samim time se smanjuje količina slabljenja u kombiniranom signalu što u praksi znači manju stopu pogrešaka.

Bazna stanica obično ima više od jedne prijemne antene. U LTE sustavu, testne specifikacije mobilnih uređaja pretpostavljaju da mobilni uređaji koriste dvije prijemne antene tako da se prijemni diverziti može koristiti i u silaznoj kako i u uzlaznoj vezi. Mobilne antene su

u pravilu bliže jedna drugoj nego na baznim stanicama tako da smanjuje koristi prijemnog diverzitija. No, situacija se može popraviti korištenjem antena koje primaju dva polarizacijsko neovisna dolazna signala (polarizacijski diverziti).

3.3.1.2. Odašiljački diverziti

Odašiljački diverziti smanjuje količinu slabljenja koristeći dvije ili više antena na predajniku. Veoma je sličan kao i prijemni diverziti, ali s jednim krucijalnim problemom: signali se zbrajaju na jednoj prijemnoj anteni što može dovesti do destruktivne interferencije. Postoje dva načina kako se može riješiti ovaj problem: odašiljački diverziti zatvorene petlje (slika 3.11) i odašiljački diverziti otvorene petlje.

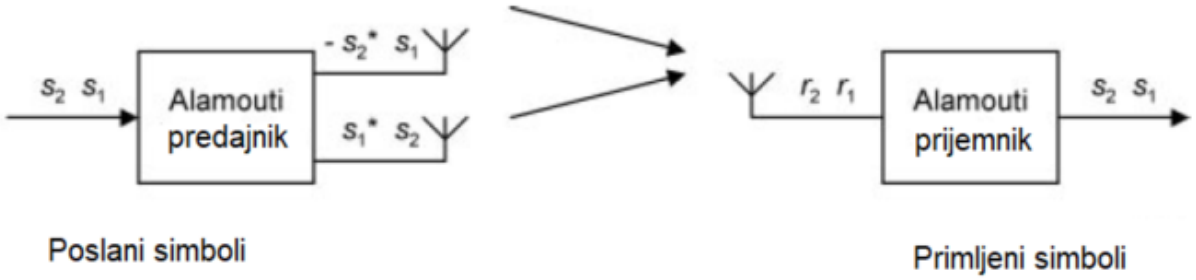


Sl.3.11. Princip rada odašiljačkog diverzitija zatvorene petlje [4, str. 79]

Na slici 3.11. prikazan je princip rada odašiljačkog diverzitija zatvorene petlje. U njemu, predajnik šalje dvije kopije signala na očekivani način, ali također primjenjuje i zakretanje faze na jednom ili oba signala prije odašiljanja. Na taj se način osigurava da oba signala stignu do prijemnika u fazi i to bez rizika od pojave destruktivne interferencije. Promjena faze je određena indikatorom PMI (engl. *Precoding Matrix Indicator*) kojeg računa prijemnik i definira predajnik. Jednostavni PMI može indicirati dvije opcije: ili pošalji oba signala bez faznog pomaka ili pošalji drugi signal s faznim pomakom od 180°. Ukoliko prva opcija vodi do destruktivne interferencije,

tada će druga sigurno raditi ispravno. Najbolji izbor PMI također ovisi i o poziciji mobilnog uređaja jer će mobilni uređaji s velikom brzinom kretanja imati i često promijenjene PMI vrijednosti. U takvim slučajevima, PMI može uvesti velika kašnjenja u sustav tako da odašiljački diverziti zatvorene petlje nije preporučljiv već se koristi odašiljački diverziti otvorene petlje.

Slika 3.12. prikazuje implementaciju odašiljačkog diverzitija otvorene petlje koji je znan još i kao Alamoutijeva tehnika [19]. U ovoj tehnici predajnik koristi dvije antene za slanje dva simbola, označenih s s_1 i s_2 u dva vremenska koraka. U prvom koraku, predajnik šalje s_1 s prve antene i s_2 s druge, dok u drugom koraku šalje s_2 s prve antene i s_1 s druge. Prijemnik tada može napraviti dva uspješna mjerenja primljenog signala koja odgovaraju dvjema različitim kombinacijama simbola s_1 i s_2. Prijemnik rješava dobivenu jednadžbu kako bi obnovio dva poslana simbola. Postoje dva ograničenja: obrazac slabljenja mora ostati skoro pa isti između prvog i drugog vremenskog koraka i dva signala moraju slabiti u istom trenutku.



Sl.3.12. Princip rada Alamoutijeve tehnike za odašiljački diverziti otvorene petlje [4, str. 80]

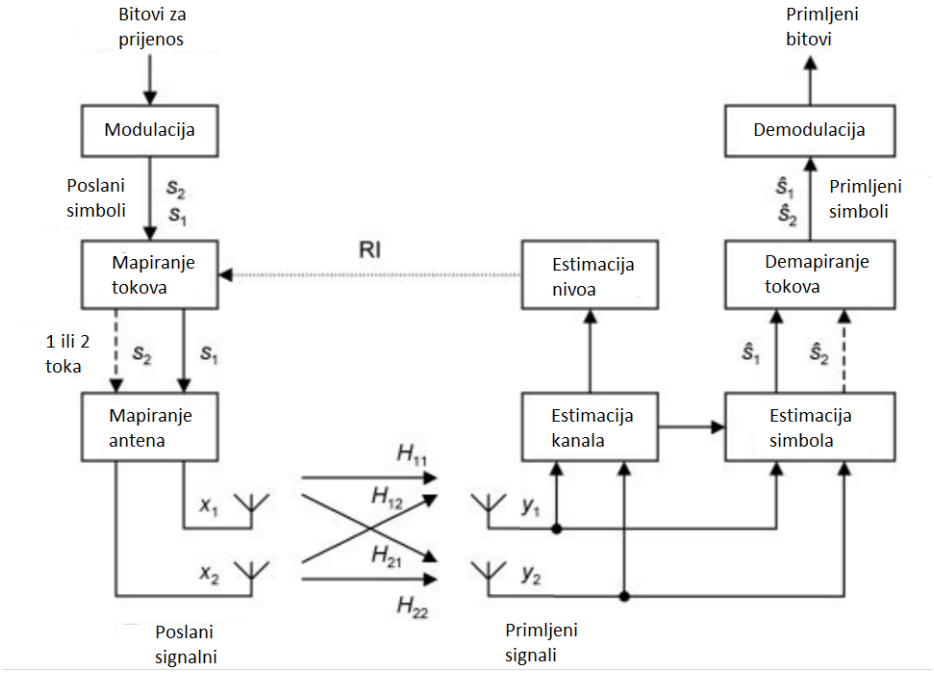
Ova tehnika se koristi u LTE sustavu s četiri antene (2 x 2) za diverziti otvorene petlje.

3.3.2. MIMO

Prostorno multipleksiranje ima drugačiju primjenu od diverzitija. Ukoliko i predajnik i prijemnik imaju višestruke antene, tada se mogu uspostaviti višestruki paralelni tokovi podataka između njih, kako bi se povećala brzina prijenosa. U sustavu gdje je N_T broj odašiljačkih antena i N_R broj prijemnih antena (prostorno multipleksirani sustav $N_T \times N_R$), vršna vrijednost brzine prijenosa podataka je proporcionalna s $\min(NT, NR)$.

3.3.2.1. Prostorno multipleksiranje otvorene petlje

OL-MIMO (engl. *Open-Loop Multi-Input, Multiple-Output*) način podržava odašiljački diverziti i prostorno multipleksiranje otvorene petlje. Kako bi se ostvarili dobitci propusnosti u slučajevima gdje je SNR (engl. *Signal-To-Noise Ratio*) vrlo visok, koristi se MIMO tehnika u silaznoj vezi. U prostornom multipleksiranju, svaka odašiljačka antena šalje različiti tok podataka na veći broj prijemnih antena. Tokovi se rekonstruiraju odvojeno od strane mobilnog uređaja. Dobitci prostornog multipleksiranja ne zahtijevaju dodatni spektralni pojas ili snagu.



Sl.3.13. Princip rada 2x2 OL-MIMO sustava [4, str. 83]

Rezultati prostornog multipleksiranja mogu, u teoriji, umnožiti propusnost preko odašiljačkog nivoa. Pri višestaznom širenju, signali s različitih odašiljačkih antena idu različitim putevima kako bi dosegle UE u različitim vremenima. Kako bi se ostvarila obećana propusnost u MIMO sustavima, planiranje i izgradnja mreže mora zadovoljiti određeni kriteriji: okruženje u kojoj se nalazi mreža mora biti pogodno za višestazno širenje signala. Signal sa svake odašiljačke antene se reflektira od različitih objekata te svaki od njih stiže na sve prijemne antene u sustavu. Ukoliko je razmak između prijemnih i odašiljačkih antena dovoljno velik, svaki zasebni tok signala gubi na snazi neovisno o ostalim tokovima i tako se smanjuje utjecaj slabljenja. Ova vrsta okruženja

osigurava da se podatci prostorno prenose preko dobrih kanalnih uvjeta kako bi se svi podatci mogli uspješno dekodirati na prijemniku,

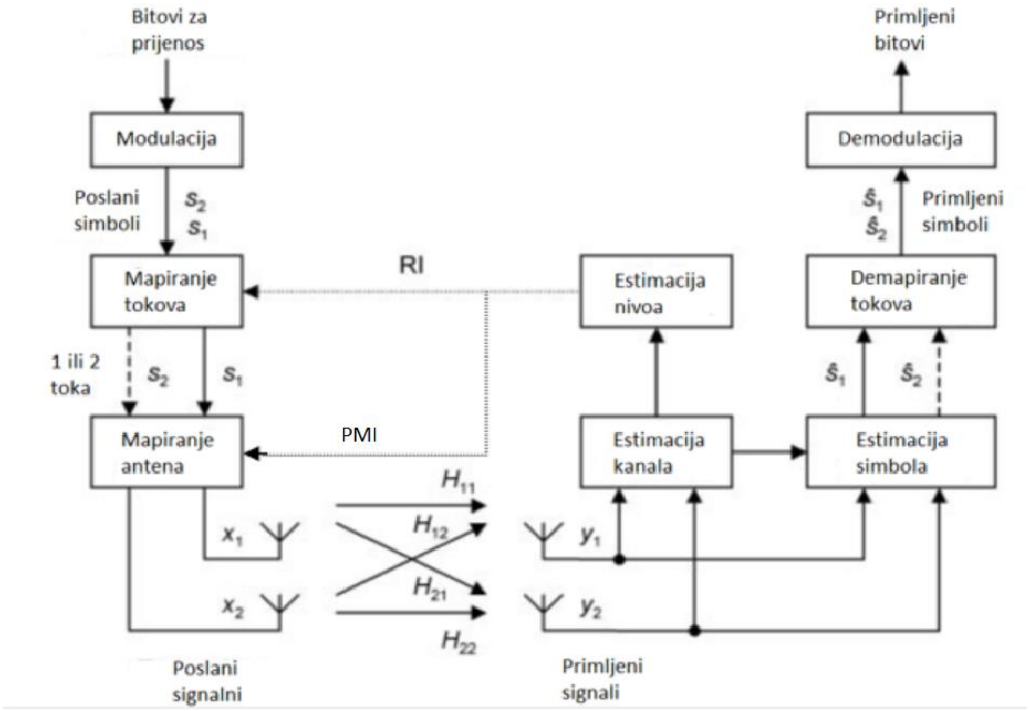
U 2x2 MIMO sustavima (Slika 3.13.), dobitci multipleksiranja nivoa dva (engl. *Rank-2*) koji povećavaju propusnost se uglavnom ostvaruju u dobrim kanalnim uvjetima s malo interferencije u višestaznom okruženju. Pri dobrim kanalnim uvjetima, tokovi podataka su istovremeno poslani i pri tome se ukupna odašiljačka snaga dijeli između većeg broja tokova. Stoga, ukupni SNR se također dijeli između tokova što rezultira u manjoj SNR vrijednosti za svaki individualni podatkovni tok. Ukoliko je ukupni SNR nizak, svaki podatkovni tok će također imati veoma mali SNR i propusnost svakog toka će biti niska. To indicira da će se dobitci prostornog multipleksiranja za MIMO ostvariti u regijama s velikom SNR vrijednosti te velika propusnost se može ostvariti za svaki individualni tok.

U prostornom multipleksiranju otvorene petlje, mreža prima minimalne informacije od UE: indikator nivoa RI (engl. *Rank Indicator*) i CQI (vidi 2.3.2.1.). RI indicira broj tokova koji mogu biti procesuirani u trenutnim kanalnim uvjetima i pri odabranoj modulacijskoj shemi. Mrežni raspoređivač koristi CQI pri izboru odgovarajuće modulacijske i kodne sheme za kanalne uvjete. Mreža prilagođava transmisijsku shemu i resurse kako bi se prilagodila prijavljenim indikatorima mobilnih uređaja CQI i RI, i to sve uz prihvatljivi BLER. S druge strane, na rubu ćelije, u regijama s niskom vrijednošću SNR ili u lošem višestaznom okruženju, umjesto povećanja brzine prijenosa ili kapaciteta, MIMO se koristi za povećanje robusnosti prijenosa podataka. U odašiljačkom diverzitiju, MIMO funkcionira kao MISO (engl. *multi-input, single-output*) sustav. Svaka antena odašilje identičan tok podataka tako da prijemnik prima replike istog signala. To povećava SNR na prijemnoj strani i samim time i robusnost podatkovnog prijenosa, posebice u okruženju s puno slabljenja. Obično se dodaje dodatno kodiranje signalima prije slanja kako bi se povećao efekt diverzitija i kako bi se smanjila interferencija između kanala. UE prima signale s odašiljačkih antena i rekonstruira jedan podatkovni tok iz svih višestaznih signala.

3.3.2.2. Prostorno multipleksiranje zatvorene petlje

U LTE sustavu, CL-MIMO ((engl. *Closed-Loop Multi-Input, Multiple-Output*) se odnosi na nivo jedan (engl. *Rank-1*) prostorno multipleksiranje. U radu zatvorene petlje, UE analizira kanalne uvjete svake odašiljačke antene, uključujući i višestazno okruženje. UE zatim izračunava RI te uz njega i PMI (vidi 3.3.1.2.), koji određuje optimalno kodiranje za trenutne kanalne uvjete.

Suprotno je u OL-MIMO koji koristi fiksirani set kodnih matrica kako bi omogućio prostorno multipleksiranje većeg broja tokova za mobilne uređaje koji se kreću veoma brzo. U zatvorenoj petlji, svaki se podatkovni tok obrađuje s prethodnim kodiranjem prije nego se pošalje preko svih odašiljačkih antena. Potrebno je izračunavanje težina za signale koji se odašilju pojedinim antenama te zaokretanje faze. UE omogućuje CQI tako što daje RI i PMI kao povratne informacije za svaki tok. To omogućuje mrežnom raspoređivaču da brzo i efikasno prilagodni prijenos kanalnim uvjetima.



Sl.3.14. Princip rada 2x2 CL-MIMO sustava [4, str. 85]

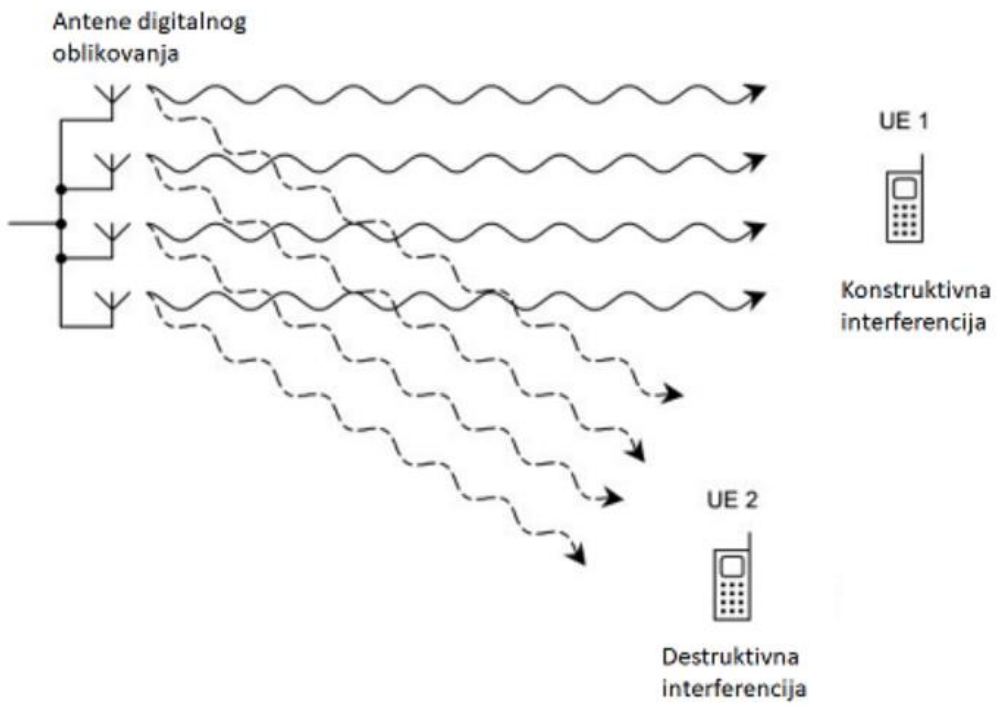
U kanalima s direktnom vidljivosti (LOS – engl. *Line-Of-Sight*) ili u područjima s niskom SNR vrijednošću, dobitci MIMO prostornog multipleksiranja se ostvaruju korištenjem mehanizama nižeg nivoa kao što je prostorno multipleksiranje zatvorene petlje (Rank-1) [30]. U njemu odašiljač šalje samo jedan set podataka na obje odašiljačke antene i stoga prijemnik dekodira iste podatke i time se možda ne povećava propusnost no uvelike se poboljšava pouzdanost dekodiranja te samim time i SNR. CL-MIMO koristi linearnu kodnu matricu za poboljšanje višestaznih uvjeta. Optimalna veličina kodne matrice se odabire u svrhu maksimalnog

kapaciteta uz pomoć povratnih informacija s mreže i mobilnih uređaja. Pomoću tog mehanizma ostvaruje se dodano povećanje u ukupnom SNR-u.

3.3.3. Digitalno oblikovanje

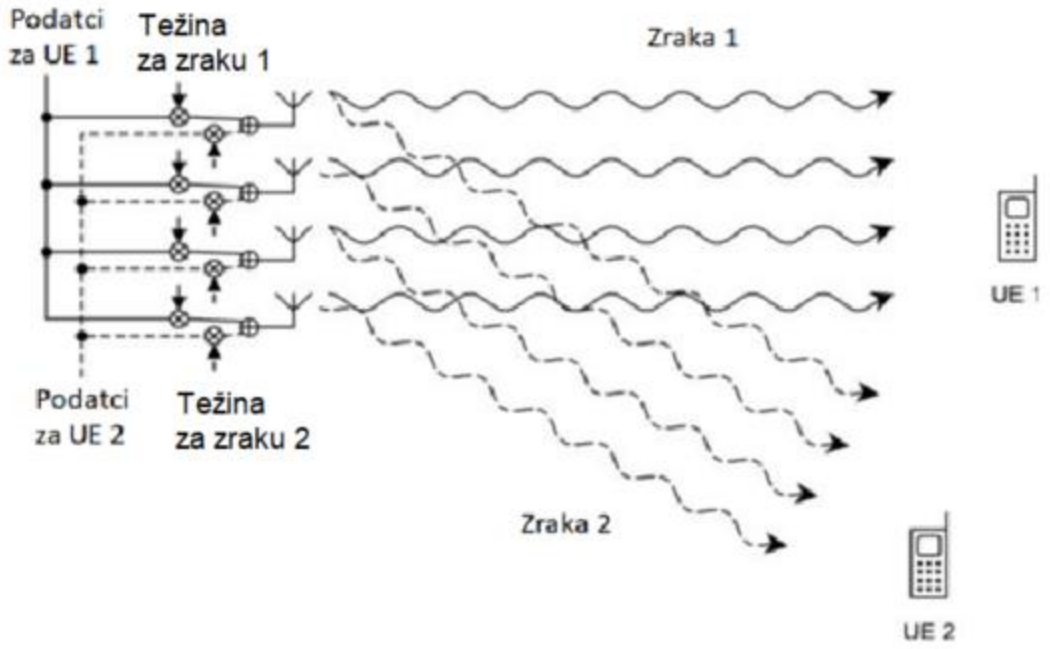
U digitalnom oblikovanju (engl. *beamforming*), bazna stanica koristi veći broj antena na potpuno drugačiji način kako bi povećala pokrivenost ćelije. Taj princip vidimo na slici 3.15. U ovom scenariju, mobilni uređaj UE 1 je veoma daleko od bazne stanice, na liniji vidljivosti i kreće se pod pravim kutom u odnosu na smjer širenja radio vala . Signali sa svake antene dosežu do UE 1 u fazi te postoji konstruktivna interferencija i primljena snaga signala je velika. S druge strane, mobilni uređaj UE 2 je u indirektnoj ravnini i prima signale s različitih antena koji su izvan faze za 180°. Dolazi do destruktivne interferencije i primljena snaga signala je niska. Stoga, odgovarajućim dizajnom višeantenskog sustava te odgovarajućom pobudom usmjerava se smjer maksimalnog zračenja prema UE 1, a nulu usmjeruje prema UE 2. Širina glavne latice dijagrama zračenja antenskog sustava je manja nego širine glavne latice jedne antene i samim time je poslana snaga puno više fokusirana prema UE 1. Kao rezultat toga, domet bazne stanice u smjeru UE 1 je daleko veći nego prije. Promjenom pobude može se promijeniti smjer maksimalnog zračenja. U antenskom sustavu s N antena, može se prilagoditi smjer glavne zrake do N-2 nula ili sporednih zraka.

U OFDMA se može za različite podnositelje stvoriti odašiljački snop za različite smjerove. Na taj se način primjenom digitalnog oblikovanja može komunicirati s većim brojem različitih mobilnih uređaja u istom trenutku koristeći različite podnositelje, bez obzira što su uređaji na potpuno različitim lokacijama. Digitalno oblikovanje najbolje radi ukoliko su antene jedna blizu drugoj. To osigurava veliku korelaciju između poslanih ili primljenih signala. Pri korištenju diverzitija ili prostornog multipleksiranja, antene su udaljene jedna od druge jer su potrebni nekorelirani signali. Bazna stanica zbog toga koristi dva seta antena: zbijeni set antena za digitalno oblikovanje i raširenu set antena za diverziti ili prostorno multipleksiranje.



Sl.3.15. Osnovni principi digitalnog oblikovanja [4, str. 91]

Dvoslojno digitalno oblikovanje (engl. *Dual Layer Beamforming*) prikazano na slici 3.16. je naprednija tehnika u kojoj bazna stanica šalje dva toka različitih podataka u antensko polje. Tada obrađuje podatke koristeći dva različita seta težina za antene i zbraja rezultate prije odašiljanja. Ovim postupkom se stvaraju dva odvojena antenska snopa koji dijele iste podnositelje, ali prenose dva različita seta informacija. Bazna stanica tada može prilagoditi antenske težine kako bi usmjerila zrake na dva različita mobilna uređaja. Čineći to, prvi mobilni uređaj prima konstruktivnu interferenciju sa zrake 1 i destruktivnu interferenciju s zrake 2 te obrnuto. Ovim postupkom bazna stanica udvostručuje kapacitet ćelije.



Sl.3.16. Dvoslojno digitalno oblikovanje koristeći
dva paralelna seta antenskih težina [4, str. 92]

Moguć je i scenariji gdje su obje zrake usmjerene na jedan mobilni uređaj kako bi se udvostručila trenutna brzina prijenosa podataka. U početku ova je tehnika bila ograničena na dva toka podataka (stoga i naziv dvoslojno digitalno oblikovanje) no u novijim izdanjima maksimalni broj neovisnih tokova podataka jednak je broju antena u antenskom polju.

4. LTE simulacija silazne veze

Praktični dio ovog rada odrađen je u simulatoru pod nazivom „Vienna LTE-A system level simulator“ koji je implementiran u objektno-orijentirano okruženje MATLAB [8]. Simulator je moguće koristiti samo u akademske svrhe odnosno ima nekomercijalnu licencu. Njegov bogat set sposobnosti te sposobnost lake prilagodljivosti su doveli do brojnih objavljenih radova od strane znanstvenika po cijelom svijetu. Neki od njih se zasnivaju na studijama o shemama za ćelije s visokom optimizacijom energije, algoritmima za preuzimanje u samooptimizirajućim mrežama, tehnikama za preraspodjelu resursa unutar mreža s femtoćelijama te o komunikaciji dvaju uređaja. U okviru ovog diplomskog rada koristi se simulator silazne veze i postojeći simulacijski scenariji u kojima se mogu mijenjati određeni parametri i tako prilagođavati mrežu različitim zahtjevima i potrebama te ju testirati na željeni način.

4.1. Parametri simulacije

U ovom poglavlju dana je lista parametara koji se mogu konfigurirati, koje su moguće vrijednosti te opis svakog parametra. Zbog složenosti simulatora, objašnjeni su samo oni parametri koji utječu na rezultate simulacije, a izostavljeni su oni koji utječu na prikaz samih rezultata, otklanjanje problema (engl. *debug*), spremanje privremenih rezultata (engl. *cache options*) i slično. Sve simulacije su napravljene u postojećoj (demo) simulaciji, pod nazivom „*tx_mode_3*“ (engl. *transmit mode*) što označava podešavanje parametara odašiljačke strane, a vrijednost 3 predstavlja vrstu multipleksiranja (MIMO), u ovom slučaju OLSM (engl. *Open Loop Spatial Multiplexing*) [8]. Nakon odabira demo simulacije, odabiru se predefinirane postavke koji predstavljaju set različito postavljenih parametara za različite scenarije. Postavke korištene u radu su:

- *tri_sector* – pokrivanje ćelije signalom u tri smjera (sektora)
- *tri_sector_plus_femtocells* – dodavanje dodatnog sloja malih ćelija (femtoćelija)

Postoje još i :

- *tri_sector_tilted* – pokrivanje ćelije signalom u tri smjera uz određeni otklon
- *six_sector_tilted* – pokrivanje ćelije signalom u šest smjerova uz određeni otklon
- *omnidirectional_eNodeBs* – pokrivanje ćelije signalom u svim smjerovima

- *tri_sector_tilted_traffic* – pokrivanje ćelije signalom u tri smjera uz određeni otklon te izbor vrste prometa koja prolazi mrežom

Nakon izbora predefiniranih postavki, konfiguriraju se opći parametri mreže kako bi se postavila mreža u željeni način rada. Parametri oji se mogu konfigurirati su sljedeći:

- *LTE_config.frequency.* – frekvencija na kojoj radi sustav [u Hz]
- *LTE_config.bandwidth.* – širina frekvencijskog pojasa signala. Dozvoljene vrijednosti su 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz i 20 MHz.
- *LTE_config.nTX* – broj odašiljačkih antena
- LTE_config.nRX – broj prijemnih antena
- LTE_config.tx_mode – odašiljački modovi. Moguće vrijednosti:
  - 1 - *single antenna* – jedna antena
  - 2 - *Transmission Diversity (TxD*) – odašiljački diverziti
  - 3 - *Open Loop Spatial Multiplexing (OLSM)*- prostorno multipleksiranje otvorene petlje, *Spatial multiplexing with Large Cyclic Delay Diversity (CDD)* – prostorno multipleksiranje s diverzitijem velike cikličke odgode
  - 4 - *Closed Loop Spatial Multiplexing (CLSM)* – prostorno multipleksiranje zatvorene petlje
  - 5 - *Multiuser MIMO* – višekorisnički MIMO
  - 9 - *Eight Layer Spatial Multiplexing* – osmoslojno prostorno multipleksiranje

- *LTE_config.simulation_time_tti* – trajanje simulacije izraženo u TTIs (engl. *Transmission Time Intervals*)
- *LTE_config.network_geometry* – geometrija mreže. Moguće opcije:
  - *regular_hexagonal_grid* - regularna heksagonalna mreža s fiksnim udaljenostima baznih postaja
  - *stochastic* - stohastična, nasumično određena distribucija baznih postaja s definiranom prostornom gustoćom
  - *hybrid* – hibridna prostorna distribucija baznih postaja s determinističkim i nasumičnim dijelovima

- *predefined* – lokacije baznih postaja unaprijed upisane u posebnoj funkciji koja se poziva pri generiranju mreže

- *LTE_config.map_resolution* – rezolucija mape u metrima po elementu slike.
- *LTE_config.nr_eNodeB_rings* – broj prstenova baznih postaja. 0 prstenova određuje stvaranje samo jedne bazne postaje.
- *LTE_config.minimum_coupling_loss (optional)* – opisuje minimalni gubitak signala [dB] između bazne postaje i korisničkih uređaja ili između dva korisnička uređaja i definira se kao minimalni gubitak zbog udaljavanja uključujući dobitke antena. Predložene vrijednosti su 70 dB za urbana područja i 80 dB za ruralna.

- *LTE_config.macroscopic_pathloss_model* – izbor makroskopskog propagacijskog modela. Mogući makroskopski propagacijski modeli su:

- *free space* – slobodni prostor. Više se koristi u svrhu testiranja nego za korištenje u simulaciji [9].

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^{\alpha} \qquad [8] \ (4\text{-}1)$$

gdje je:

- L – propagacijski gubitci u dB
- d – udaljenost u m
- λ – valna duljina u m
- α – koeficijent korišten u propagacijskim izračunima

- *cost231* – COST 231 propagacijski model [10]. Moguće opcije:
  - *urban micro* – mikroćelijska LOS i NLOS propagacija osnovana na COST 231 Walfish-Ikegami model [9]
  - *urban macro* – urbana makroćelijska propagacija osnovana na COST 231 proširenom Hata modelu [11]
  - *suburban macro* – suburbana makroćelijska propagacija osnovana na COST 231 proširenom Hata modelu.
- *TS36942* – prilagođeni propagacijski model, implementiran u simulator. Moguće okoline:

- *urban*

$$L = 40\,(1 - 4 * 10^{-3} * Dhb) * log_{10}(R) - 18log_{10}(Dhb) + 21log_{10}(f) + 80dB \qquad (4\text{-}2)$$

gdje je:

- *L* – propagacijski gubitci u dB
- *R* – udaljenost bazne stanice i korisničkog uređaja u km
- *f* – frekvencija nositelja u Mhz
- *Dhb* – visina antene bazne stanice u m, mjerene od prosječne visine krova

- *suburban*

$$L = 69.55 + 26.16log_{10}(f) - 13.82 * log_{10}(Hb) + \big(44.9 - 6.55 * log_{10}(Hb)\big)log_{10}(R) - 4.78\big(log_{10}(f)\big)^2 + 18.33 * log_{10}(f) - 40.94 \qquad (4\text{-}3)$$

gdje je:

- *L* – propagacijski gubitci u dB
- *R* – udaljenost bazne stanice i korisničkog uređaja u km
- *f* – frekvencija nositelja u MHz
- *Hb* – visina antena bazne stanice u m, mjerene od tla

- *TS25814* – prilagođeni propagacijski model, implementiran u simulator.

$$L = I + 37.6 * log_{10}(R) \qquad (4\text{-}4)$$

gdje je:

- *L* – propagacijski gubitci u dB
- *R* – udaljenost bazne stanice i korisničkog uređaja u km
- *I* – *I* = 128.1 za *f* = 2 GHz i *I* = 120.9 za *f* = 900 MHz

- *LTE_config.eNodeB_tx_power* – maksimalna odašiljačka snaga bazne postaje. Preporučene vrijednosti su:
  - 43 dBm (20 W) za 1.25 i 5 MHz frekvencijski pojas

- 46/49 dBm (40/80 W) za 10 i 20 MHz frekvencijski pojas

- *LTE_config.shadow_fading_type* - vrsta zasjenjenja (slabljenje signala uslijed zasjenjenja)
  - *claussen* – generira lognormalno distribuiranu 2D prostorno koreliranu mapu zasjenjenja
  - *none* – nema mape zasjenjenja. Zbog jednostavnosti, implementira se mapa zasjenjenja s konstantnom vrijednosti 0 dB
- *LTE_config.shadow_fading_map_resolution* – rezolucija propagacijske mape zasjenjenja (metar/element slike).
- *LTE_config.shadow_fading_n_neighbors* – određuje broj susjednih postaja koje algoritam uzima u izračun kada stvara prostorno koleriranu mapu zasjenjenja. Moguće vrijednosti su 4 ili 8.
- *LTE_config.shadow_fading_mean* - srednja vrijednost (μ) lognormalne distribucije slabljenja
- *LTE_config.shadow_fading_sd* – standardna devijacija (σ) lognormalne distribucije slabljenja
- *LTE_config.r_eNodeBs* - korelacija zasjenjenja između sektora. Korelacija između sektora je postavljena na 1 (jednake mape zasjenjenja svih sektora)

Slabljenje signala zbog varijacija u prijemnoj snazi između bazne postaje i priključenih korisničkih uređaja.

- *LTE_config.channel_model.type* - odabir PDP-a (engl. *Power Delay Profile*) za korištenje u generiranju kanala. Svi modeli su unaprijed definirani u svrhu istraživanja. Definiraju svojstva kanala za različite okoline djelovanja. Moguće opcije su [12]:
  - *PedA* - ITU pješački (engl. *Pedestrian*) A kanal
  - *PedB* - ITU pješački B kanal
  - *extPedB* - Proširenje ITU kanalnog modela za širokopojasne (OFDM) sustave
  - *VehA* - ITU prometni (engl. *Vehicular*) A kanal
  - *VehB* - ITU prometni B kanal
  - *winner+* - Winner (engl. *Wireless World Initiative New Radio*) II+ [13] - kanalni modeli koji prate stohastičku geometriju kanalnog modeliranja koja omogućava stvaranje virtualno neograničenog broja dvosmjernih radio kanalnih modela

- *TU* - Typical urban channel [14] – TU je specifični kanalni model za urbana područja u kojem su propisane vrijednosti od strane 3GPP-a. Koristi se u radu za simulacije u urbanim i suburbanim područjima.

- *LTE_config.channel_model.trace_length* – duljina kanalne trase u sekundama
- *LTE_config.channel_model.correlated_fading* – „true“ ili „false“. Aktivira ili deaktivira vremensku korelaciju slabljenja (fedinga) unutar kanala.

Postavke korisničkih uređaja:

- *LTE_config.UE.receiver_noise_figure* – faktor šuma prijemnika izražena u dB. Preporučena vrijednost je 9 dB.
- *LTE_config.UE.thermal_noise_density* – gustoća termičkog šuma u dBm/Hz. Tipična vrijednost je -174 dBm/Hz. Za SISO sustav se koristi vrijednost -131.59 dBm/Hz a za MIMO sustav -134.89 dBm/Hz.
- *LTE_config.UE_distribution* – određuje na koji će se način rasporediti korisnički uređaji (UE) u područjima interesa (ROI – engl. *region of interest*)
  - *constant UEs per cell* – generiranje konstantnog broja korisničkih uređaja po ćeliji.
  - *LTE_config.radial* – smještanje korisničkih uređaja u serije koncentričnih krugova oko svake bazne postaje.
- *LTE_config.UE_distribution_radii* – vektor koji određuje radijus svakog UE kruga oko baznih postaja.
- *LTE_config.UE_per_eNodeB* – broj korisničkih uređaja po ćeliji.

- *LTE_config.UE_distribution_nUEs* – skalar koji određuje broj UE-a po krugu ili vektor koji određuje broj UE-a za svaki krug
- *LTE_config.UE_speed* – brzina kojom se kreću korisnički uređaji. Izražena u metar/sekunda. Prosječna brzina iznosi 5 km/h = 5/3.6 = 1.38 m/s

Postavke baznih stanica:

- *LTE_config.antenna_gain_pattern* – Definiranje dijagrama zračenja antena pridruženih za svaki sektor. Moguće opcije su:

- *berger:*

$$A(\theta) = -min\left[12\left(\frac{\theta}{70°}\right)^2, 20dB\right], -180 \leq \theta \leq 180 \quad (4\text{-}5)$$

- *TS 36.942*:

$$A(\theta) = -min\left[12\left(\frac{\theta}{65°}\right)^2, 20dB\right], -180 \leq \theta \leq 180 \quad (4\text{-}6)$$

- *omnidirectional:*

$$A(\theta) = 0 \quad (4\text{-}7)$$

- *six-sector*:

$$A(\theta) = -min\left[12\left(\frac{\theta}{35°}\right)^2, 23dB\right], -180 \leq \theta \leq 180 \quad (4\text{-}8)$$

gdje su:

A – dobitak antene (dB)

θ – kut otklona antene u smjeru maksimalnog dobitka

- *kathreinTSAntenna* – obrazac za ovu antenu se preuzima iz posebne datoteke jer jedina ima 3D obrazac te jedina ima opciju podešavanja dodatnih parametara. Moguće opcije su:
  - *LTE_config.site_altiude* – uzvišenje terena [m].
  - *LTE_config.site_height* – visina antenskog stupa [m].
  - *LTE_config.rx_height* – visina prijemne antene [m].
  - *LTE_config.antenna.mechanical_downtilt* - mehanički nagib (otklon) antene.
  - *LTE_config.antenna.electrical_downtilt* – električni otklon antene.
  - *LTE_config.antenna.antenna_type* – određuje vrstu antene koju se želi koristiti. Npr. :'*742212*' [15] ili '*742215*' [16].
  - *LTE_config.antenna.frequency* – Frekvencija na kojoj se koristi antena (frekvencija prijenosa)[MHz].

- *LTE_config.max_antenna_gain* – dobitak antene izražen u dBi. Preporučene vrijednosti su: 15 dBi (ruralno područje 900 MHz, urbano područje 2 GHz) i 12 dBi (urbano područje 900 MHz).

- *LTE_config.scheduler* – način raspodjele resursa (engl. *scheduling*). Podržane raspodjele su:
    - *round robin* – jednako raspodjeli fizičke resurse svim korisničkim uređajima.
    - *best cqi* – svaki fizički resurs je dodijeljen korisničkom uređaju koji ima najbolje kanalne uvjete
    - *prop fair Sun* – proporcionalno pravedna raspodjela [17].
    - *FFR* – ponovna upotreba frekvencija [8, poglavlje VI].
- *LTE_config.latency_time_scale* – simulator prati i sprema prosječnu propusnost korisničkih uređaja. Ta prosječna propusnost je korištena u proporcionalno pravednoj raspodjeli kako bi se osigurala podjednaka prosječna propusnost. *Latency_time_scale* je vrijednost koja predstavlja vremenski period u kojoj se mjeri spomenuta propusnost.
- *LTE_config.power_allocation* – raspodjela snage, jedina moguća opcija trenutno je '*homogenueos*' odnosno homogena raspodjela snage

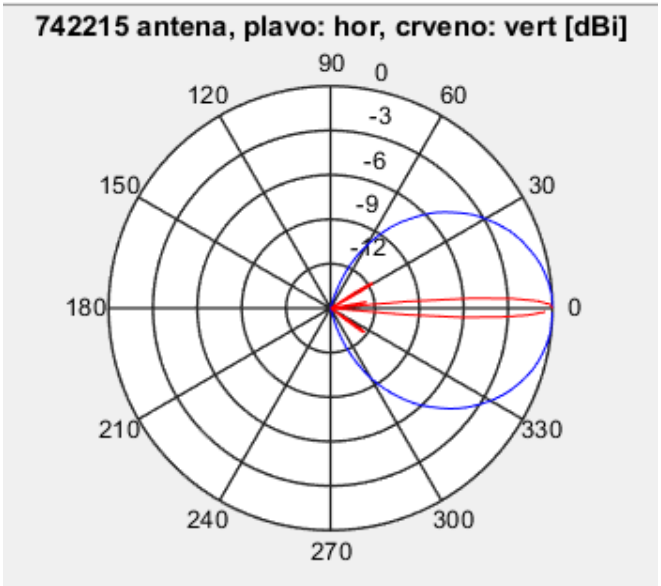
- *LTE_config.add_femtocells* – ako se ova opcija uključi postavljanjem vrijednosti u '*true*', dodaje se dodatni sloj ćelija s omnidirekcionalnim antenama. Dodatni sloj su femtoćelije/male ćelije koje mogu imati jaču snagu odašiljanja te se dodaju iznad područja interesa (ROI).
- *LTE_config.femtocells_config.spatial_distribution* – definira prostornu distribuciju femtoćelija. Moguće vrijednosti su:
  – *homogeneous density* – homogeno širenje femtoćelija preko područja interesa s danom gustoćom u femtoćelije/km^2
- *LTE_config.femtocells_config.tx_power_W* – snaga odašiljanja svake femtoćelije u W.
- *LTE_config.femtocells_config.macroscopic_pathloss_model* – koji od propagacijskih modela će femtoćelije koristiti. Moguće opcije jednake kao i za makro bazne postaje.
- *LTE_config.additional_penetration_loss* – omogućuje postavljanje dodatne količine gubitaka pri makroskopskoj propagaciji. Moguće vrijednosti su:
    - *deep indoor*: 23 dB
    - *indoor*: 17 dB
    - *incar*: 7 dB [10]
    - *outdoor*: 0 dB

4.2. Simulacija LTE mreže – scenarij A

U ovom poglavlju su dani rezultati simulacije za LTE mrežu s regularnom heksagonalnom raspodjelom baznih postaja, konstantnom distribucijom korisničkih uređaja, za urbanu okolinu. Postavljene vrijednosti svih parametara dane su u tablici 4.1., a dalje u tekstu se za ovu simulaciju koristi naziv scenarij A.

Tab.4.1. Parametri simulacije za scenarij A

Parametar	**Vrijednost**	**Parametar**	**Vrijednost**
Prijenosna frekvencija	2.14 GHz	Snaga odašiljanja bazne postaje	80 W (49 dBm)
Frekvencijski pojas	20 MHz	Zasjenjenje	none
Broj odašiljačkih antena	2	Kanalni model	TU – typical urban
Broj prijemnih antena	2	Duljina kanalne trase	5 s
Odašiljački način rada	3 - OLSM	Šum na prijemnoj strani	9 dB
Geometrija mreže	regular_hexagonal_grid	Gustoća termalnog šuma	-174 dBm/Hz
Udaljenost baznih postaja	500 m	Distribucija korisničkih uređaja	constant UEs per cell
Rezolucija mape	5 metar/element slike	Broj uređaja po baznoj postaji	40
Broj prstenova baznih postaja	3	Brzina kretanja korisničkih uređaja	5/3.6 (1.389 m/s)
Gubitak signala	70 dB	Vrsta antene	kathreinTS-Antenna [16]
Propagacijski model	COST 231	Dobitak antene	15 dBi
Propagacijska okolina	urban macro	Način raspodjele resursa	round robin
Uzvišenje terena	0 m	Indeks distribucije	0.5
Visina antenskog stupa	30 m	Raspodjela snage	homogeneous
Visina prijemne antene	1.5 m	Duljina simulacije	10 TTI
Mehanički nagib	0˚	Električki nagib	8˚



Sl.4.1. Dijagram zračenja Kathrein antene

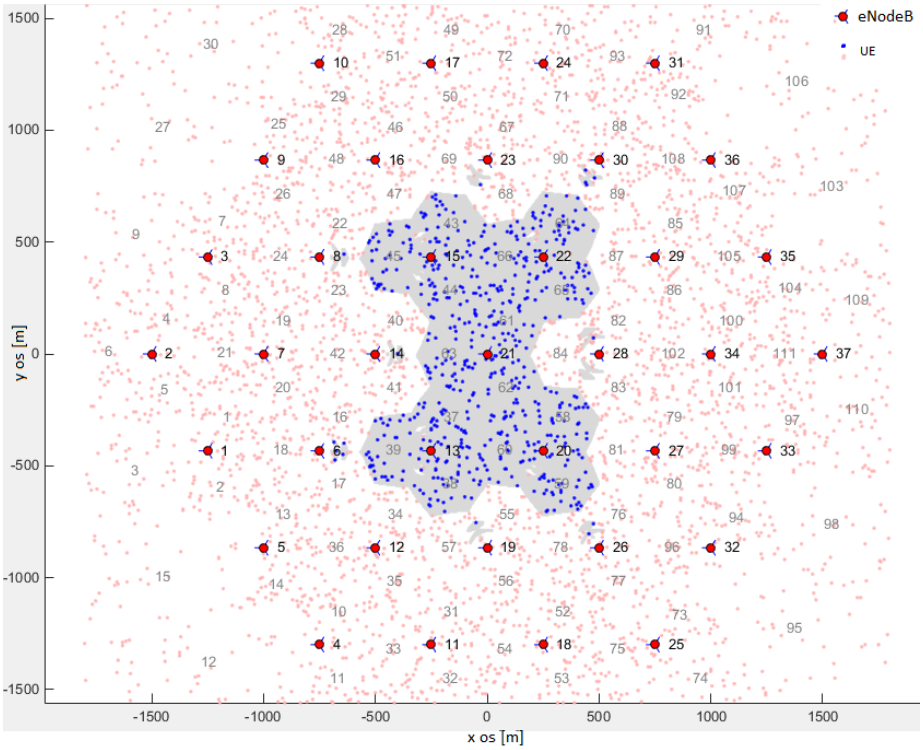
Na slici 4.1. je prikazan dijagram zračenja antene Kathrein 742215 [16] korištene u simulaciji.

4.2.1. Rezultati simulacije za scenarij A

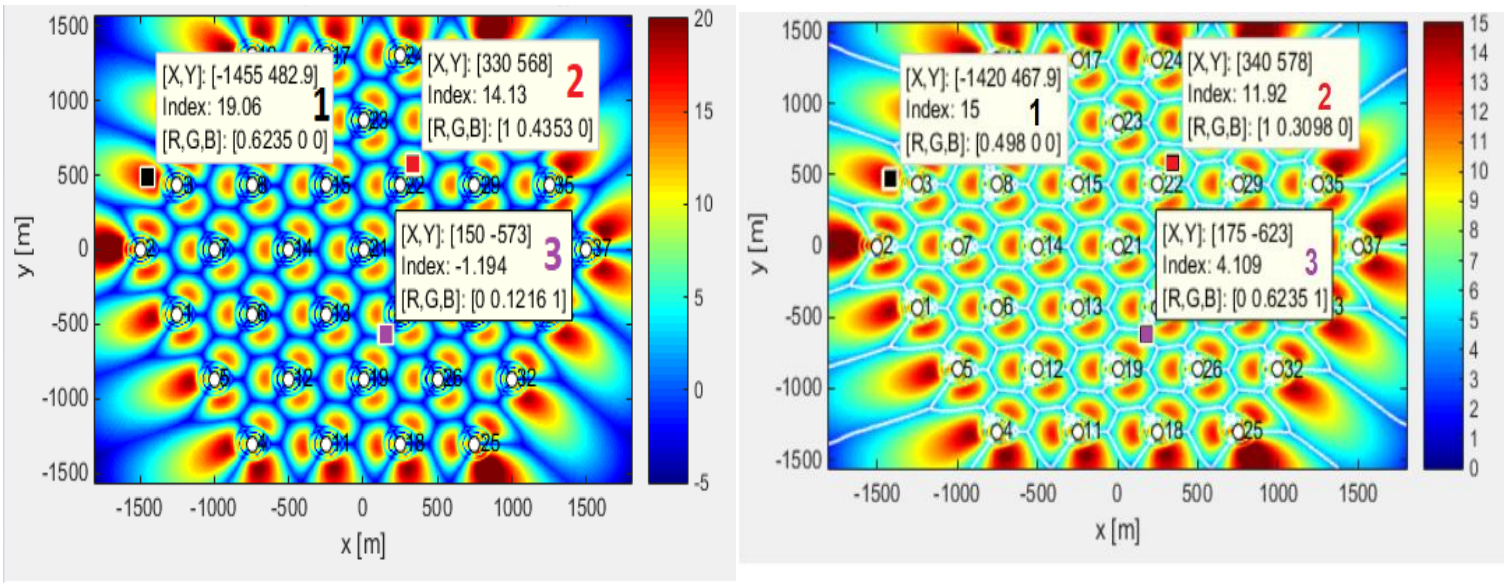
Na slici 4.2. prikazan je smještaj ćelija i mobilnih uređaja u simuliranoj mreži. Slika prikazuje pravilnu heksagonalnu mrežu sastavljenu od 111 ćelija koje ukupno sadrže 4440 mobilnih uređaja. Svaka ćelija sadrži 40 mobilnih uređaja ravnomjerno raspoređenih po cijeloj ćeliji. Antena korištena u simulaciji je Kathrein tri-sektorska antena. U ovom primjeru isključen je utjecaj zasjenjenja na slabljenje signala. Frekvencija rada je 2.14 GHz s frekvencijskim pojasom od 20 MHz. Bazna stanica radi u 2x2 MIMO sustavu odnosno odašiljački način rada je prostorno multipleksiranje otvorene petlje. U tablici 4.2 dan je dio rezultata simulacije.

Tab.4.2. Rezultati simulacije

Prosječna propusnost ćelije [Mb/s]	Prosječna UE propusnost [Mb/s]	Vršna UE propusnost [Mb/s]	Rubna UE propusnost [Mb/s]	Prosječna spektralna efikasnost [bit/cu]	Prosječno RB korištenje [RBs]	Prosječna RB okupiranost unutrašnjih ćelija [%]	Prosječna RB okupiranost svih ćelija [%]
25.12	0.63	1.34	0.18	1.5	2.49	99.61	39.41



Sl.4.2. Pozicije ćelija i mobilnih uređaja u scenariju A

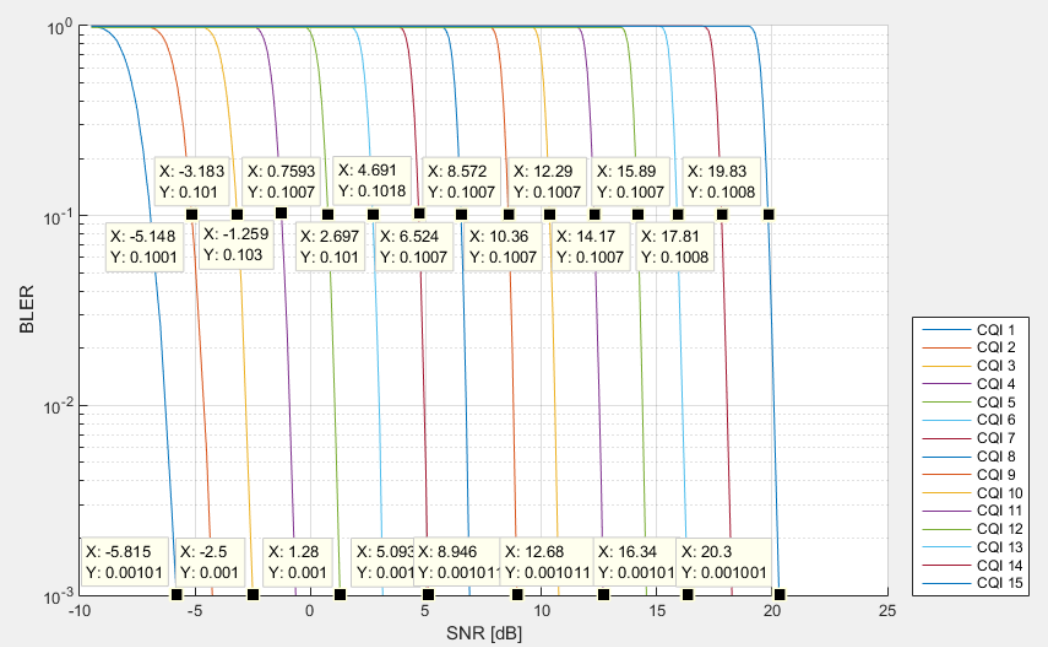


a) b)

Sl.4.3. Promjene uslijed makroskopskog gušenja i interferencije a) SINR vrijednosti; b) CQI vrijednosti

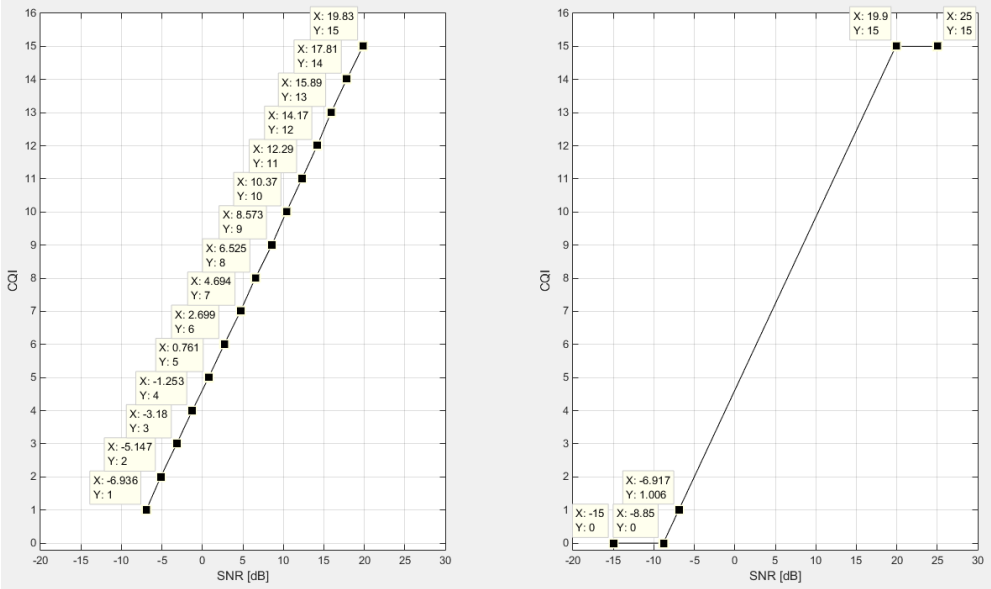
Na slici 4.3 prikazane su promjene snage i kvalitete signala uslijed makroskopskog slabljenja. Na slici 4.3.a prikazana je promjena vrijednosti SINR s obzirom na položaj UE u odnosu na baznu stanicu. Slika 4.3.b prikazuje vrijednosti CQI povratne informacije s mobilnih uređaja, koje su mjera kvalitete kanala. U svrhu analize signala uzete su tri referentne točke za mjerenje parametara signala. Na slici 4.3. točka 1 (označena crnim pravokutnikom) je smještena u sredini ćelije, ali na vanjskom krugu baznih postaja gdje je interferencija najslabija. Tu je očitana visoka SINR i CQI vrijednost, što se i očekuju u vanjskom krugu baznih stanica prije nego u samoj unutrašnjosti urbanog područja jer je smanjena interferencija od drugih baznih stanica. U točki 1 vrijednost SINR iznosi 19.06 dB (slika 4.3.a) a CQI vrijednosti je 15 (slika 4.3.b) što bi odgovaralo maksimalnoj mogućoj kvaliteti kanala za ovu simulaciju. Točka 2 (označena crvenim pravokutnikom) predstavlja također sredinu jedne ćelije, ali sada u unutrašnjem krugu baznih postaja, u samom centru makro urbanog područja gdje je međusobna interferencija baznih postaja veoma izražena. SINR vrijednost je 14.13 dB a CQI indikator iznosi 11.92. Iz ovih rezultata se može vidjeti utjecaj interferencije i makroskopskog gušenja na snagu i kvalitetu signala. Točka 3 (označena ljubičastim pravokutnikom) je odabrana na samom rubu ćelije u unutrašnjosti makro urbanog područja. Na rubu tri sektora različitih antena, zbog interferencije baznih postaja, velike

udaljenosti mobilnih uređaja od istih te drugih degradirajućih faktora, vrijednost SINR iznosi -1.194 dB, a CQI indikator je sada 4.109.



Sl.4.4. LTE BLER za kvalitetu kanala od 1 do 15

Na slici 4.4. prikazane su BLER vrijednosti u ovisnosti o SNR, za različite kvalitete kanala iskazane vrijednostima CQI od 1 do 15 gdje je 1 kanal s najlošijim uvjetima, a 15 kanal s najboljim mogućim kanalnim uvjetima. Na slici 4.5.a je grafički prikazana linija koja označava graničnu vrijednost SNR ispod koje se signal ne smije spustiti ukoliko se želi zadovoljiti 10% BLER ograničenje (vidi 2.3.2.1.). To ograničenje se vidi i na slici 4.4., na y osi gdje je vrijednost BLER-a 10^{-1} odnosno 0.1 . Tablica 4.4. je napravljena na temelju slike 4.5.a gdje drugi stupac označava SNR vrijednosti za 10% BLER za sve kanale. Prvi stupac predstavlja SNR za svaki CQI u idealnom scenariju kada je BLER blizu nule (korištena je vrijednost 0,1%). U koraku raspoređivanja umjesto SINR vrijednosti koristi se SNR jer je interferencija raznim metodama i postupcima svedena na minimum. Na primjeru sa slike 4.3. objasnit će se odnos SNR-CQI.



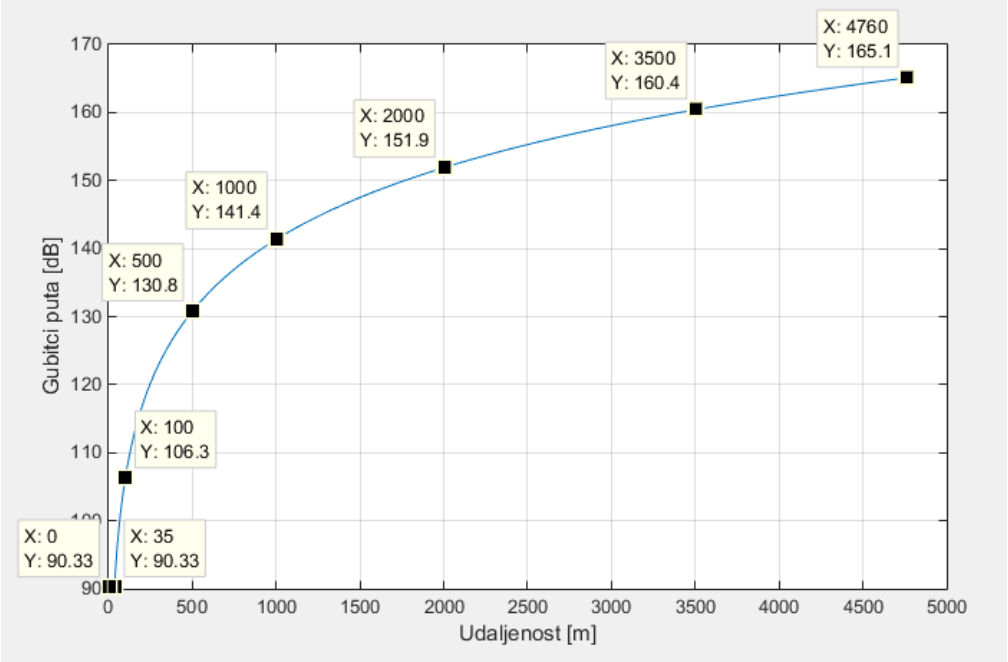
Sl.4.5. a) SNR-CQI (10% BLER) b) SNR-CQI model mapiranja

Tab.4.3. SNR-CQI

CQI	**SNR [dB], BLER 0,1%**	**SNR [dB], BLER 10%**
1	-5.813	-6.936
2	-4.252	-5.147
3	-2.500	-3.180
4	-0.640	-1.253
5	1.279	0.761
6	3.130	2.699
7	5.093	4.694
8	6.896	6.525
9	8.947	8.573
10	10.76	10.370
11	12.68	12.290
12	14.560	14.170
13	16.340	15.890
14	18.260	17.810
15	20.300	19.830

U točki 1 na slici 4.3. SNR vrijednost je 19.06 dB, a CQI indikator je 15. Ako se pogleda tablica 4.3. vidi se da vrijednost 19.06 dB ne zadovoljava uvjet od 10% BLER za CQI 15, ali je vrijednost veća od 18.260 dB što je maksimalni SNR za CQI 14. Iz toga se može zaključiti da ta SNR vrijednost spada pod kanalne uvjete čiji je CQI 15 no raspoređivač će morati prilagoditi TBS kako bi se zadovoljio uvjet od 10% BLER. Točka 2 sa slike 4.3.a, ima SNR vrijednost od 14.13 dB što spada u raspon SNR vrijednosti koje zadovoljavaju uvjet 10% BLER za CQI 12. Na slici 4.3.b prikazan je CQI indikator 11.95 i može se reći da se poklapa s traženim CQI 12 indikatorom. Najveći utjecaj na degradaciju kvalitete kanala ima udaljenost mobilnih uređaja od bazne postaje što se može vidjeti iz primjera točke 3 sa slike 4.3.a. U toj točki, SNR vrijednost je -1.194 dB i po tablici 4.3. spada u CQI 4 kanalne uvjete, što se podudara sa prikazanom CQI vrijednošću od 4.109 s točke tri na slici 4.3.b. Točka tri je odabrana na samom rubu ćelije gdje se zbog udaljenosti mobilnih uređaja od bazne postaje vrijednost SNR drastično smanjila, a zbog položaja ćelije u području s puno baznih stanica interferencija je vrlo izražena..

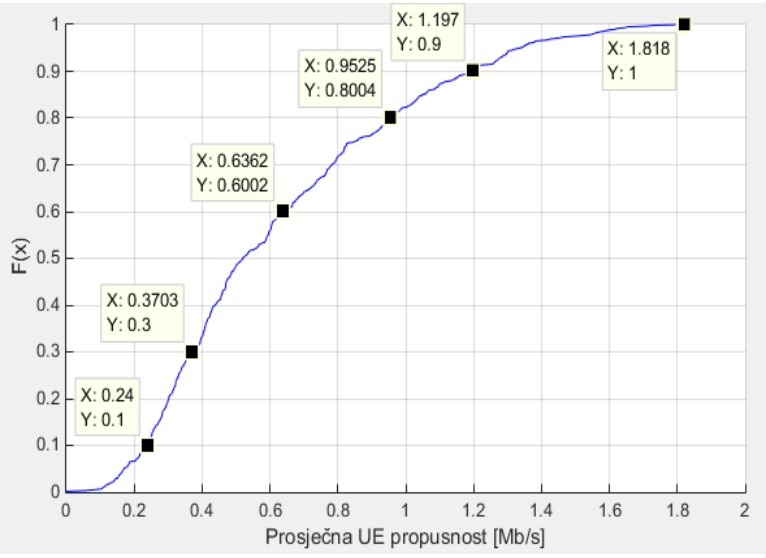
Kako udaljenost mobilne stanice od bazne utječe na degradaciju signala i kvalitetu kanala, pokazano je na slici 4.6.



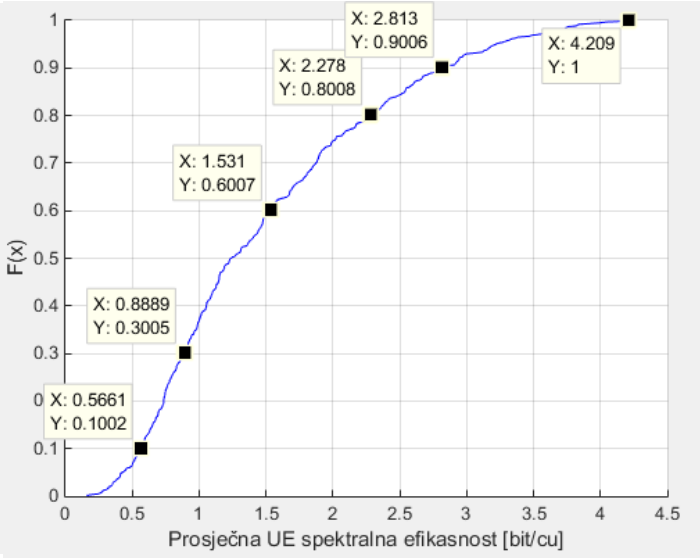
Sl.4.6. Makroskopski gubitci prema COST231 Walfish-Ikegami urbani makro model

Propagacijski model korišten u ovoj simulaciji je COST 231 Walfish-Ikegami model a propagacijska okolina je urbana makro okolina. Podaci o izračunu vrijednosti i modeliranju propagacijskog modela u Simulinku dani su u [18]. Na slici 4.6. vidi se da je gušenje signala uslijed gubitaka puta jednak 90.33 dB na 35 m udaljenosti mobilnog uređaja od bazne stanice, na 100 m signal slabi za 106.3 dB, a na 200 m, što u ovom primjeru predstavlja rub ćelije, makroskopski gubitci puta iznose 116.9 dB.

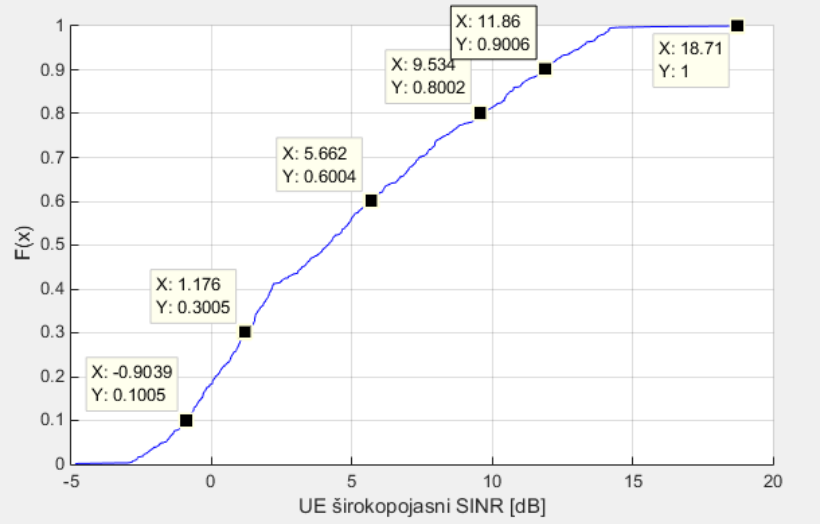
U nastavku će se razmotriti rezultati za propusnost, spektralna efikasnost i SINR koji najbolje prikazuju efikasnost mobilnog sustava. Na slici 4.7. prikazana je empirijska distribucija navedenih veličina unutar ćelije. Na y osi grafova se nalaze vrijednosti empirijske kumulativne funkcije distribucije F(x) -ECDF (engl. *Empirical cumulative distribution function*) [21]. Podatci sva tri grafa su zapisani u tablici 4.4. Funkcija ECDF se može objasniti na primjerima prikazanih parametara. Na slici 4.7.a je prikaz distribucije prosječne UE propusnosti izražene u Mb/s. Propusnost 0.636 Mb/s odgovara vrijednosti od 0.6 ECDF funkcije, što znači da 60% mobilnih uređaja ima prosječnu propusnost 0.636 Mb/s ili manju. Na slici 4.7.b prikazane su spektralne efikasnosti iskazane u bitovima po korištenom kanalu, odnosno bit/cu (engl. *bit per channel use*). Spektralna efikasnost prikazuje kapacitet jedne ćelije po jedinici frekvencijskog pojasa i može se izraziti i mjernom jedinicom bit/s/Hz [8, str. 33]. ECDF vrijednost 0.5 ima spektralna efikasnost 1.241 bit/cu što znači da 50% mobilnih uređaja imaju spektralnu efikasnost od 1.241 bit/cu ili manje.



a)



b)



c)

Sl.4.7. Empirijska distribucija a) prosječne UE propusnosti b) prosječne UE spektralne efikasnosti c) UE širokopojasni širokopojasnog SINR-a

Na grafu sa slike 4.7.c prikazana je distribucija UE širokopojasne SINR vrijednosti. Iz tablice 4.4. vidi se da za taj graf vrijedi sljedeće: ukoliko je prosječna SINR vrijednost mobilnih uređaja jednaka ili manja od -4.843 dB, ECDF funkcija poprima vrijednost 0 što znači da ne postoji niti jedan uređaj unutar odabrane ćelije koji ima SINR vrijednost od -4.843 dB ili manje. Isto vrijedi i za gornju granicu, SINR vrijednost jednaku 18.710 dB, 100% uređaja ima tu ili manju SINR vrijednost.

Vrijednost koja pokazuje efikasnost iskorištavanja resursnih blokova naziva se prosječna RB (eng. *Resource Block*) okupiranost [22] i izračunava se s obzirom na frekvencijski pojas. Ukoliko je BW maksimalan (20 MHz), RB poprima maksimalnu vrijednost od 100. Što je postotak prosječne RB okupiranosti veći, to znači da se resursni blokovi bolje ili efikasnije iskorištavaju. Razlog zbog kojeg sustav ne postiže maksimalnu RB okupiranost pri 20 MHz BW je negativni utjecaj interferencije. Dokazano je [22] da povećanje broja korisnika unutar ćelije negativno utječe na postotak RB okupiranosti jer se mrežni resursi dijele između velikog broja uređaja po ćeliji. Raspoređivanje korišteno u simulaciji je round robin (vidi 2.3.2.) što znači raspoređivanje jednake količine fizičkih resursa za svaki UE unutar ćelije.

Tab.4.4. Distribucija parametara ćelije

F(x)	UE propusnost [Mb/s]	UE spektralna efikasnost [bit/cu]	UE širokopojasni SINR [dB]
0	0	0.162	-4.843
0.1	0.241	0.566	-0.904
0.2	0.302	0.735	0.130
0.3	0.370	0.889	1.176
0.4	0.439	1.054	2.142
0.5	0.519	1.241	4.123
0.6	0.636	1.531	5.662
0.7	0.783	1.875	7.409
0.8	0.953	2.278	9.534
0.9	1.197	2.813	11.860
1.0	1.818	4.209	18.710

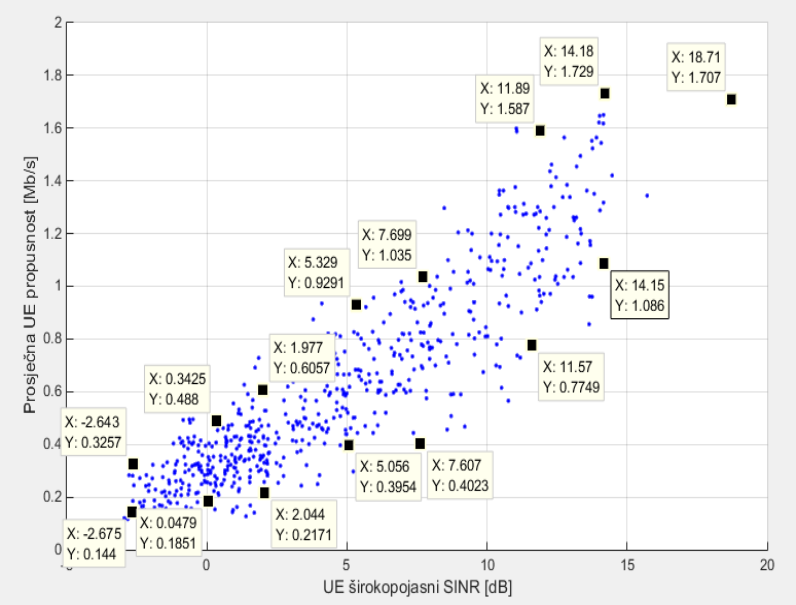
Za ćelije označene plavom bojom na slici 4.2. (ćelije u unutrašnjosti makro urbanog područja) prosječna RB okupiranost iznosi 99.61%. Kada se doda svih 111 ćelija, prosječna RB okupiranost pada na 39.41%. Ovo pokazuje negativni utjecaj povećanja broja korisnika, ali i povećanja interferencije na prosječnu RB okupiranost. Zbog velikog broja korisnika, u drugom slučaju gdje su odabrane sve postojeće ćelije, propusnost i spektralna efikasnost ćelija se smanjila što je također veliki faktor u smanjenju prosječne RB okupiranosti.

Nadalje, prosječni broj korištenih resursnih blokova je 2.49 RB. RB u frekvencijskoj domeni se sastoji od 12 podnositelja (15 kHz), a jedan RB okupira vremensku jedinicu od 0.5 ms dok dvije takve jedinice (1 ms) predstavljaju jedan podokvir.

Prosječna propusnost ćelije iznosi 25.12 Mb/s, a prosječna propusnost mobilnih uređaja je 0.63 Mb/s (Tablica 4.1). Zbog round robin raspoređivanja, svaki mobilni uređaj će dobiti jednaku količinu fizičkih resursa i ukoliko se prosječna propusnost ćelije (25.12 Mb/s) podijeli s brojem korisnika u ćeliji (40), dobije se prosječnu propusnost mobilnih uređaja. Prosječna vrša vrijednost koju mobilni uređaji ostvaruju je 1.34 Mb/s a prosječna ostvarena propusnost na rubovima ćelije iznosi 0.18 Mb/s. Prosječna spektralna efikasnost mobilnih uređaja je 1.5 bit/cu. Međusobna ovisnost ovih parametara pokazana je na slikama 4.8. i 4.9.

Tab.4.5. Ovisnost širokopojasnog SINR
i prosječne propusnosti mobilnih uređaja

UE širokopojasni SINR [dB]	UE propusnost [Mb/s]
-2.675	0.144
-2.643	0.326
0.048	0.185
0.343	0.488
2.044	0.217
1.977	0.606
5.056	0.395
5.329	0.929
7.607	0.402
7.699	1.035
11.57	0.775
11.89	1.587
14.15	1.086
14.18	1.729
18.71	1.707



Sl.4.8. Ovisnost širokopojasnog SINR
i prosječne propusnosti mobilnih uređaja

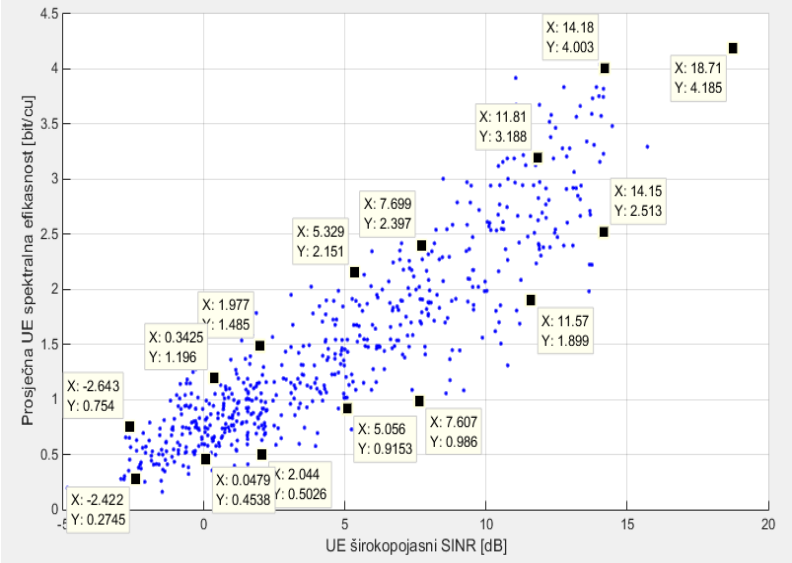
Iz statistike simulacije (Tablica 4.1) dobije se podatak da je prosječna UE propusnost po svim ćelijama jednaka 0.63 Mbit/s. Na slici 4.8. dane su vrijednosti širokopojasnog SINR i prosječne UE propusnosti za svaku pojedinu ćeliju u simuliranom sustavu. U tablici 4.5. prikazani su podatci sa slike za odabrane ćelije. Različitim nijansama boje su označena dva po dva reda tablice, s minimalnom i maksimalnom vrijednosti propusnosti mobilnih uređaja (UE) pri odabranoj SINR vrijednosti. Prva točka je odabrana za SINR vrijednost oko -2.6 dB. Minimalna UE propusnost uz takvu SINR vrijednost je 0.144 Mbit/s, a maksimalna 0.326 Mbit/s.

Maksimalna UE propusnost je 1.707 Mbit/s uz 18.71 dB SINR. Pri većim SINR vrijednostima (iznad 10 dB) dolazi do sve veće razlike u minimalnoj i maksimalnoj UE propusnosti (tablica 4.5.) što se vidi i na slici 4.8. gdje se s povećanjem SINR vrijednosti graf sve više raspršuje.

Iz dobivenih rezultata simulacije može se napraviti i analizi kapaciteta ćelije što se pokazuje preko spektralne efikasnosti te njezine ovisnosti o širokopojasnoj SINR vrijednosti. Spektralna efikasnost govori koliko bita se, u određenom trenutku, prenosi putem određenog kanala, odnosno korištenjem određenog pojasa frekvencija. Što je spektralna efikasnost veća, kapacitet tog kanala je veći, a samim time i brzina prijenosa podataka. Princip analize je isti kao i za ovisnost širokopojasnog SINR i prosječne propusnosti mobilnih uređaja (slika 4.8.). Na slici 4.9. je prikazano mapiranje UE širokopojasnog SINR i spektralne efikasnosti mobilnih uređaja. Odabrane točke su približno istih SINR vrijednosti kao i na slici 4.8. Za odabrani SINR prikazane su točke s minimalnom i maksimalnom spektralnom efikasnosti. Što je veći SINR, veće su i razlike u minimalnoj i maksimalnoj spektralnoj efikasnosti. Tako je za SINR jednak 2 dB raspon UE spektralnih efikasnosti od 0.503 bit/cu i 1.485 bit/cu, a za SINR od 14.15 dB, spektralne efikasnosti se kreću u rasponu od 2.513 bit/cu i 4 bit/cu. Prosječna spektralna efikasnost svih mobilnih uređaja iznosi 1.5 bit/cu. Maksimalna spektralna efikasnost je 4.185 bit/cu uz 18.71 dB SINR. Tu spektralnu efikasnost ima samo jedan uređaj u odabranoj ćeliji.

Tab.4.6. Ovisnost širokopojasnog SINR i prosječne spektralne efikasnosti mobilnih uređaja

UE širokopojasni SINR [dB]	Prosječna UE spektralna efikasnost [bit/cu]
-2.422	0.275
-2.643	0.754
0.048	0.454
0.343	1.196
2.044	0.503
1.977	1.485
5.056	0.915
5.329	2.151
7.607	0.986
7.699	2.397
11.57	1.899
11.81	3.188
14.15	2.513
14.18	4.003
18.71	4.185



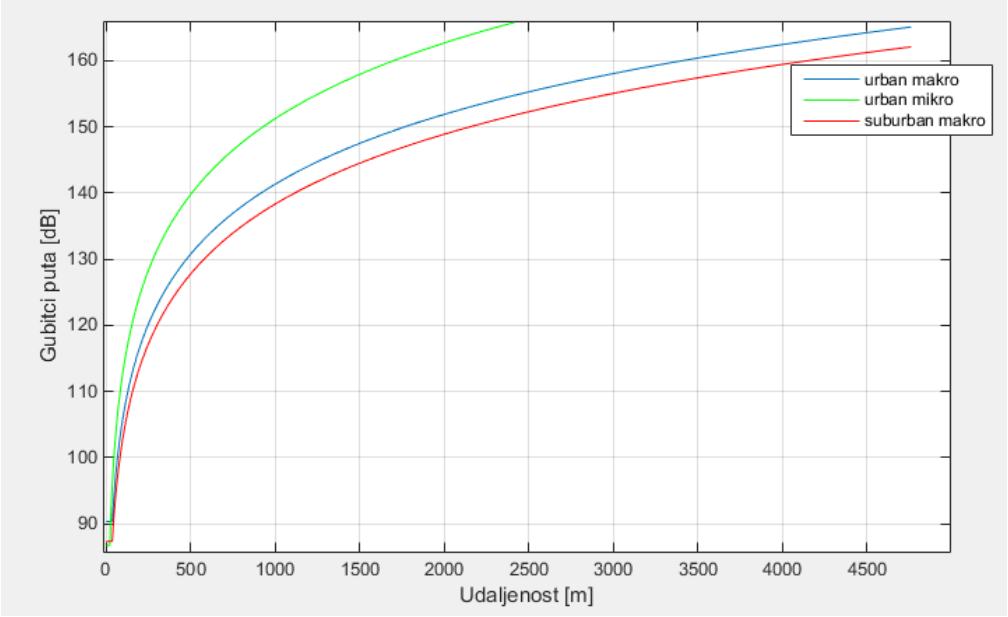
Sl.4.9. Ovisnost širokopojasnog SINR i prosječne spektralne efikasnosti mobilnih uređaja

4.3. Usporedba rezultata različitih scenarija

U ovom poglavlju uspoređuju se statistika i parametri različitih scenarija kroz koje se vidi utjecaj promjena simulacijskih parametara na statistiku samih ćelija pa samim time i sustava.

4.3.1. Usporedba rezultata simulacija za različite propagacijske okoline

U prvoj usporednoj analizi parametri ostaju jednaki kao i u scenariju A, s tim da se mijenjaju propagacijske okoline te uključuje utjecaj zasjenjenja na degradaciju signala. Odabrana demo simulacija je *tri_sector* a mreža ćelija je regularna heksagonalna mreža. Zasjenjenje u simulaciji može biti ili isključeno (*none*) ili može imati lognormalnu distribuiranu 2D prostorno koreliranu mapu zasjenjenja (*claussen*) [23]. Propagacijski model ostaje COST 231, a uspoređuju se rezultati za tri propagacijske okoline: urban makro okoline, urban mikro te suburban makro okoline.

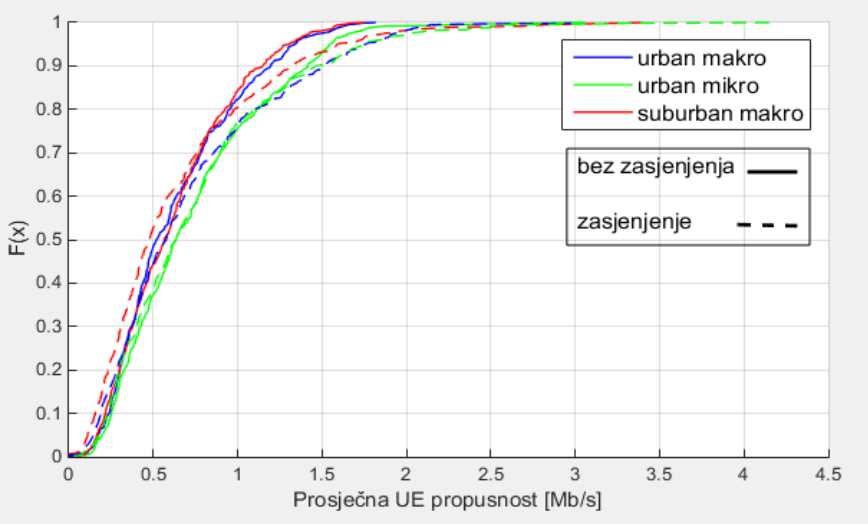


Sl.4.10. Makroskopski gubitci puta prema COST 231 propagacijskom modelu

Tab.4.7. Makroskopski gubitci puta prema COST 231 propagacijskom modelu

	COST 231	*Udaljenost [m]*					
	propagacijska okolina	0	100	250	500	1000	2500
Gubitci puta [dB]	Urban makro	90.3	106.3	120.3	130.8	141.4	155.3
	Urban mikro	86.7	113.3	128.4	139.8	151.3	166.4
	Suburban makro	87.33	103.3	117.3	127.8	138.4	152.3

Iz slike 4.10. te iz podataka iz tablice 4.7. vidi se utjecaj propagacijske okoline na makroskopske gubitke puta. Uspoređuje se utjecaj udaljavanja od bazne stanice na povećanje gubitaka puta. Već iz same slike može se zaključiti da urban mikro propagacijska okolina (zelena linija) ima najveće gubitke puta. Takva okolina ima najmanje gubitke pri malim udaljenostima mobilnog uređaja od bazne stanice. Od 0 do 20 m gubitci su najmanji od sva tri propagacijska modela i iznose 86.7 dB. Nakon 25m gubitci drastično rastu i na kraju dosežu najveću vrijednost. To se događa jer je u mikroćelijama osigurana LOS propagacija signala, pa su na manjim udaljenostima mali gubici, ali se koriste antene na visinama ispod visine krovova pa gušenje raste brže nego u drugim propagacijskim okolinama. Ovakva propagacija odgovara funkciji mikroćelija koje i trebaju imati najmanje gubitke na malim udaljenostima zbog malog radijusa pokrivanja te nisu planirane za odašiljanja signala na veće udaljenosti. Općenito najmanje vrijednosti makroskopskih gubitaka ima suburbana makro okolina (crvena linija na slici 4.10.) jer ima makroćelije za pokrivanje velikog područja, ali za razliku od urbane makro okoline, u suburbanoj okolini nema toliko prepreka (visokih zgrada) pa je time i interferencija manja.



Sl.4.11. Prosječna UE propusnost

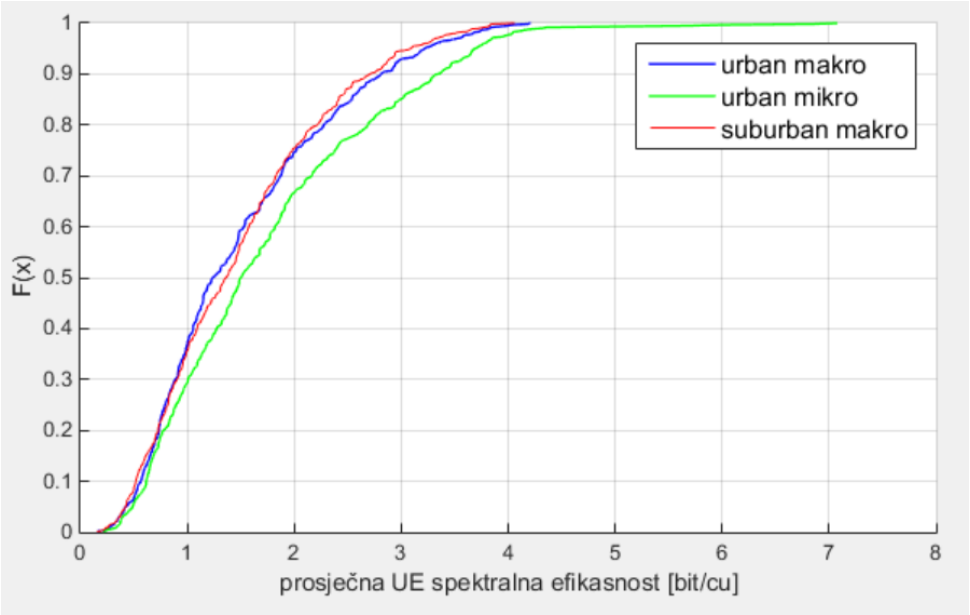
Tab.4.8. Distribucija prosječne UE propusnosti

	Zasjenjenje	COST 231 propagacijska okolina	**Distribucija prosječne UE propusnosti F(x)** 0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1	**Prosječna propusnost ćelije [Mbit/s]**
Prosječna UE propusnost [Mbit/s]	*nema*	Urban makro	0.24	0.37	0.52	0.78	1.20	1.82	**25.12**
		Urban mikro	0.25	0.43	0.64	0.89	1.41	3.06	**29.50**
		Suburban makro	0.22	0.38	0.56	0.78	1.16	1.75	**24.90**
	claussen	Urban makro	0.19	0.38	0.58	0.87	1.52	2.97	**26.56**
		Urban mikro	0.23	0.40	0.64	0.89	1.46	4.18	**30.11**
		Suburban makro	0.15	0.31	0.48	0.76	1.31	3.437	**25.41**

Na slici 4.11. su dane distribucija prosječne UE propusnosti za sve provedene simulacija. Punom crtom na slici su prikazane tri simulacije (urban makro, urban mikro, suburban makro) bez uključenog zasjenjenja, a isprekidanom crtom su prikazane iste tri simulacije, ali uz uključeno *claussen* zasjenjenje. U tablici 4.8. su izvedeni podatci sa slike 4.11. za određene vrijednosti distribucije F(x) (vidi 4.2.1.). Ukoliko se uspoređuju podatci za propagacijske okoline bez zasjenjenja, najbolju distribuciju propusnosti ima urbana mikro okolina pa iza nje slijedi urbana makro okolina te posljednja je suburbana makro okolina. Prosječna propusnost ćelije urbane mikro okoline iznosi 29.50 Mbit/s, dok je ta vrijednost za urbanu makro okolinu jednaka 25.12 Mbit/s a

za suburbanu makro okolinu 24.90 Mbit/s. Iz tih vrijednosti se vidi da urbana mikro okolina ima najbolju propusnost i to je zbog malih ćelija u kojima je pokrivenost signalom veoma dobra, a ujedno i zbog konstruktivne interferencije signala uslijed refrakcije zbog urbane okoline. Suburbana makro okolina ima najslabiju propusnost što se može vidjeti i u tablici 4.8. i to je zbog velikih ćelija u kojima dolazi do gubitaka uslijed slabije pokrivenosti. U suburbanoj okolini, gdje nema visokih prepreka, ne dolazi do refrakcije signala i utjecaj interferencije je slab pa time je i konstruktivna interferencija minimalna što pridonosi slabijoj prosječnoj propusnosti ćelije. Urbana makro okolina ima nešto bolju propusnost zbog pristizanja signala do mobilnog uređaja iz više smjerova (uslijed refrakcije zbog velikog broja visokih prepreka) te je vidljiv utjecaj konstruktivne interferencije.

Ukoliko se analiziraju podatci iz tablice 4.8. te pogledaju propusnosti kod propagacijskih modela u kojima zasjenjenje utječe na sustav, može se također vidjeti da urbana mikro okolina ima najbolje prosječne UE propusnosti, a samim time i najveću ćelijsku propusnost od sva tri propagacijska modela. Iz priloženog se vidi da su vrijednosti pri uključenom zasjenjenju dosta veće nego kada zasjenjenje nije imalo utjecaj na simulaciju. U teoriji to ne bi trebalo biti ispravno jer bi zasjenjenje zgrada i ostalih prepreka trebalo povećati ukupne makroskopske gubitke i time smanjiti SINR, spektralnu efikasnost i propusnost mobilnih uređaja. Ovo se događa jer simulator, ukoliko se uključi *claussen* zasjenjenje, log-normalnom nasumičnom distribucijom računa mape slabljenja uslijed zasjenjenja koje predstavljaju nasumične pozicije mobilnih uređaja. Time se u simulacije unosi početni dobitak od 8 dB [23] kao aproksimaciju gubitaka uslijed zasjenjenja čime se ostvaruju nedosljedni rezultati u simulaciji. Takva simulacija nije pogrešna već se samo ne može uspoređivati sa simulacijama u kojima nije korišteno zasjenjenje. Prema [24, str.8]: „U svrhu stvaranja jednakih simulacijskih scenarija na link i sustavnom nivou, mi ne upotrebljavamo slabljenje uslijed zasjenjenja. Na sustavnom nivou, SNR je funkcija korisničke lokacije u ćeliji. Bez slabljenja uslijed zasjenjenja, korisnički SNR postaje funkcija udaljenosti između bazne stanice i korisnika.“ Može se zaključiti da *claussen* zasjenjenje aproksimira poziciju korisnika u ćeliji, a iz navedenog citata se vidi da je SNR funkcija te pozicije, pa se stoga u nastavku ovog scenarija te u ostalim simulacijskim scenarijima, slabljenje uslijed zasjenjenja neće upotrebljavati.

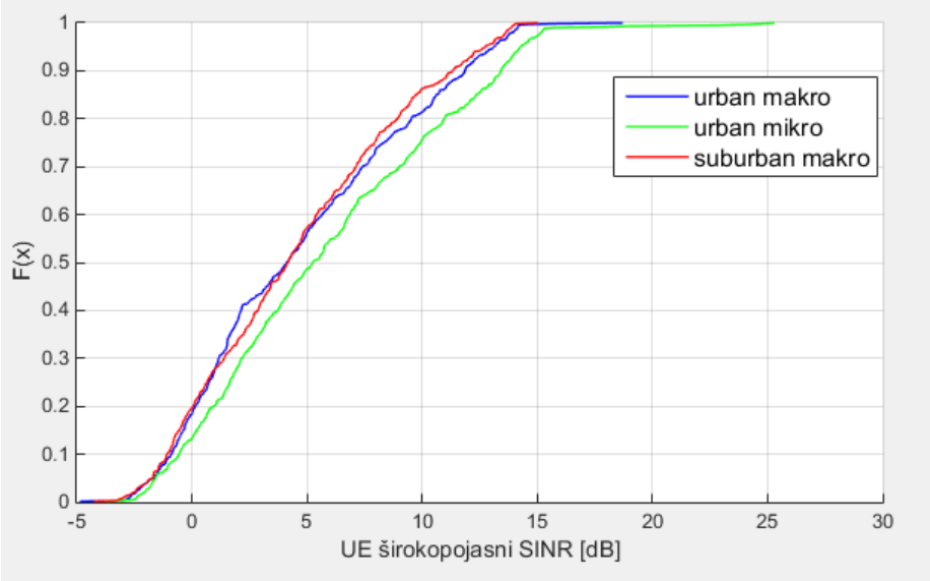


Sl. 4.12.Prosječna EU spektralna efikasnost

Tab.4.9. Distribucija prosječne UE spektralne efikasnosti

	COST 231 propagacijska okolina	**Distribucija prosječne UE spektralne efikasnost F(x)**						**Prosječna spektralna efikasnost ćelije [bit/cu]**
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1	
Prosječna UE spektralna efikasnost [bit/cu]	Urban makro	0.56	0.89	1.24	1.88	2.81	4.21	**1.50**
	Urban mikro	0.62	1.01	1.50	2.16	3.35	7.08	**1.76**
	Suburban makro	0.52	0.90	1.36	1.83	2.71	4.06	**1.48**

U prethodnoj analizi pokazano je kako urbana mikro okolina ima najveću UE i ćelijsku propusnost. Prosječna EU spektralna efikasnost i prosječni EU širokopojasni SINR prikazani su na slikama 4.12., odnosno 4.13., te u tablicama 4.9. i 4.10. Vidi se da su spektralna efikasnost i SINR za urban makro i suburban makro okoline podjednake, a da najveće vrijednosti ima urbana mikro okolina.



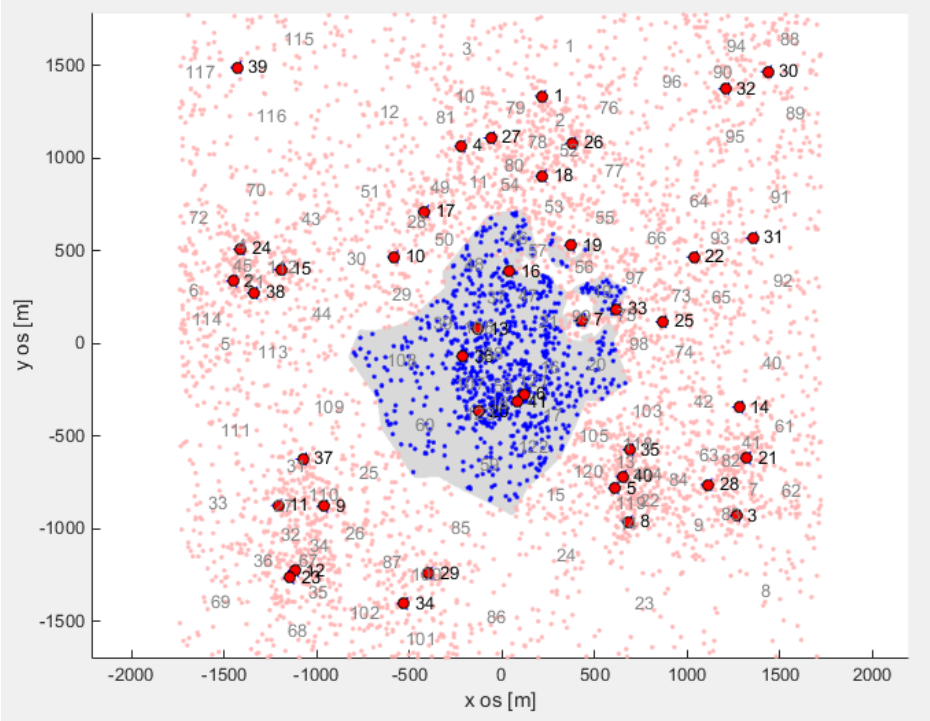
Sl.4.13. Prosječni UE širokopojasni SINR

Tab.4.10. Distribucija prosječnog UE širokopojasnog SINR

	COST 231 propagacijska okolina	**Distribucija prosječnog UE širokopojasnog SINR F(x)**						**Prosječni širokopojasni SINR ćelije [dB]**
		0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1	
UE širokopojasni SINR [dB]	Urban makro	-0.91	1.17	4.14	7.40	9.53	18.71	**4.72**
	Urban mikro	-0.56	2.16	5.35	9.19	13.42	25.30	**5.86**
	Suburban makro	-1.08	1.40	4.19	7.14	11.32	15.03	**4.57**

4.3.2. Usporedba rezultata simulacija za različite geometrije ćelijske mreže

U drugom scenariju se uspoređuje utjecaj različitih geometrija ćelijske mreže na promjenu statističkih parametara sustava. Jedna simulacija zadržava pravilnu heksagonalnu mrežu dok druga ima stohastičku mrežu ćelija. Svi ostali parametri ostaju nepromijenjeni kao kod scenarija A (vidi tablicu 4.1.). Kao i u prošlom scenariju, uz promjenu geometrije mreže, mijenja se i COST 231 propagacijska okolina između urban makro, urban mikro te suburban makro okoline. Na slici 4.14. može se vidjeti urban makro okolinu sa stohastičkom mrežnom geometrijom kao usporedbu sa slikom 4.2. gdje je pravilna heksagonalna mreža.



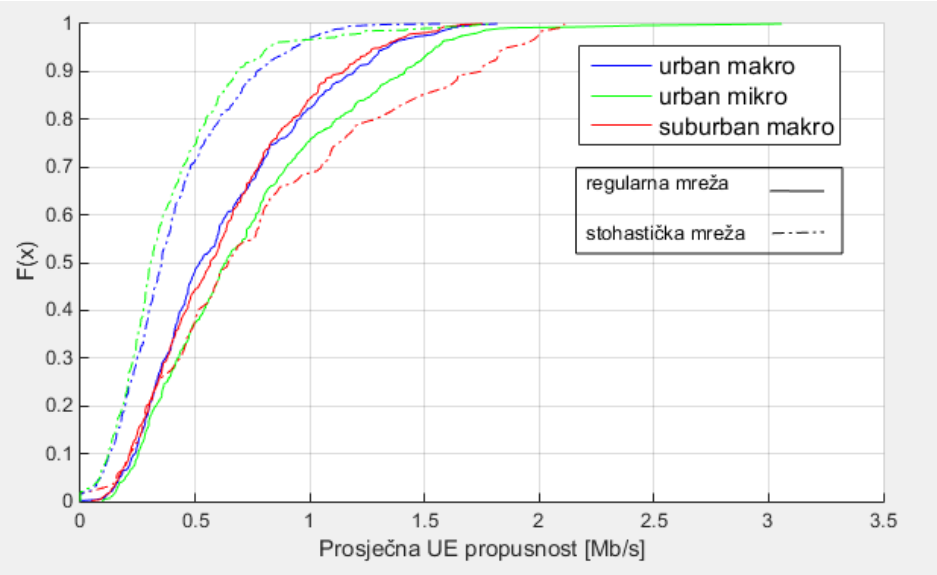
Sl.4.14. Pozicije baznih postaja i mobilnih uređaja
u stohastičkoj mreži

U mreži sa stohastičkom geometrijom bazne postaje su nepravilno distribuirane po cijeloj mapi što daje nepravilnu pokrivenost ćelija signalom. Ovakva distribucija odgovara realnim uvjetima jer se u praksi bazne stanice pozicioniraju na mjestima gdje ih je moguće postaviti (prepreke, interferencija, dozvole, potrebna visina i sl.), a ne u pravilnom heksagonalnom rasporedu.

Graf na slici 4.15. prikazuje prosječne UE propusnosti svih sustava u ovom scenariju. Isprekidanom crtom su prikazane prosječne UE propusnosti sustava čija je geometrija mreže stohastička. Punom crtom su prikazane prosječne UE propusnosti za scenarij A, odnosno pravilnu heksagonalnu mrežu. Iz grafa se vidi da se jedino u suburban makro okolini (crvena isprekidana linija) ostvaruju poboljšanja propusnosti nakon promjene geometrije mreže u stohastičku.

Ukoliko se pogleda tablica 4.11. vide se distribucije tih propusnosti s obzirom na već spomenutu ECDF funkciju. Promjena geometrije mreže u stohastičku značajno smanjuje prosječnu ćelijsku propusnost za urban makro i urban mikro propagacijsku okolinu. Za urbanu

makro okolinu ćelijska propusnost se smanjuje sa 25.12 Mbit/s na 16.30 Mbit/s dok se za urbanu mikro okolinu propusnost smanji sa 29.50 Mbit/s na 15.23 Mbit/s.



Sl.4.15. Prosječna UE propusnost

Tab.4.11. Distribucija prosječne UE propusnosti

F(x)	Prosječna UE propusnost [Mb/s]					
	Regularna mreža			Stohastička mreža		
	Urban makro	Urban mikro	Suburban makro	Urban makro	Urban mikro	Suburban makro
0.1	0.24	0.25	0.22	0.13	0.12	0.21
0.3	0.37	0.43	0.38	0.25	0.23	0.44
0.5	0.52	0.64	0.56	0.36	0.31	0.65
0.7	0.78	0.89	0.78	0.48	0.44	1.05
0.9	1.20	1.41	1.16	0.77	0.68	1.75
1	1.82	3.06	1.75	1.57	1.795	2.11
Prosječna propusnost ćelije [Mb/s]	**25.12**	**29.50**	**24.90**	**16.30**	**15.23**	**32.15**

Suburbanoj makro okolini pogoduje stohastička geometrija mreže te ćelijska propusnost za ovu okolinu raste s 24.90 Mbit/s (regularna geometrija) na 32.15 Mbit/s (stohastička geometrija). Urbanoj mikro okolini najmanje odgovara stohastička mreža jer je ta sokolina imala najbolje

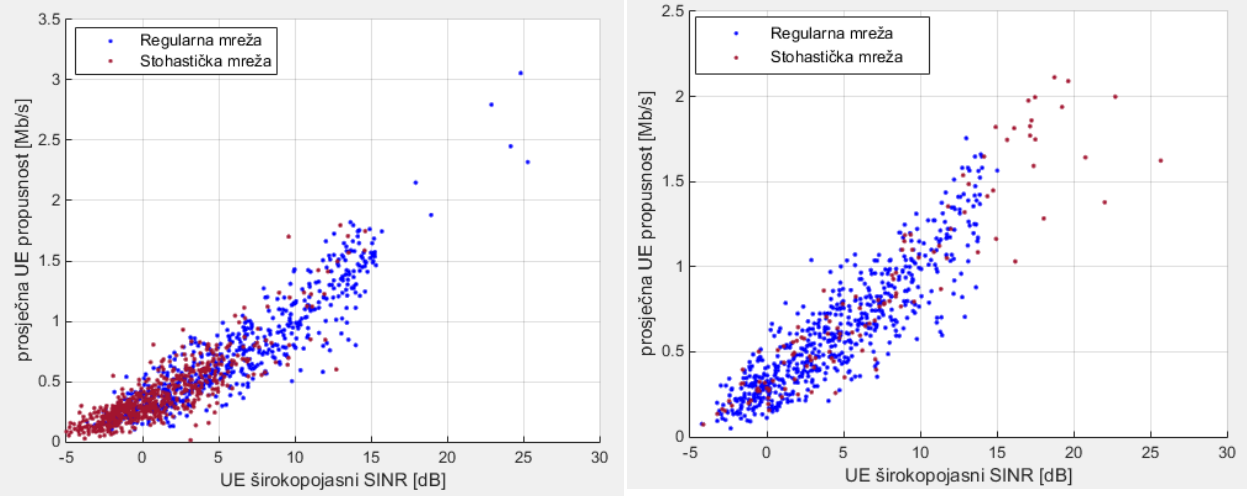
rezultate propusnosti za regularnu geometriju mreže, a najmanju prosječnu propusnost ćelije za stohastičku geometriju. Može se zaključiti da u urbanim sredinama stohastička mreža smanjuje ćelijsku propusnost. Zbog problematične distribucije baznih postaja, veliki broj istih se nalazi na manjim udaljenostima jedna od druge i to u urbanoj okolini, predstavlja problem zbog međusobne ćelijske interferencije ili zbog neravnomjerne pokrivenosti ćelije signalom. U suburbanoj makro okolini, gdje nema veliki broj prepreka, stohastička mreža povećava pokrivenost ćelije signalom odnosno bazne postaje se postavljaju u odabranim područjima. Tamo gdje je najslabiji promet i najmanja koncentracija mobilnih uređaja, izbjegava se pozicioniranje bazne stanice i tako se povećava efektivnost pokrivanja ćelije signalom što izravno utječe na rezultate simulacije.

Tab.4.12. Spektralna efikasnost i širokopojasni SINR ćelije

	Heksagonalna mreža		*Stohastička mreža*	
COST 231 propagacijska okolina	Prosječna spektralna efikasnost ćelije [bit/cu]	Prosječni širokopojasni SINR ćelije [dB]	Prosječna spektralna efikasnost ćelije [bit/cu]	Prosječni širokopojasni SINR ćelije [dB]
Urban makro	1.50	4.72	0.99	1.58
Urban mikro	1.76	5.86	0.93	1.12
Suburban makro	1.48	4.57	1.95	6.85

Ovakvim zaključcima idu u prilog i podaci iz tablice 4.12. u kojoj su prikazane prosječne spektralne efikasnosti i širokopojasni SINR ćelije za obje geometrije te za sve tri propagacijske okoline. Suburban makro okolina uz stohastičku mrežu ima najveću prosječnu SINR vrijednost ćelije koja je 6.85 dB, a spektralna efikasnost ćelije je 1.95 bit/cu.

Grafovi na slici 4.16. predstavljaju ovisnost širokopojasnog SINR i prosječne propusnosti mobilnih uređaja odnosno utjecaj promjene geometrije mreže na ta dva parametra.



a) b)

Sl.4.16. Ovisnost širokopojasnog SINR i prosječne propusnosti mobilnih uređaja
a) urban mikro (lijevo) b) suburban makro (desno)

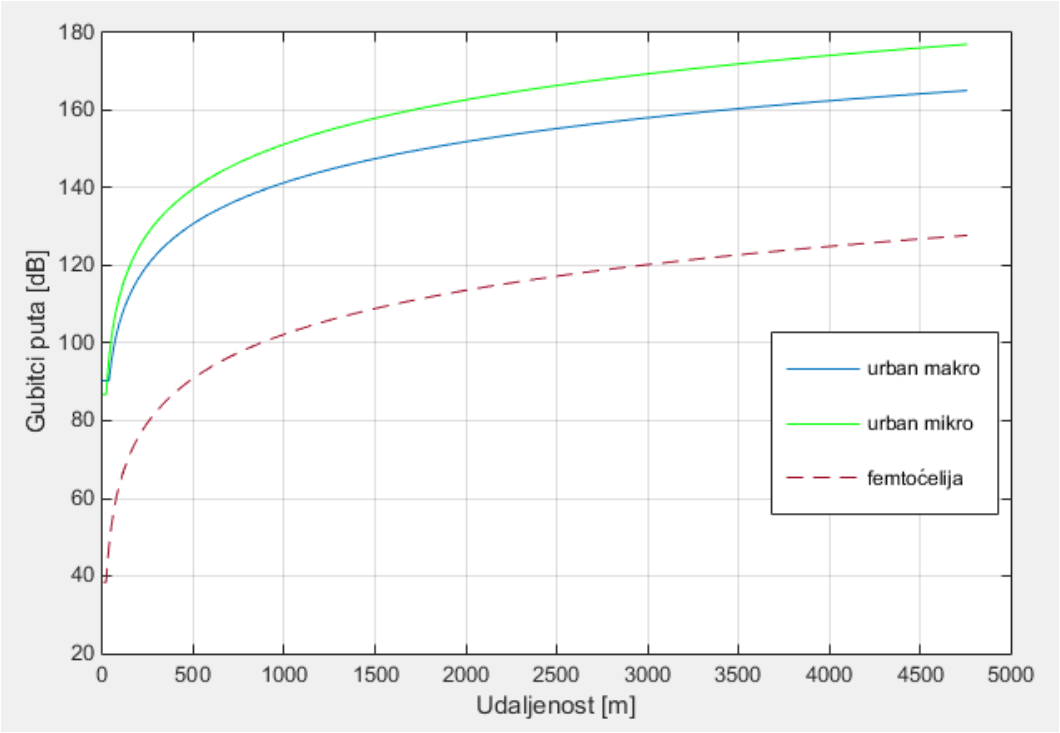
Prikazani su rezultati za urbanu mikro okolinu (4.16.a lijevo) kojoj stohastička geometrija smanjuje efikasnost sustava i suburbanu makro okolinu (4.16.b desno) kod koje se efikasnost sustava povećava promjenom geometrije mreže iz regularne heksagonalne u stohastičku. Na slikama se jasno vidi da je u urbanoj mikro okolini, pri odabiru stohastičke mreže, veliki broj uređaja smješten u dio grafa s niskom propusnošću te malim SINR. Na desnoj slici u suburbanoj okolini, uređaji u sustavu sa stohastičkom mrežom su raspršeni po cijelom grafu i veliki broj njih se nalazi na području iznad 15 dB SINR što je približno maksimum za suburbano područje u regularnoj heksagonalnoj mreži.

4.3.3. Usporedba rezultata simulacija za mreže sa i bez femtoćelija

U ovom scenariju se koriste nove predefinirane postavke. Do sada su za sve simulacije korištene *tri_sector* postavke, koje i ostaju za simulaciju prema scenariju A čiji će se rezultati koristiti u usporedbi. Druga simulacija koristi predefinirane postavke *tri_sector_plus_femtocells* što znači dodavanje dodatnog sloja ćelija s omnidirekcionalnim antenama. Obje simulacije imaju regularno heksagonalnu geometriju mreže. Dodatni sloj su femtoćelije koje mogu imati jaču snagu odašiljanja te se dodaju iznad područja interesa (ROI). Bazne postaje femtoćelija su postavljene u centar zgrada i imaju omnidirekcionalne antene [25]. Koriste se omnidirekcionalne antene jer je

bitno da čitava zgrada bude pokrivena signalom budući da svaka zgrada ima samo jednu baznu postaju u svom centru. Femtoćelije u ovom scenariju rade u CSG (engl. *closed subscriber group*) načinu rada tj. poslužuju samo mobilne uređaje koje pripadaju određenom klasteru. OSG način rada poslužuje sve mobilne uređaje koji su u dometu bazne postaje. Pri OSG načinu rada, mobilni uređaji u zgradi bez bazne postaje, mogu se povezati na susjedne femto bazne postaje. U CSG načinu rada, ti mobilni uređaji su primorani povezati se na baznu postaju makroćelije i primati će veliku interferenciju od susjednih baznih postaja femtoćelija.

Propagacija signala iz i u zgrade uzima u obzir i gubitke prodiranja kroz zidove L_w koji su ovoj simulaciji postavljeni na -20 dB prema [25]. Ukoliko signal dolazi s bazne postaje makro/mikro ćelije, propagacijski model je COST 231 i u ovom scenariju može biti samo urban makro ili urban mikro jer se u suburbanoj okolini ne postavljaju femtoćelije (ne postoje zgrade s povećanim brojem UE). Ako signal dolazi s bazne postaje femtoćelije tada se primjenjuje dual-slope model [26, str. 25]. Snaga odašiljanja bazne postaje femtoćelije je 20 dBm a dobitak omnidirekcionalne antene je 0 dB.



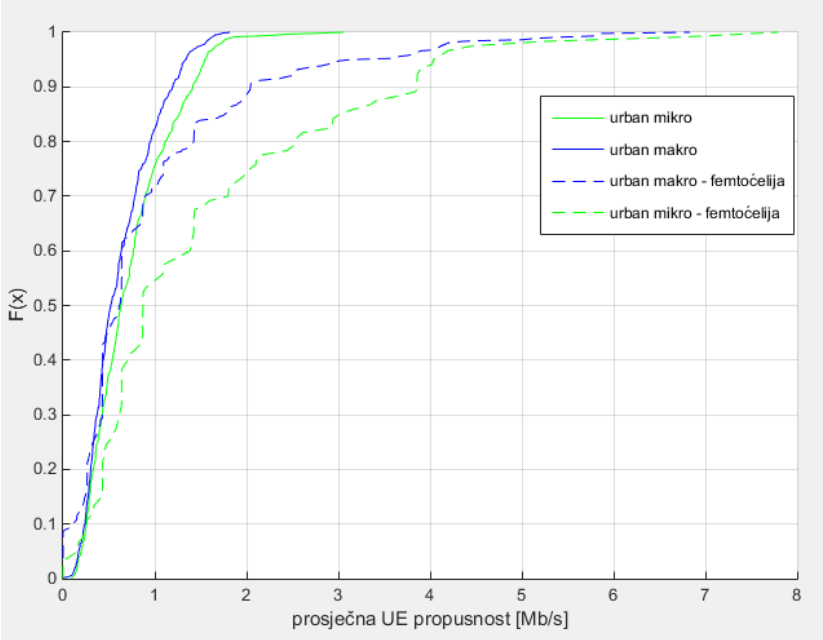
Sl.4.17. Makroskopski gubitci puta

Na slici 4.17. i u tablici 4.13. su dane vrijednosti makroskopskih gubitaka puta za COST 231 urban makro (plava), urban mikro (zelena) te dual-slope modela (crvena) u femtoćelijama. Može se vidjeti da su gubitci puta u dual-slope modelu unutar zgrada znatno manji nego u urban makro i urban mikro propagacijskim okolinama.

Tab.4.13. Makroskopski gubitci puta

Udaljenost [m]	*Gubitci puta [dB]*		
	COST 231 model		Dual slope model
	Urban makro	Urban mikro	Femtoćelija
0	90.33	86.70	38.4
50	95.76	101.80	53.36
100	106.30	113.30	64.68
250	120.30	128.40	79.64
500	130.80	139.80	90.96
1000	141.40	151.30	102.3

Na udaljenosti od 50 metara, dual-slope makroskopski gubitci iznose 53.36 dB dok su COST 231 urban makro gubitci puta jednaki 95.76 dB te ta vrijednost za urban mikro okolinu iznosi 101.80 dB.



Sl.4.18. Prosječna UE propusnost

Dual-slope model se koristi samo u femtoćelijama tj. unutar zgrada i na prostorima malog radijusa tako da podatci iznad 50 metara nisu usporedivi i relevantni.

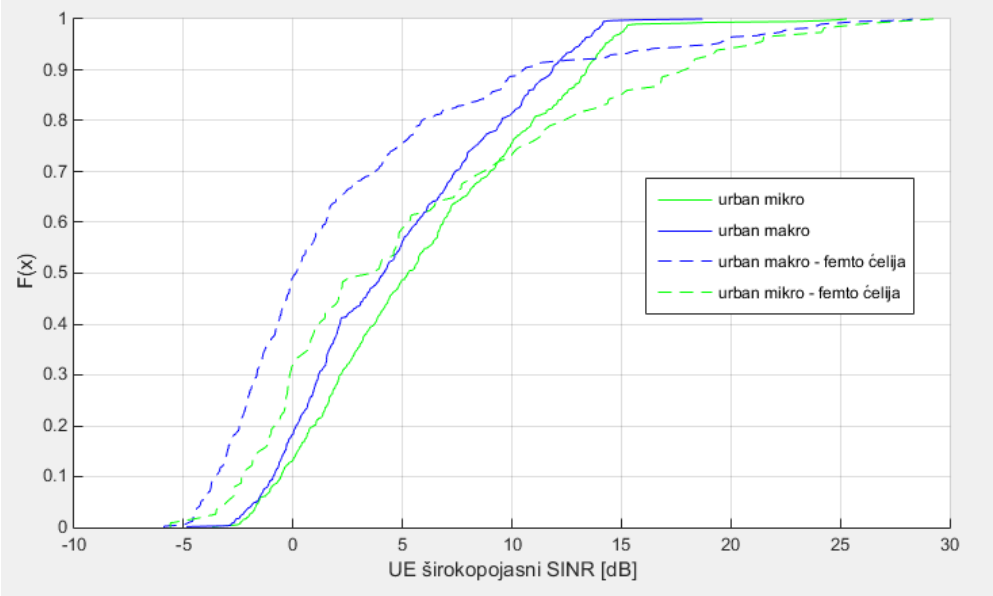
U tablici 4.14. vidi se distribucija prosječne UE propusnosti za obje simulacije. Podatci su izvučeni sa grafa na slici 4.18. koja vizualno uspoređuje sva četiri scenarija. U prvoj simulaciji se vide već poznati uvjeti i vrijednosti koje govore da bolju propusnost ostvaruje ćelija s urban mikro propagacijskim modelom. Sada se u svaku od okolina dodaje i dodatni sloj femtoćelija da se vidi kako isti utječe na efikasnost sustava. U slučaju propusnosti, dodavanje femtoćelija drastično poboljšava prosječne propusnosti mobilnih uređaja.

Tab.4.14. Distribucija prosječne UE propusnosti

F(x)	*Prosječna UE propusnost [Mb/s]*			
	COST 231 model		Dual slope model	
	Urban makro	Urban mikro	Urban makro	Urban mikro
0.1	0.24	0.25	0.11	0.26
0.3	0.37	0.43	0.43	0.61
0.5	0.52	0.64	0.62	0.87
0.7	0.78	0.89	0.90	1.79
0.9	1.20	1.41	2.04	3.85
1	1.82	3.06	6.83	7.79
Prosječna propusnost ćelije [Mb/s]	**25.12**	**29.50**	**15.79**	**18.55**

Ukoliko se pogleda ECDF vrijednost od 0.3 vidi se malo poboljšanje prosječne UE propusnosti jer se uzimaju u obzir mobilni uređaji i makroćelija i femtoćelija. Za urban makro okolinu, prosječna propusnost raste s 0.37 Mb/s na 0.43 Mb/s dok za urban mikro okolinu prosječna UE propusnost raste s 0.43 Mb/s na 0.61 Mb/s. Ukoliko se pogleda ECDF vrijednost od 0.9, vide se velike razlike u prosječnim UE propusnostima. Urban makro okolina s femtoćelijama ima prosječnu UE propusnost od 2.04 Mb/s naspram prijašnje simulacije bez femtoćelija koja ostvaruje prosječnu UE propusnost od 1.20 Mb/s. Urban mikro okolina s femtoćelijama ostvaruje najveće dobitke što se tiče propusnosti jer prosječna UE propusnost prije dodavanja femtoćelija iznosi 1.41

Mb/s, a s femtoćelija je 3.85 Mb/s. Još veće su razlike za ECDF vrijednost 1 koja pokriva maksimalne ostvarene propusnosti unutar ćelije. Međutim, ako se usporede prosječne propusnosti ćelija u tablici 4.13., može se zaključiti da se dodavanjem femtoćelija prosječna propusnost značajno smanjila. No, to nije istina jer se u slučaju računanja prosječne propusnosti ćelija, u obzir uzimaju svi mobilni uređaji unutar makro ćelije. Dodavanjem dodatnog sloja femtoćelija, propusnost uređaja femtoćelija raste dok se performanse uređaja makroćelija drastično smanjuju uslijed interferencije dobivene s baznih stanica femtoćelija, a samim time se i ukupna propusnost ćelija smanjuje. Na slici 4.19. se vidi utjecaj femtoćelija na širokopojasni SINR.



Sl.4.19. Prosječni UE širokopojasni SINR

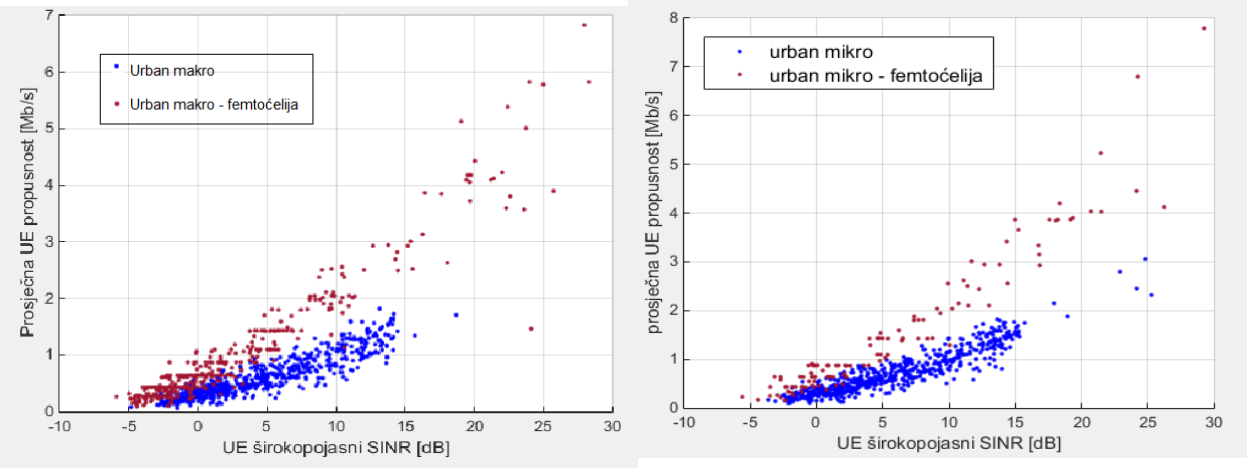
Graf sa slike 4.19. prikazuje da se dodavanjem dodatnog sloja femtoćelija povećavaju maksimalne SINR vrijednosti i za urban makro i za urban mikro okolinu no prosječni UE širokopojasni SINR se smanjuje. Taj utjecaj se može iščitati iz tablice 4.15. koja potvrđuje navedeni zaključak. Nakon dodavanja femtoćelija dolazi do većeg broja uređaja s većom SINR vrijednošću (UE unutar femtoćelija), ali prosječni SINR ostalih uređaja slabi zbog jakog utjecaja interferencije s baznih stanica femtoćelija. Ako se pogleda 0,3 vrijednost ECDF funkcije, može se vidjeti da je UE prosječni SINR manji u simulacijama s femtoćelijama nego bez istih. s druge strane, kada se pogleda vrijednost 1 ECDF funkcije vidi se da je maksimalni SINR simulacija s

femtoćelijama puno veći nego bez femtoćelija jer uređaji unutar femtoćelija imaju puno bolje kanalne uvjete nego uređaji u makroćelijama.

4.15. Prosječni UE širokopojasni SINR

F(x)	*Prosječni UE širokopojasni SINR [dB]*			
	COST 231 model		Dual slope model	
	Urban makro	Urban mikro	Urban makro	Urban mikro
0.1	-0.91	-0.56	-3.58	-2.307
0.3	1.18	2.16	-1.66	-0.11
0.5	4.14	5.35	0.14	-3.57
0.7	7.40	9.01	3.76	8.38
0.9	11.85	13.42	10.47	17.91
1	18.71	25.3	28.31	29.27
Prosječni SINR ćelije [Mb/s]	**4.72**	**5.86**	**2.60**	**5.64**

Prosječni SINR ćelije se također smanjio zbog istog razloga kao i prosječna propusnosti ćelije: veći je utjecaj slabljenja signala na uređajima u makroćelijama nego što se performanse uređaja u femtoćelijama poboljšavaju. Na slici 4.20. može se vidjeti ovisnost širokopojasnog SINR i prosječne propusnosti mobilnih uređaja.



a) b)

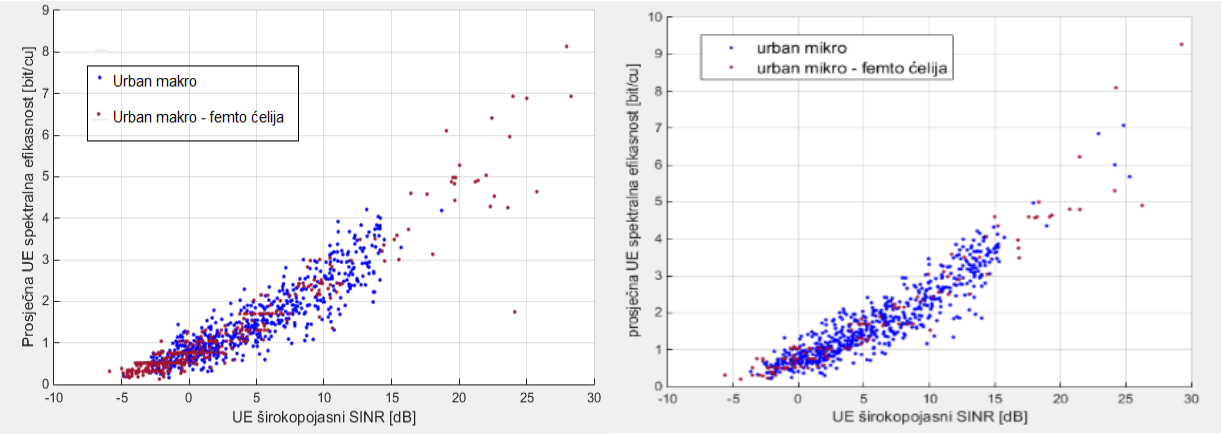
Sl.4.20. Ovisnost širokopojasnog SINR i prosječne propusnosti mobilnih uređaja

a) urban makro (lijevo) b) urban mikro (desno)

Plavom bojom su označeni rezultati simulacije bez femtoćelija, a crvenom bojom su označeni rezultati simulacije u kojoj je dodan dodatni sloj femtoćelija. Može se vidjeti da SINR vrijednost iznad 15 dB ima puno veći broj UE kada se koriste femtoćelije i može se pretpostaviti da su to upravo uređaji u femtoćelijama, s najboljim kanalnim uvjetima. Prosječna UE propusnost svih uređaja raste kada se koriste femtoćelije.. To se vidi i u urban makro (slika 4.20. lijevo) okolini i u urban mikro (slika 4.20. desno) okolini. Nakon dodavanja dodatnog sloja femtoćelija, svi uređaji povećavaju propusnost, a maksimalna prosječna UE propusnost se značajno povećava.

Mreža s urbanim mikro ćelijama (definirano preko propagacijskog modela) ima bolje performanse od mreže s urbanim makroćelijama i tako ostaje i nakon dodavanja dodatnog sloja femtoćelija. U makroćelijskom modelu, dodavanjem femtoćelija dolazi do velikog nesrazmjera između uređaja s lošim kanalnim uvjetima (uređaji u makroćelijama) i uređaja s odličnim kanalnim uvjetima (uređaji u femtoćelijama) i to je zbog toga što se uređaji u femtoćelijama nalaze u neposrednoj blizini bazne postaje (unutar zgrade). Ostali uređaji su spojeni na baznu postaju makroćelije i dobivaju dodatnu interferenciju od femtoćelija [25, str. 326].

To se može i vidjeti na slici 4.21. gdje su pokazani rezultati UE širokopojasnog SINR-a i prosječne UE spektralne efikasnosti za mrežu s urbanim makro i mikroćelijama, sa i bez femtoćelija. U makroćelijskom scenariju bez femtoćelija, iznad SINR iznad 15 dB gotovo nema niti jedan UE, dok u scenariju s dodanim femtoćelijama ima više uređaja s dobrim kanalnim uvjetima (SINR veći od 15dB), a time i s velikim kanalnim kapacitetom odnosno s ostvarenom velikom spektralnom efikasnošću. Prosječna spektralna efikasnost ćelije je također manja kada su uključene femtoćelije, što se može objasniti na isti način kao za smanjenje prosječne propusnosti ćelije odnosno utjecajem značajnijeg pada spektralne efikasnosti UE izvan femtoćelije.



a) b)

Sl.4.21. Ovisnost širokopojasnog SINR i prosječne spektralne efikasnosti mobilnih uređaja a) urban makro (lijevo) b) urban mikro (desno)

Korištenjem stohastičke mreže uz dodavanje dodatnog sloja femtoćelija postižu se slični rezultati, ali su razlike u efikasnosti mreže sa i bez femtoćelija manje. Performanse sustava odnosno mobilnih uređaja se poboljšavaju uvođenjem femtoćelija, ali manje nego pri korištenju regularne heksagonalne mreže. To je i bilo za očekivati jer je u drugom scenariju (vidi 4.3.2.) stohastička geometrija mreže pogoršala performanse sustava u urbanim okolinama. Prosječne performanse ćelije se još više degradiraju zbog stohastičke geometrije mreže koja povećava interferencije zbog nasumičnog smještanja baznih stanica.

5. ZAKLJUČAK

LTE je 3GPP standard za podatkovni prijenos u širokopojasnim mobilnim mrežama. LTE sustav je zasnovan na korištenju OFDM radijske pristupne tehnologije i više-antenskih MIMO sustava koji ostvaruju velike brzine prijenosa, u početku do 150 Mb/s a kasnije čak i do 1 Gb/s. Spomenute brzine se ostvaruju uz minimalno kašnjenje i uz veoma brzu uspostavu konekcije te uz sposobnost pružanja širokopojasnog pristupa velikom broju korisnika. Arhitektura sustava se u potpunosti bazira na IP protokolu što je također jedna od prednosti zbog novih sigurnosnih poboljšanja.

U okviru ovog diplomskog rada napravljen je niz simulacija rada LTE sustava u simulacijskom programu „Vienna LTE-A system level simulator“. Nakon analize rezultata simulacija mogu se donijeti određeni zaključci o mogućnostima i ograničenjima konfiguriranog sustava.

Udaljavanjem od bazne stanice signal gubi na snazi i kvaliteti zbog makroskopskog gušenja i interferencije. Gušenje na udaljenostima većim od 100 m je najmanje za suburbane makroćelije , a najveće za urbane mikroćelije, dok je na manjim udaljenostima najmanje gušenje za urbane mikroćelije zbog LOS propagacije i konstruktivne interferencije uslijed višestrukih refleksija o zgrade. S obzirom da su urbane mikroćelije male površinom, uvjeti u njima odgovaraju gušenju na malim udaljenostima. To potvrđuje i postignuta najveća ćelijska propusnost, spektralna efikasnost i SINR za urbane mikroćelije, u odnosu na suburbane i urbane makroćelije.

Najbolje uvjete propagacije signala i najkvalitetniji signal na uređajima postignut je u ćelijama na vanjskom rubu urbanih sredina kada se UE nalazi blizu bazne postaje. Na tim mjestima je signal bazne postaje jak, a interferencija slabija nego u ćelijama unutar promatranog područja (one okružene većim brojem baznih postaja, što povećava razinu interferencije).

U drugom scenariju je napravljena usporedba efikasnosti pravilne heksagonske i stohastičke geometrije ćelijske mreže. Upotrebom stohastičke geometrije mreže bazne postaje su distribuirane nepravilno po cijeloj ćeliji čime se dobiva nepravilna pokrivenost signalom te velika interferencije preblizu postavljenih baznih postaja. U ovim uvjetima suburbana makroćelijska okolina jedina ostvaruje poboljšanje u performansama. To se događa jer se bazne postaje u stohastičkoj mreži te suburbanoj okolini postavljaju na mjesta gdje je najveća potreba odnosno najveći broj uređaja. Zbog velikih ćelija i suburbane okoline interferencija je minimalna pa se može zaključiti da stohastička mreža pogoduje suburbanoj okolini. Signali u urbanim okolinama

se degradiraju uslijed promjene geometrije mreže zbog velike interferencije baznih stanica pa se može zaključiti kako stohastička mreža degradira signal u urbanim okolinama. Takva konfiguracija sustava je primjenjiva i u praktičnom planiraju mreže jer se bazne postaje u pravilu ne mogu postaviti u pravilnoj geometriji zbog nepristupačnog terena i ostalih prepreka.

U trećem je scenariju analiziran utjecaj dodavanja dodatnog sloja femtoćelija s omnidirekcionalnim antenama na urbane makroćelije i urbane mikroćelije. Dodavanje sloja femtoćelija nije napravljen za suburbane makroćelije, jer zbog prirode takve okoline tu nema zgrada u kojima bi bilo opravdano postavljanje femtoćelija. Nakon analize i usporedbe konfiguriranih sustava, iz rezultata se može zaključiti sljedeće: dodavanjem baznih postaja femtoćelije u zgradu, povećava se propusnost, spektralna efikasnost i SINR za UE i to za uređaje spojene na baznu stanicu femtoćelije. Mobilnim uređajima koji dobivaju signal s bazne postaje makro ćelija performanse se smanjuju, a samim time se i smanjuju ukupne performanse ćelije. Do toga dolazi zbog interferencije signala s bazne postaje femtoćelija te s bazne postaje makroćelija.

Mogućnosti simulacijskog programa „Vienna LTE-A system level simulator“ su izuzetno velike i u ovom je radu napravljen samo dio analiza koje bi se mogle provesti. Uz pristup podacima za neku stvarnu mrežu, simulacijski sustav bi se mogao konfigurirati tako da u dobroj mjeri odgovara toj mreži. Nadalje, moguće je ugrađivanje vlastitih rješenja dijelova sustava, tako da osim za edukaciju ovaj program omogućava i istraživanja.

LTE je globalno prihvaćena pristupna tehnologija koja pruža mobilne širokopojasne usluge već čitavo desetljeće. Evolucija LTE sustava će nastaviti s daljnjim poboljšanjima bez obzira na razvoj i dolazak pete generacije mobilnih celularnih mreža.

LITERATURA

[1] 3rd Generation Partnership Project (2011) 3GPP. Dostupno na: http://www.3gpp.org (30.04.2018.)

[2] E.Dahlman, S.Parkvall, J.Sköld „4G LTE, LTE-Advanced for Mobile Broadband“, 2.izdanje, Elsevier Ltd., Oxford, 2014.

[3] C.Sturman „4G LTE Spurs Mobile Connectivity Growth with Multimedia-Rich Apps and Services“, 2015.

[4] C. Cox „An introduction to LTE - LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G mobile communications“, Wiley and Sons Ltd., 2012.

[5] 3GPP TS 31.102 „Characteristics of the Universal Subscriber Identity Module (USIM) Application“, izdanje 10, listopad 2011.

[6] T. Blajić „LTE – nova tehnologija za mobilni širokopojasni pristup“, br.1, Zagreb, 2010.

[7] Lyons, R. G. „Understanding Digital Signal Processing“ izdanje 3. Prentice Hall, 2010.

[8] M. Taranetz „Vienna Simulators LTE-A Downlink System Level Simulator Documentation, v1.8r1375“ Institut telekomunikacija Beč, Austrija, veljača 2015.

[9] A. Tahat, M. Taha, „Statistical Tuning of Walfisch-Ikegami Propagation Model Using Particle Swarm Optimization“, Amman, Jordan, 2012.

[10] Eraldo Damosso, „COST 231 in the European Telecommunications Environment“, CSELT, Italy

[11] R. V. Akhpashev, A. V. Andreev, „COST 231 Hata adaptation model for urban conditions in LTE networks“ IEEE, 2016.

[12] “Recommendation ITU-R M.1225: Guidelines for evaluation of radio transmission technologies for IMT-2000,” Tech. Rep., 1997.

[13] WINNER I WP5, „Final report on link level and system level channelmodels“ IST-2003-507581, WINNER I Deliverable D5.4, 2015. (18.08.2018.)

[14] 3GPP, „Technical specification group radio access networks; Deployment aspects“ 15. izdanje, lipanj 2018. http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25943.htm (18.08.2018.).

[15] „Multi-band F-Panel Dual Polarization Half-power Beam Width Adjust. Electrical Downtilt – 742212“ Rosenhaim. https://dokumen.tips/documents/742212.html (20.04.2019.)

[16] „Multi-band F-Panel Dual Polarization Half-power Beam Width Adjust. Electrical Downtilt –742215“ Rosenhaim, http://www.selteq.com/Products/kathrein/data_sheets/742215.pdf (20.04.2019.)

[17] Z. Sun, C. Yin, and G. Yue, “Reduced-complexity proportional fair scheduling for ofdma systems,” International Conference on Communications, Circuits and Systems Proceedings, Guilin, Kina, lipanj 2006.

[18] Y. Yang, D. Shen, Y. Xie, X. Li,"Matlab Simulink of COST231-WI Model", IJWMT, izdanje.2, br.3, str.1-8, 2012.

[19] Alamouti, S. (1998) Space block coding: A simple transmitter diversity technique for wireless communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16, 1451–1458.

[20] R. K. Jain, D.-M. W. Chiu, and W. R. Hawe, “A Quantitative Measure Of Fairness And Discrimination For Resource Allocation In Shared Computer Systems,” Digital Equipment Corporation, Tech. Rep., rujan, 1984.

[21] https://www.mathworks.com/help/stats/ecdf.html (15.04.2019.)

[22] N.Hammodat, Amina & Ayoob, Saad. (2018). „Modeling and Simulating of Coordinated Multi-Point (CoMP) Technology in LTE-A“ 10.13140/RG.2.2.27772.59520.

[23] H. Claussen, „Efficient modelling of channel maps with correlated shadow fading in mobile radio systems, in IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)“ izdanje 1, str.. 512–516, Berlin, rujan, 2005.

[24] Mehlführer „The Vienna LTE simulators - Enabling reproducibility in wireless communications research“. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, čl. 29, Beč, siječanj, 2011

[25] M.Rupp, S.Schwarz, M.Taranetz „The Vienna LTE-Advanced Simulators – Up and Downlink, Link and System Level Simulation“, Instutite of Telecommunications, Beč, 2016.

[26] S. Ranvier „Path loss models - S-72.333 Physical layer methods in wireless communication systems“, HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SMARAD Centre of Excellence, studeni, 2004.

[27] H. Jahankhani, S. Yousef, „Evolution of TETRA through the integration with a number of communication platforms to support public protection and disaster relief (PPDR)“ in Cyber Crime and Cyber Terrorism Investigator's Handbook, 2014

[28] S. Wandre „EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution“, Illinois Institute of Technology, 2000.

[28] A. Grami, „Introduction to Digital Communications“, Houston, 2016.

[29] J.-M. Muñoz-Ferreras, C. Li, „Principles and Applications of RF/Microwave in Healthcare and Biosensing“, Houston, 2017

[30] M. Rumney „LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges, 2nd Edition“, John Wiley & Sons, West Sussex, 2013.

[31] A. Elnashar, M.A. El-saidny, M.R. Sherif, „Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks: Practical Approach“, West Sussex, 2014.

[32] M. L. Ferreira, A. Barahimi, J. C. Ferreira „Dynamically Reconfigurable LTE-compliant OFDM Modulator for Downlink Transmission“ INESC TEC and Faculty of Engineering of the University of Porto, 2016.

SAŽETAK

Zajedno s brzim razvojem celularne tehnologije, također je došlo i do značajnog porasta korisničkih potreba i zahtjeva. Rad daje pregled karakteristika LTE, celularne mobilne mreže za podatkovni prijenos koja ispunjava te zahtjeve. Rad se kratko osvrće na povijesni razvoj, arhitekturu sustava te detaljnije opisuje radio sučelje. Dan je opis digitalnih tehnologija za ostvarivanje velikih brzina prijenosa, kao što su napredne modulacijske tehnologije, OFDMA, MIMO više-antenski sustavi, multipleksiranje, estimacija kanala i sl. Analizirane su i performanse konfiguriranih sustava u silaznoj vezi. Performanse LTE sustava i neke njegove ključne sposobnosti su ilustrirani pomoću simulacijskih rezultata. Napravljena je analiza utjecaja propagacijske okoline, konfiguracije mreže baznih postaja te dodavanja femtoćelija na urbane makroćelije i mikroćelije na propusnost, spektralnu efikasnost i SINR. .

Ključne riječi: LTE, 4G, mobilna mreža, silazna veza, OFDMA, MIMO

ANALYSIS OF THE LTE MOBILE SYSTEM DOWNLINK

ABSTRACT

Along with the rapid development in cellular technology, there has also been a significant increase in its user demands. The paper provides an overview of the LTE characteristics, the cellular mobile packet network which fulfil that demands. The paper briefly reviews the historical development, system architecture and describes the radio interface in more detail. This paper also provides a description of digital technologies for high-speed transmission such as advanced modulation technologies, OFDMA, MIMO multi-antenna systems, multiplexing, channel estimation, etc. Downlink performance analysis of configured systems is also given. The performance of the LTE system and some of its key capabilities are illustrated using simulation results. The influence of propagation environment, base station network configuration as well as addition of femtocells, on throughput, spectral efficiency and SINR was analysed.

Keywords: LTE, 4G, mobile network, downlink, OFDMA, MIMO, multiplexing

ŽIVOTOPIS

Vedran Mendelski je rođen u Slavonskom Brodu, 09. ožujka 1995. godine. Osnovnu školu „Vjekoslav Klaić“ je pohađao u Garčinu u razdoblju od 2001. do 2009. godine. Nakon završene osnovne škole upisao je Klasičnu Gimnaziju Fra Marijana Lanosovića u Slavonskom Brodu, koju je završio 2013. godine. Iste je godine upisao sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Godine 2016. postaje sveučilišni prvostupnik inženjer elektrotehnike te iste godine upisuje sveučilišni diplomski studij elektrotehnike.