

LTE skener zasnovan na programski definiranom radiju

Maričić, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:464409>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



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

Sveučilišni studij

LTE skener zasnovan na programski definiranom radiju

Diplomski rad

Ante Maričić

Osijek, 2021.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. RAZVOJ PRETHODNIH GENERACIJA I ARHITEKTURA LTE MREŽE.....	2
2.1. Razvoj kroz povijest.....	2
2.1.1. Put od 1G prema 3G	2
2.1.2. 3G sustavi	4
2.1.3. Nužnost za LTE mrežom	5
2.1.4. Prijelaz s UMTS na LTE mrežu	6
2.2. Arhitektura EPS sustava	7
2.2.1. UE – User Equipment.....	8
2.2.2. E-UTRAN.....	11
2.2.3. EPC.....	12
2.3. Protokolni slog.....	14
2.3.1. Struktura logičkih, transportnih i fizičkih kanala.....	17
2.3.2. Prilagodba veze.....	22
2.3.3. Raspoređivanje resursa	23
3. ZRAČNO/RADIJSKO SUČELJE	26
3.1. Bežična digitalna komunikacija.....	26
3.1.1. Slanje signala.....	27
3.1.2. Prijem signala	29
3.1.3. Tehnike višestrukog pristupa	29
3.1.4. Smetnje i upravljanje pogreškama	30
3.2. OFDM	34
3.3. OFDMA	37
3.3.1. Ponovno korištenje frekvencija	38
3.3.2. Estimacija kanala.....	39
3.3.3. Umetanje cikličkog prefiksa	39
3.3.4. Korištenje frekvencijske domene.....	41
3.3.5. Odabir razmaka među podnosiocima	42
3.4. SC-FDMA	43
3.5. Tehnike višestrukih antena	44
3.5.1. Obrada diverzitija	46
3.5.2. Prostorno multipleksiranje (MIMO).....	49

3.5.3. Tehnike višestrukih antena koristeći antenske nizove	50
3.5.4. Tehnike višestrukih antena korištenjem neovisnih višestrukih antena	54
4. PROGRAMSKI DEFINIRAN RADIO (SDR)	56
4.1. RTL-SDR, LTE800 i LTE-Cell-Scanner.....	57
4.1.1. RTL-SDR	57
4.1.2. LTE800 sustav	58
4.1.3. LTE-Cell-Scanner.....	59
4.2. Mjerenje LTE800 signala	63
4.2.1. Rezultati mjerenja.....	66
5. ZAKLJUČAK.....	74
6. LITERATURA.....	76
SAŽETAK.....	79
ABSTRACT	79
PRILOZI.....	80
ŽIVOTOPIS.....	85

1. UVOD

Eksplozivni rast broja korisnika mobilnih mreža u posljednjih nekoliko desetljeća zahtijevao je rad i međusobnu suradnju globalnih standardizacijskih tijela u svrhu razvijanja i dorada mobilnih mreža. Mobilni uređaji su prvotno bili namijenjeni isključivo za glasovnu komunikaciju, dok se danas koristi za veliki broj usluga (pretraživanje, multimedija, društvene mreže itd.) čime je postao najzastupljeniji podatkovni komunikacijski uređaj današnjice. Za potrebe zadovoljavanja korisničkog iskustva i pouzdane bežične komunikacije mreže i sustavi koji ih prate sustavno su razvijani i unaprjeđivani. Prvo su se, osamdesetih godina prošlog stoljeća, pojavili analogni mobilni radio sustavi, znani kao 1G, zasnovani na FDMA (eng. *Frequency Division Multiple Access*) pristupu čija je uporaba bila nedostupna velikoj većini stanovništva. Uređaji su bili veliki, skupi, a njihov rad bio je ograničen državnim granicama. Nakon 1G, uslijedili su digitalni 2G sustavi poput GSM-a (eng. *Global System for Mobile Communications*), koji je postao najrašireniji standard, koji je omogućio digitalni prijenos podataka i glasa, efikasnije korištenje radijskog spektra te globalni roaming. Potom su se pojavili 3G sustavi čija je zadaća između ostalog bila povećati brzinu prijenosa podataka i omogućiti paketsko komutacijski prijenos na radijskom sučelju u mreže druge generacije. Ovaj rad bavi se 4G mobilnim telekomunikacijskim sustavom koji se naziva LTE (eng. *Long Term Evolution*). LTE je nastao evolucijom UMTS zemaljske pristupne mreže (eng. E – UTRAN - *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) gdje je EPC (eng. EPC – *Evolved Packet Core*) zamijenio PS (eng. PS – *Packet Switched*) domenu UMTS-a i GSM-a. Cilj rada bio je, uz pomoć programski definiranog radija, izraditi skener LTE mreže koji mjeri iznos signala u dB unutar ćelija detektiranih prilikom izvršavanja mjerenja.

Rad se sastoji od šest poglavlja. Prvo poglavlje jest uvod u kojem su opisani cilj i struktura rada. Drugo poglavlje se bavi razvojem prethodnih generacija (1G-3G) i arhitekturom LTE mreže gdje je opisana arhitektura EPS sustava i protokolni slog. Treće poglavlje bavi se zračnim sučeljem LTE mreže, gdje je pojašnjena bežična digitalna komunikacija, odnosno modulacijske tehnike koje se koriste prilikom odašiljanja i zaprimanja signala, OFDM, OFDMA, SC-FDMA te tehnike višestrukih antena koje poboljšavaju performanse bežične mobilne komunikacije. U četvrtom poglavlju, nakon što je opisan programski definiran radio (eng. SDR – *Software Defined Radio*), nalazi se analiza dobivenih rezultata. Peto poglavlje donosi zaključak o LTE mreži i rezultatima mjerenja, dok se u posljednjem, šestom poglavlju, nalazi popis korištene literature.

2. RAZVOJ PRETHODNIH GENERACIJA I ARHITEKTURA LTE MREŽE

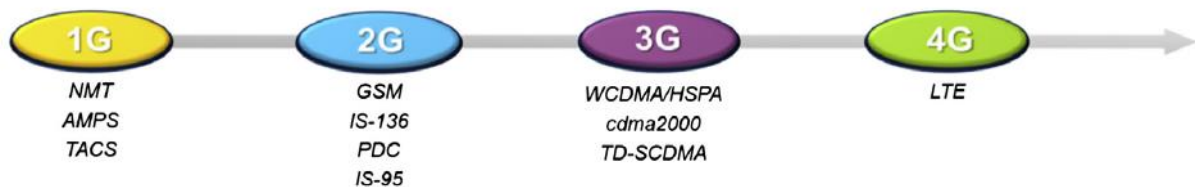
2.1. Razvoj kroz povijest

LTE (eng. *Long Term Evolution*) je nastao suradnjom državnih i regionalnih telekomunikacijskih standardizacijskih tijela, okupljenih pod nazivom *Third Generation Partnership Project* (3GPP). On je evoluirao od prethodnog 3GPP sistema znanog kao *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS), kojem je pak prethodio *Global System for Mobile Communications* (GSM) [1, 2].

2.1.1. Put od 1G prema 3G

U posljednjih nekoliko desetljeća, korištenje mobilne komunikacije postala svakodnevica. Na početku svog razvoja ovu tehnologiju si većina ljudi nije mogla priuštiti zbog visoke cijene, dok je danas ona globalna i sveprisutna u svim društvima u svijetu. Kako bi se mogla razumjeti složenost mobilnih telekomunikacijskih sustava današnjice, važno je znati od kuda i kako su se razvili ćelijski, tj. celularni sustavi. Rast i razvoj mobilne telekomunikacije izrodio je globalna standardizacijska tijela kao što je 3GPP, u čijem radu sudjeluje nekoliko tisuća ljudi.

Podjela tehnologija mobilnih telekomunikacijskih sustava najčešće se vrši u generacijama bežičnih mobilnih komunikacija. Prvotno su se pojavili analogni mobilni radio sustavi – 1G, nakon kojih su uslijedili digitalni mobilni sustavi – 2G te naposljetku prvi mobilni sustav koji je ponudio širokopolasni prijenos podataka [2, 3].



Sl. 2.1. Razvoj mobilnih komunikacijskih sustava [4]

Može se reći da je sve počelo 1947. godine kada je razvijen celularni (ćelijski) koncept od strane *Bell Labs*-a iz Sjedinjenih Američkih Država. Korištenje ćelija omogućilo je znatno povećanje kapaciteta mobilne komunikacijske mreže na način da su dijelile područje pokrivanja na manje dijelove, ćelije. Svaka ćelija dolazi sa svojom baznom stanicom koja radi na različitoj frekvenciji. Prvi sustavi bili su ograničeni na državne granice, brojili su mali broj korisnika jer je oprema na koju su se oslanjali bila skupa i velika. Uslijedila je pojava prvih sustava koji su bilježili

komercijalan rast tijekom osamdesetih godina prošlog stoljeća i postali su znani kao 1G sustavi. Oni su koristili analognu tehnologiju i obuhvaćali su niz međusobno neovisno razvijenih sustava diljem svijeta kao što su *Analogue Mobile Phone System* (AMPS, korišten u SAD-u), *Total Access Communication System* (TACS, korišten u dijelovima Europe), *Nordic Mobile Telephone* (NMT, korišten u dijelovima Europe) i *Japanese Total Access Communication System* (JTAC, korišten u Japanu i Hong Kongu). Problemi 1G sustava bili su glomazna oprema koja se uglavnom nalazila u automobilu, primjetno nekonzistentna kvaliteta glasa, a problem je predstavljao i unakrsni razgovor između korisnika. Osim toga, pojedinačne ćelije su bile velike i sustavi nisu dovoljno učinkovito koristili ponuđeni radijski spektar, pa je njihov kapacitet bio manji [3, 4].

Najrašireniji 2G standard, poznatiji kao GSM, omogućio je globalni roaming. Uspjeh GSM-a dijelom je posljedica kolaboracije i suradnje velikog broja tvrtki pod pokroviteljstvom ETSI-a (*European Telecommunications Standards Institute*), pa je tako postao robustan, interoperabilan i široko prihvaćen standard. Digitalna tehnologija omogućila je učinkovitije korištenje radijskog spektra i uporabu manjih i jeftinijih uređaja. 2G sustavi su izvorno dizajnirani za prijenos glasa, ali je daljnjim doradama podržana i izmjena poruka preko SMS-a (eng. *Short Message Service*). U početku se Europa koristila GSM tehnologijom, dok je u SAD-u prisutna bila IS-95 znana kao *cdmaOne* tehnologija koju je razvio *Qualcomm*. Rad GSM sustava zasniva se na TDMA (eng. *Time Division Multiple Access*) tehnici, dok se rad IS-95 sustava zasniva na CDMA (eng. *Code Division Multiple Access*). Potaknuta napretkom tehnologije, u vidu dizajna manjih, modernijih terminala s dugim vijekom trajanja baterije, GSM tehnologija je premašila početna očekivanja. Svijetu je ponudila tada iznimno koristan oblik komunikacije u vidu glasa, kasnije tekstualnim porukama, a u konačnici i naprednijim podatkovnim uslugama. Također, odigrala je bitnu ulogu u povezivanju zajednica i pojedinaca koji se nalaze u udaljenim regijama i krajevima u kojima nije postojala fiksna vezna za čiju bi izgradnju bila potrebna velika financijska sredstva [2].

Kako je uspjeh 2G komunikacijskih sustava pratio rast interneta, nametnula se ideja spajanja ova dva koncepta, tako što bi se korisnicima omogućilo preuzimanje podataka na mobilne uređaje. Da bi ovo bilo moguće, bilo je potrebno stvoriti tzv. 2.5G sustave koji su nadograđeni na 2G sustave. Uvođenjem jezgrenih mreža za pristup podacima i modificiranjem zračnog sučelja tako da može obrađivati podatke jednako dobro kao i glas, GPRS (eng. *General Packet Radio Service*) je nadodao ove tehnike u GSM, dok je IS-95 razvio IS.95B sustav. 2.5G nije mijenjao način prijenosa glasa, već je uveo usluge paketnog prijenosa podataka omogućujući pritom brzine od 20 do 40 kbps (eng. *kilobits per second*) koje su bile približno jednake brzini *dial-up* usluga.

Razvojem interneta, brzine dostupne za prijenos podataka povećavale su se proporcionalno. Ovaj problem se prvotno rješavao poboljšanjem performansi 2G sustava u vidu EDGE-a (eng. *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), a potom je kao odgovor na rastući broj zahtjeva na scenu stupila i treća generacija mobilnih sustava – 3G. Ovi sustavi koriste se različitim tehnikama za radio prijenos i prijem u odnosu na njihove 2G prethodnike. Povećava se vršna brzina prijenosa podataka s kojima mogu raditi, uz još učinkovitiju uporabu dostupnog radio spektra. Inicijalni 3G sustavi nisu ispunili očekivanja. Zaživjeli su nakon uvođenja 3.5G sustava 2005. godine. Ovi su sustavi u svoje zračno sučelje uključili dodatnu optimizaciju koja je bila usmjerena na podatkovne aplikacije koje povećavaju prosječnu stopu kojom korisnik može primati i slati podatke nauštrb veće varijabilnosti u samoj stopi primanja i slanja podataka te vremenu dolaska samih podataka. Brzina prijenosa paketnih podataka kroz mrežu dosegla je brzine iznad 100 kbps [2, 5].

2.1.2. 3G sustavi

Iako je pojava EDGE-a uzrokovala povećanje količine prometa koja cirkulira, standardi za razvoj mreže nisu bili uniformni u cijelom svijetu. Pojavila se potreba za mrežom koja bi nudila usluge neovisne o platformi, s jednakim i prihvaćenim standardima za projektiranje mreža. Rješenje je došlo u vidu nove generacije, 3G [6].

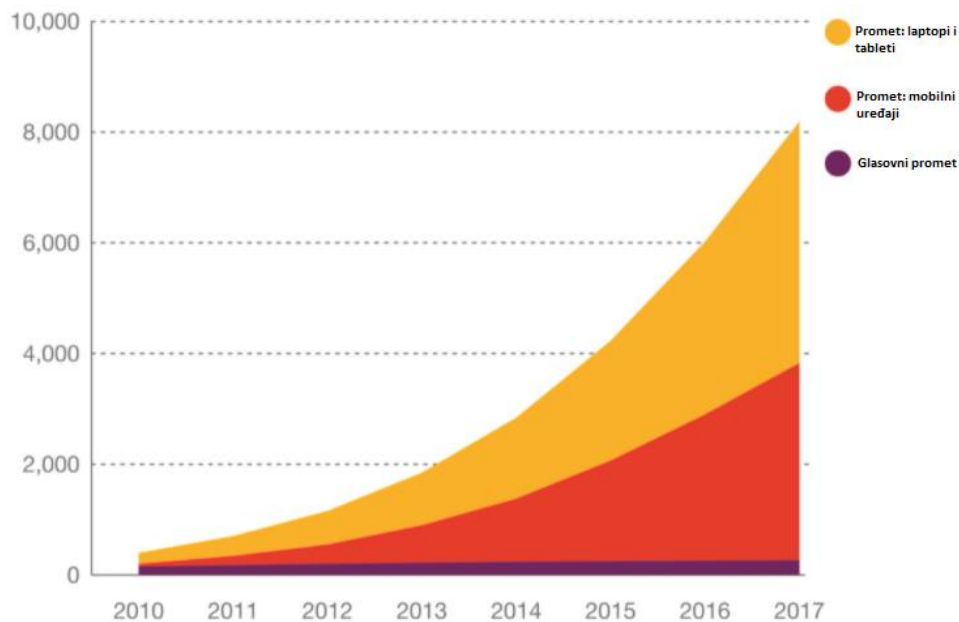
Koordinirajući razvoj 3G sustava, ITU (eng. *International Telecommunications Union*) je definirao niz zahtjeva koji su specificirali što se točno očekuje od ove generacije mobilnih radio sustava. Naglasak je bio na zahtjevima vezanim uz nove vrste podatkovnih usluga kao što su: veća brzina prijenosa podataka, podrška za asimetrični promet, paketsko komutacijski prijenos na radijskom sučelju i visoka učinkovitost spektra. ITU je zahtijevala da se postojeća fragmentacija velikog broja nekompatibilnih sustava poboljša na način da se svi ti sustavi načine međusobno kompatibilnima. Na ovaj način bi ljudi diljem svijeta imali pristup raznim mobilnim servisima, neovisno o lokaciji na kojoj se nalaze [7].

Tada se kao rješenje pojavljuje UMTS (eng. *Universal Mobile Telecommunications Service*) koji je razvijen iz GSM-a. Došlo je do izmjene tehnologije koja se koristila na zračnom sučelju, dok je jezgra mreže ostala nepromijenjena. Sustav je kasnije poboljšan za podatkovne aplikacije uvođenjem brzih 3.5G tehnologija kao što su HSDPA (eng. *High Speed Downlink Packet Access*) i HSUPA (eng. *High Speed Uplink Packet Access*), koje se zajednički nazivaju HSPA (eng. *High Speed Packet Access*) ili brzi paketni pristup. UMTS zračno sučelje realizirano je u dvije izvedbe. Prvotno je specificirana WCDMA (eng. *Wideband Code Division Multiple*

Access), koja se koristi i danas, a potom je iz nje u Kini nastala TD-SCDMA (eng. *Time Division – Synchronous Code Division Multiple Access*). Prva razlika između ove dvije tehnike je ta što WCDMA razdvaja prijenos podataka između baznih i mobilnih stanica korištenjem frekvencijskog dupleksa, dok TD-SCDMA koristi vremenski dupleks. Druga razlika između ove dvije tehnike odnosi se na širinu frekvencijskog pojasa; WCDMA koristi pojas od 5 MHz, dok TD-SCDMA koristi frekvencijski pojas širine 1.6 MHz. Posljednja tehnologija koja se pripisuje ovoj generaciji zvala se WiMAX (eng. *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) razvijena od strane IEEE (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) u sklopu standarda 802.16. Ideja je bila da se podaci umjesto fiksnim kablovima dostavljaju uz pomoć mikrovalnih veza od jedne točke do druge točke. Ubrzo nakon toga uspjelo se postići povezanost jedne točke prema više njih, pa je omogućena komunikacija jedne omnidirekionalne bazne stanice s većim brojem fiksnih uređaja. Kasnija inačice su omogućile kretanje uređaja uz prijenos (eng. *handover*) s jedne bazne stanice na drugu [2, 8].

2.1.3. Nužnost za LTE mrežom

Daljnijm širenjem i razvijanjem mobilne tehnologije glasovni poziv više nije predstavljao dominantno zastupljen tip usluge, već je to postalo slanje i primanje mobilnih podataka. Na Sl.2.2. prikazan je rast prometa mobilnih podataka na mjesečnoj bazi iskazan u petabajtima (1000^5 bajta). Prikazani rast bio je potaknut povećanom dostupnosti za 3.5G komunikacijske tehnologije. Bitnu ulogu odigrala je i tvrtka *Apple* uvođenjem svog *iPhone*-a 2007. godine, da bi 2008. godine *Google* uveo uređaje koje se baziraju na novom operativnom sustavu *Android*. Pojava pametnih mobilnih uređaja rezultirala je njihovom ekspanzijom na tadašnjem tržištu. Bili su jednostavniji za korištenje od svojih prethodnika i nudili su podršku za stvaranje novih aplikacija nezavisnim programerima i inženjerima. Rastući broj takvih aplikacija i njihovo korištenje rezultiralo je drastičnim povećanjem količine prometa koja je rasla iz godine u godinu.



Sl. 2.2. Rast globalnog prometa mobilnim podacima u razdoblju između 2010. i 2017. godine [9]

Kao otegotna okolnost može se smatrati odluka mrežnih operatera da započnu paušalno naplaćivati neograničeno preuzimanje podataka. Ovo je dovelo do situacije u kojoj se nitko nije obazirao na ograničenje vlastite potrošnje podataka. Ishod svega toga je zagušenje 2G i 3G mreža nedugo nakon 2010. godine, pa se tako javila potreba za povećanjem mrežnog kapaciteta [2].

2.1.4. Prijelaz s UMTS na LTE mrežu

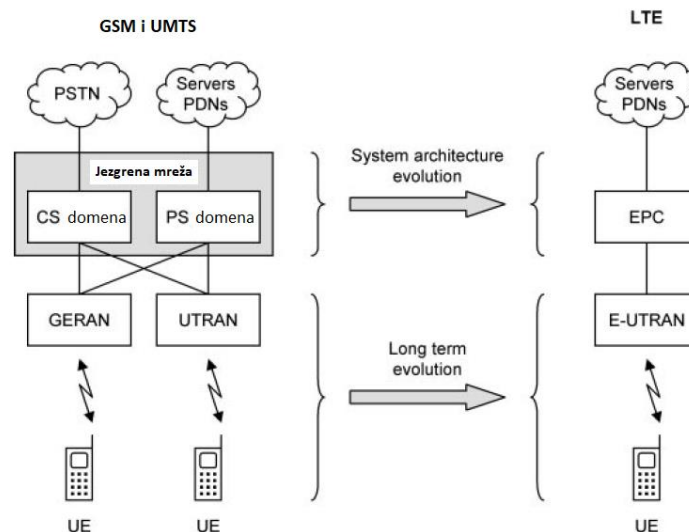
Potkraj 2004. godine, 3GPP grupa za tehničke specifikacije radijskih sučelja (eng. TSG RAN – *Technical Specification Group Radio Access Network*) počinje s prvim koracima prema dugoročnoj evoluciji 3G radijskog sučelja. Ovo je polazišna točka u razvoju LTE standarda. Cilj je bio održati 3GPP mobilne komunikacijske sustave kompetitivnima u narednih 10 ili više godina, na način da će omogućiti velike brzine prijenosa podataka uz nisku latenciju.

Razni istraživački instituti, operatori i proizvođači opreme iznijeli su svoje prijedloge vezane uz evoluciju UMTS zemaljske radijske pristupne mreže (eng. E – UTRAN - *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) [8]. Na slici 2.3. prikazan je način na kojeg je iz UMTS-a nastala nova arhitektura E-UTRAN u kojoj je EPC (eng. *Evolved Packet Core*) zamijenio PS (eng. *packet switched*) domenu UMTS-a i GSM-a. EPC isporučuje sve vrste podataka korisnicima, bilo u vidu glasa ili mobilnih podataka. Također, u novoj arhitekturi ne postoji alternativa za CS (eng. *circuit switched*) domenu, pa se glasovni pozivi prenose koristeći VoIP (eng. *Voice over IP*). E-UTRAN brine o radio komunikaciji između EPC-a i mobilnog uređaja i tako predstavlja izravnu

zamjenu za UTRAN. Na mobilne uređaje se i dalje referira kraticom UE (eng. *user equipment*). Sam rad i unutarnje postavke uređaja se razlikuju u odnosu na rad s 3G mrežom. Novonastala arhitektura sastojala se od dva dijela:

- SAE (eng. *System Architecture Evolution*), koji se bavi jezgrom mreže;
- LTE (eng. *Long Term Evolution*) koji se bavi radijskom pristupnom mrežom, zračnim sučeljem i mobilnim uređajima.

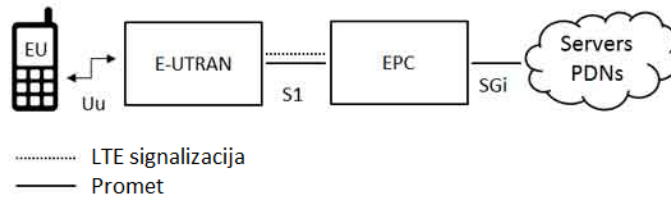
Službeno, SAE i LTE objedinjeni su pod nazivom EPS (eng. *Evolved Packet System*). Premda se kratica LTE odnosi samo na evoluciju zračnog sučelja, ona kasnije postaje naziv za cijeli novo osmišljeni sustav kojeg kasnije koristi 3GPP [2, 8].



Sl. 2.3. Razvoj arhitekture GSM-a i UMTS-a u LTE [2]

2.2. Arhitektura EPS sustava

Opisi LTE i SAE u ovom diplomskom radu odnose se na tehnologije koje je 3GPP specificirao u svojem osmom izdanju specifikacija (eng. *Release 8*) kao temelj za evoluciju 3G mobilnih mreža. Stvarna mreža zasnovana na tim tehnologijama će tvoriti ranije spomenuti evoluirani paketni sustav (EPS). EPS se sastoji od korisničke opreme (eng. UE - *User Equipment*), evoluirane paketne jezgrene mreže (EPC) i od evoluirane UMTS zemaljske radijske pristupne mreže (E-UTRAN) kao što prikazuje slika 2.4.

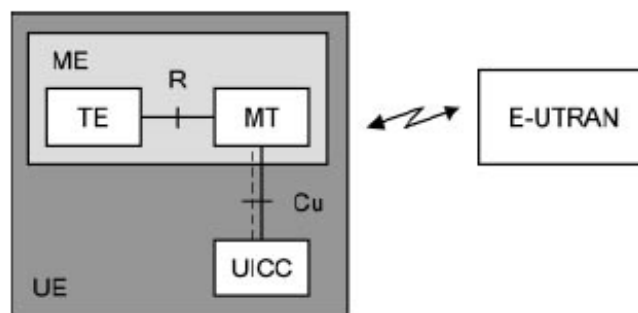


Sl. 2.4. Arhitektura EPS sustava [10]

Uloge EPC-a su: pružanje pristupa prema vanjskim podatkovnim mrežama (npr. Internet) i operatorskim servisima (npr. MMS (eng. Multimedia Messaging Service), MBMS (eng. *Multimedia Broadcast Multicast Service*)); pretplatničkim informacijama; upravljanje funkcijama vezanim uz sigurnost kao što su autentifikacija; dodjela sigurnosnih ključeva; naplata i mobilnost prema drugim mrežama (GERAN, UTRAN, CDMA2000, WLAN...) te praćenje mobilnosti neaktivnih terminala. E-UTRAN se bavi svim radijskim funkcijama za aktivne terminale. Sastoji se od osnovnih radijskih postaja (eng. eNB - *e-Node B*). Korisnički terminal izravno je povezan na E-UTRAN, dok se dio funkcionalnosti protokolnog sloga kontrolne ravnine zatvara u EPC. Sučelja različitih dijelova sustava označena su s Uu, S1 i S-Gi. Svaki od dijelova EPS-a ima vlastitu, internu arhitekturu, pa u nastavku slijedi pregled svake od njih [2, 8].

2.2.1. UE – User Equipment

Na slici 2.5. prikazana je interna arhitektura korisničke opreme (UE). Arhitektura UE-a kod LTE-a ne razlikuje se od one koju koriste UMTS i GSM.



Sl. 2.5. Interna arhitektura korisničke opreme (UE) [2]

Uređaj koji vrši komunikaciju označava se kraticom ME (eng. *Mobile Equipment*). On se daljnjom podjelom dijeli u dvije komponente:

- MT (eng. *Mobile Termination*) koja upravlja svim komunikacijskih funkcijama;
- TE (eng. *Terminal Equipment*) čija je uloga podatkovni prijenos i prekid toka podataka.

Kraticom UICC (eng. *Universal Integrated Circuit Card*) predstavljena je pametna kartica, koja se još naziva i SIM (eng. *Subscriber Identity Module*) kartica, kojom se pokreće USIM (eng. *Universal SIM*) modul koji za ulogu ima pohranjivanje korisničkih podataka kao što su broj telefona i identitet znane mreže. USIM također provodi razne proračune koji se nadovezuju uz sigurnost koristeći sigurne ključeve koje pohranjuje pametna kartica. LTE podržava uređaje koji koriste USIM od izdanja 99 (eng. R99 - *Release 99*) i kasnije, a ne podržava SIM kojeg su koristila ranije izdanja GSM-a.

Sve LTE mreže su bazirane na IP-u (eng. *Internet Protocol*). To znači da one dostavljaju sav promet u vidu IP paketa, pružajući tako korisnicima status uvijek aktivne IP konekcije. Uređaji koriste IP verziju 4 (IPv4), verziju 6 (IPv6) ili dvojnju verziju IPv4/IPv6. Oni primaju IP adresu svakog mrežnog paketnog podatka koji sudjeluje u komunikaciji. Nadalje, uređaj je sposoban primiti IPv4 adresu, kao i IPv6 adresu, ukoliko sam uređaj i mreža podržavaju obje verzije protokola. Širok raspon mobilnih uređaja utjecao je na različitosti radijskih karakteristika između uređaja, pa se one razlikuju prema: maksimalnoj brzini prijenosa podataka, različitim varijantama radijske pristupne tehnologije koju podržavaju i prijenosnoj frekvenciji na kojima mogu odašiljati i primiti podatke. Mobilni uređaji komuniciraju s pristupnom mrežom na način da prosljeđuju informacije o vlastitim karakteristikama u vidu signalizacijskih poruka kako bi E-UTRAN znao kako njima dalje upravljati. Karakteristike mobilnih uređaja koje su neophodne za rad su grupirane i podijeljene u tzv. UE kategorije. LTE koristi kategorije ili klase korisničke opreme kako bi jasno definirao specifikacije performansi i tako baznim stanicama omogućio učinkovitu komunikaciju s mobilnim uređajima znajući za njihovu razinu izvedbe. Slijedi pregled kategorija u tablici 2.1.

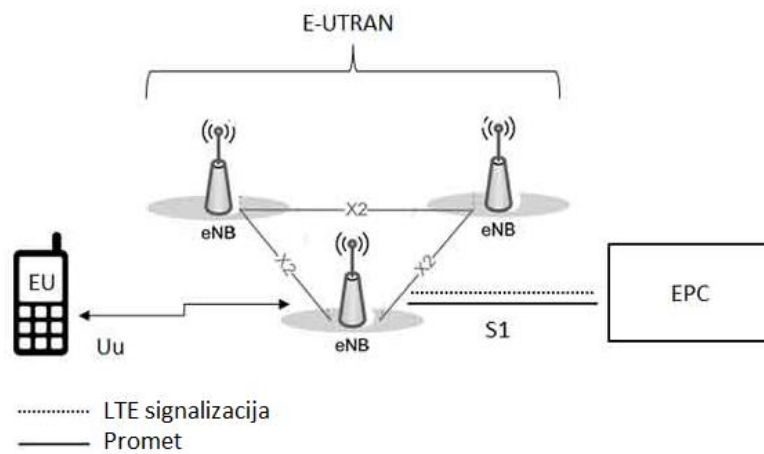
Tab.2.1. Kategorije korisničke opreme (UE) [11]

Kategorija korisničke opreme	Maksimalna brzina prijenosa podataka u DL u [Mbit/s]	Maksimalan broj DL MIMO slojeva	Maksimalna brzina prijenosa podataka u UL u [Mbit/s]	3GPP izdanje
NB1	0.68	1	1.0	13
M1	1.0	1	1.0	
0	1.0	1	1.0	12
1	10.3	1	5.2	8
2	51.0	2	25.5	
3	102.0	2	51.0	
4	299.6	2	51.0	
5	150.8	4	75.4	
6	301.5	2/4	51.0	10
7	301.5	2/4	102.0	
8	2998.6	8	1497.8	
9	452.2	2/4	51.0	11
10	452.2	2/4	102.0	
11	603.0	2/4	51.0	
12	603.0	2/4	102.0	
13	391.7	2/4	150.8	12
14	391.7	8	9585	
15	750	2/4	226	
16	979	2/4	-	
17	25065	8	-	13
18	1174	2/4/8	-	
19	1566	2/4/8	-	

Maksimalna brzina prijenosa podataka za uzlaznu vezu (eng. UL - *uplink*) i silaznu vezu (eng. DL - *downlink*), u gore prikazanoj tablici, prikazana je za širinu kanala od 20 MHz. Definirano je 20 različitih LTE UE kategorija. Kao što se može vidjeti u danju tablici, različite LTE kategorije imaju širok raspon podržanih parametara i performansi. Npr. LTE UE kategorija 1 ne podržava MIMO (eng. *Multiple Input Multiple Output*), dok LTE UE kategorija 5 podržava 4x4 MIMO. MIMO sustav, koji će kasnije u radu biti pojašnjen, poboljšava karakteristike radijskog sustava prema dva načela: prostornom multipleksiranju i prostornom diverzitetu. Važno je napomenuti da UE klasa 1 ne nudi performanse jednake onima koje nudi ona klasa s najvišom izvedbom HSPA kategorije. 3GPP izdanje 8 definira pet kategorija LTE korisničke opreme ovisno o maksimalnoj brzini podataka i podršci za MIMO. S 3GPP izdanjem 10, kojeg se kasnije naziva LTE Advanced, uvedene su tri nove kategorije, a pojavljuju se još četiri kategorije uvođenjem izdanja 11.

2.2.2. E-UTRAN

Interna arhitektura E-UTRAN-a prikazana je slikom 2.6.



Sl. 2.6. E-UTRAN arhitektura [10]

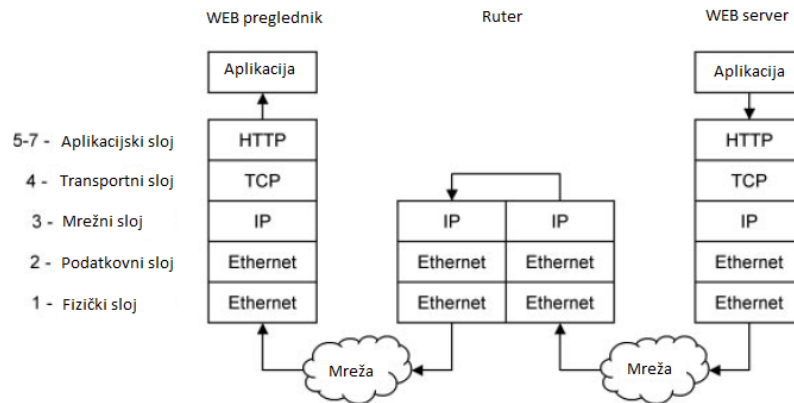
E-UTRAN radijska pristupna mreža upravlja komunikacijom između mobilnog uređaja i EPC-a. Sastoji se od samo jedne komponente, osnovne radijske postaje eNB koja predstavlja čvor radijske pristupne mreže koji je odgovoran za odašiljanje i prijem od strane UE-a. Svaka pojedina postaja predstavlja baznu stanicu koja upravlja mobilnim uređajima u jednoj ili više ćelija, najčešće tri. Bazna postaja koja vrši komunikaciju s mobilnim uređajem naziva se uslužna radijska postaja. Ona obavlja dvije funkcije:

- Odašiljanje radijskog signala svim mobilnim uređajima u silaznoj vezi (DL) i primanje signala od njih na uzlaznoj vezi (UL), upotrebljavajući pritom analogne i digitalne funkcije za obradu signala LTE zračnog sučelja;
- Kontrola rada svih mobilnih uređaja, s kojima postoji veza, na niskoj razini na način da se putem signalizacijskih poruka šalju naredbe za npr. predaju (eng. *handover*) i sl.

Sprovođenje ovih funkcija zahtijeva korištenje sposobnosti radio postaja LTS mreže za kontrolu radijske mreže u svrhu smanjenja kašnjenja do kojih dolazi prilikom razmjene informacija između mobilnog uređaja i mreže. Između EPC-a i E-UTRAN-a nalazi se S1 sučelje, dok su razni eNB čvorovi povezani s X2 sučeljem.

Svaka bazna stanica povezana je na EPC putem S1 sučelja, a može biti povezana s obližnjim baznim stanicama putem X2 sučelja čija je uloga upravljanje signalizacijom i odašiljanje paketa tijekom predaje. Sučelje X2 nije nužno, jer sučelje S1 nudi iste funkcije rukovanja kao i

X2, ali na sporiji i manje direktan način. Sučelja S1 i X2 nisu izravno fizički povezana, već se umjesto toga informacije šalju putem IP transportne mreže kao što je prikazano slici koja slijedi (SI.2.7).

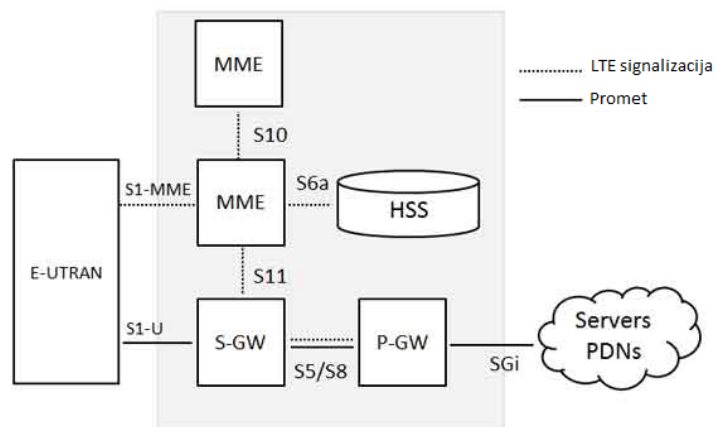


SI. 2.7. Komunikacijski protokoli korišteni od strane Interneta i njihova uloga u slojevima OSI modela [2]

Femto ćelije, odnosno sićušne bazne stanice male snage koje su dizajnirane za stambene prostore ili male tvrtke predstavljene su kućnom radio postajom (eng. HeNB - *Home eNB*). Kućni eNB spada u grupu zatvorenih pretplatnika (eng. CSG - *Closed Subscriber Group*). Sa stajališta arhitekture, HeNB može biti izravno povezan na EPC na isti način kao i bilo koja druga bazna stanica. Nadalje, HeNB se može povezati na EPC putem posrednih uređaja poput HeNB poveznika (eng. *Home eNB Gateway*) koji prikuplja podatke iz nekoliko matičnih eNB-ova.

2.2.3. EPC

Slika 2.8. prikazuje glavne komponente evoluirane paketne jezgrene mreže.



SI. 2.8. Interna arhitektura EPC-a [10]

HSS (eng. *Home Subscriber Server*) predstavlja centralnu bazu podataka i on donosi informacije o svim pretplatnicima mrežnog operatera. Ova komponenta jedna je od rijetkih komponenti LTE-a koja je prenesena iz UMTS-a i GSM-a.

P-GW (eng. *PDN-Gateway*) predstavlja dio paketne mreže (eng. *PDN - Packet Data Network*) preko kojeg EPC komunicira s vanjskim svijetom (npr. Internetom). Preko SGi sučelja, svaki P-GW izmjenjuje podatke s jednim ili više vanjskih uređaja ili mreža za paketni prijenos podataka, kao što su serveri mrežnih operatera, Internet ili podsustavi IP multimedije. Svaka PDN označuje se nazivom pristupne točke (eng. *APN - Access Point Name*). Mrežni operateri karakteristično koriste pregršt različitih APN-ova, primjerice jedan za vlastiti poslužitelj i jedan za Internet. Mobilni uređaji se dodjeljuju zadanom P-GW-u (eng. *default P-GW*) nakon prvog uključivanja, kako bi zadobili trajnu povezanost s mrežom za paketni prijenos podataka kao što je Internet. Ukoliko se uređaj želi povezati s privatnom korporacijskom mrežom, tada će se uređaj dodijeliti jednom ili više P-GW-a. P-GW se ne mijenja tijekom cijelog trajanja podatkovne veze.

Uslužni poveznik, čvor upravljačke ravnine, (eng. *S-GW - Serving-Gateway*) djeluje kao usmjerivač i on prosljeđuje podatke između bazne stanice i P-GW-a. Povezuje EPC s LTE RAN-om (eng. *Long Term Evolution Radio Access Network*). S-GW djeluje kao sidro mobilnosti kada se terminali pomiču između eNB-ova, kao i sidro mobilnosti za druge 3GPP tehnologije kao što su GSM, GPRS I HSPA. Uobičajena mreža može se sastojati od više S-GW-a gdje svaki od njih brine o mobilnim uređajima iz određenog geografskog područja. S-GW je dodijeljen svakom mobilnom uređaju, no on se mijenja za uređaje ukoliko uređaji napuste područje prethodno dodijeljenog S-GW-a. Također, S-GW se bavi i prikupljanjem informacija i statistika potrebnih za naplatu.

Entitet upravljanja mobilnošću MME (eng. *Mobile Management Entity*) jest čvor upravljačke ravnine koji upravlja radom mobilnog uređaja na visokoj razini tako što šalje signalizacijske poruke o problemima vezanim uz sigurnost i upravljanjem podatkovnih prijenosa koje nisu direktno povezani s radio komunikacijama. Odgovoran je za spajanje i otpuštanje nosioca na terminal, upravljanje prijelazom iz stanja mirovanja u aktivno stanje te upravljanje sigurnosnim ključevima. Kako bi se odvojila funkcija *Access Stratum*-a (AS), koja djeluje između terminala i radijske pristupne mreže, funkcionalnost koja djeluje između EPC-a i terminala ponekad se naziva *Non-Access Stratum* (NAS). Mreža se, kao i od više S-GW-a, može sastojati i od više MME-a. Svaki MME pokriva određeno geografsko područje. Svaki mobilni uređaj se dodjeljuje jednom MME-u kojeg nazivamo njegov uslužni MME, a on se mijenja ovisno o udaljenosti od mobilnog

uređaja. MME se također bavi i kontrolom ostalih elemenata mreže preko signalizacijskih poruka koje ostaju unutar EPC-a [2, 4].

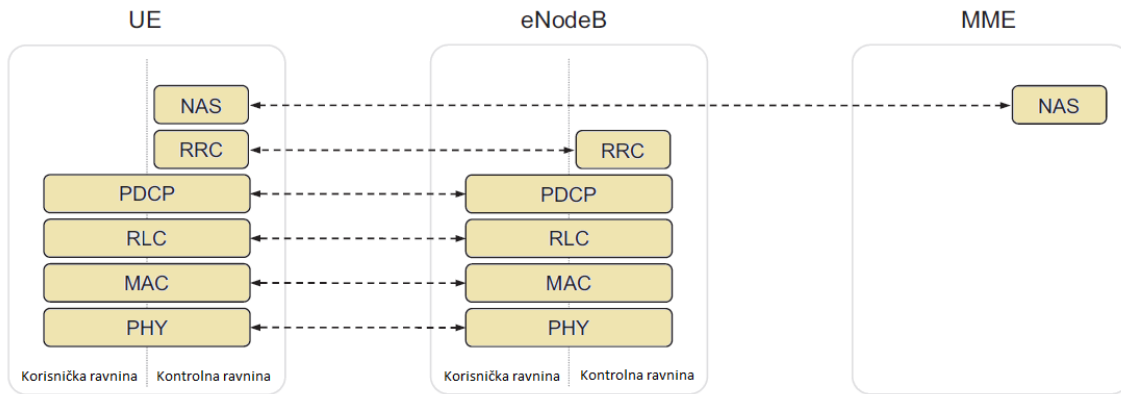
Usporedba s UMTS-om i GSM-om ukazuje da PDN poveznik ima istu ulogu kao GGSN (eng. *GPRS Gateway Support Node*), dok S-GW i MME obrađuju funkcije vezane za usmjeravanje podataka i signalizaciju nalik SGSN-u (eng. *Serving GPRS Support Node*) u UMTS-u i GSM-u. Razdvajanje SGSN-a na dva dijela olakšava operaterima skaliranje mreže kao odgovor na povećanje opterećenja koje se pojavljuje u mreži. Operater može dodati više S-GW-a proporcionalno povećanju prometa, dok će se dodavanjem više MME-ova riješiti problem većeg broja mobilnih uređaja. Kako bi se ova podjela sprovela, S1-U sučelje prenosi promet za S-GW, dok S1-MME sučelje prenosi signalne poruke za MME. Nadalje, EPC sadržava još nekoliko dijelova koji nisu prikazani na slici 2.8. Centar za ćelijsku emisiju (eng. *CBC - Cell Broadcast Centre*) koristio je UMTS za implementaciju usluga za ćelijsku emisiju (eng. *CBS - Cell Broadcast Service*). Ta oprema je u LTE mreži prenamijenjena u svrhu pružanja usluge sustava koji upozorava na potrese i tsunamije (eng. *ETWS - Earthquake and Tsunami Warning System*). Također, naslijeđen je registar opreme (eng. *EIR - Equipment Identity Register*) iz UMTS-a, a služi za pronalazak izgubljenih ili ukradenih mobilnih uređaja [2].

2.3. Protokolni slog

Arhitekturu LTE radijske pristupne mreže (LTE RAN) sačinjavaju dvije ravnine:

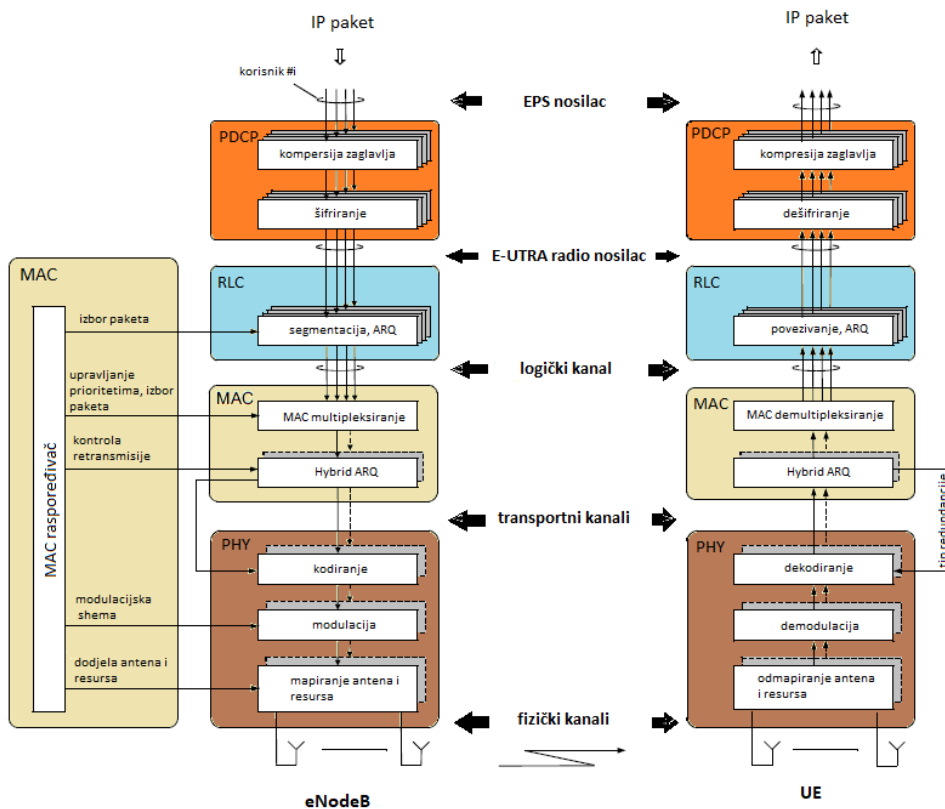
- korisnička (eng. *user plane*) – rukuje s podacima koji su od značaja korisniku;
- kontrolna (eng. *control plane*) – rukuje signalizacijskim porukama koje su od značaja samim mrežnim elementima.

Sva fizička sučelja povezana su sa protokolnim slogom, omogućavajući tako mrežnim elementima razmjenu podataka i signalizacijskih poruka neophodnih za rad. Protokolni slog također ima dva glavna sloja. Gornji sloj rukuje informacijama na način specifičan za LTE, dok donji, transportni sloj prenosi informaciju od jedne točke prema drugoj. Dakle, signalizacijskim protokolima iz kontrolne ravnine definiran je jezik kojim će se uređaji međusobno sporazumijevati, protokoli korisničke ravnine rukuju podacima u korisničkoj ravnini (najčešće potpomažu usmjerivanje podataka u mreži), a transportni protokoli usmjeruju podatke i signalizacijske poruke od jedne točke prema drugoj. Korisnička i kontrolna ravnina dijele mnoge od protokolnih entiteta, kao što prikazuje slika 2.9.



Slika 2.9. Opća protokolna arhitektura RAN-a [4]

LTE RAN nudi jedan ili više radio nosioca prema kojima se IP paketi mapiraju ovisno o njihovim zahtjevima za kvalitetu usluge (eng. QoS – *Quality of Service*). Slika 2.10. prikazuje strukturu LTE radijskog sučelja i kratak pregled protokolnih entiteta.



Slika 2.10. Struktura radijskog sučelja LTE [8]

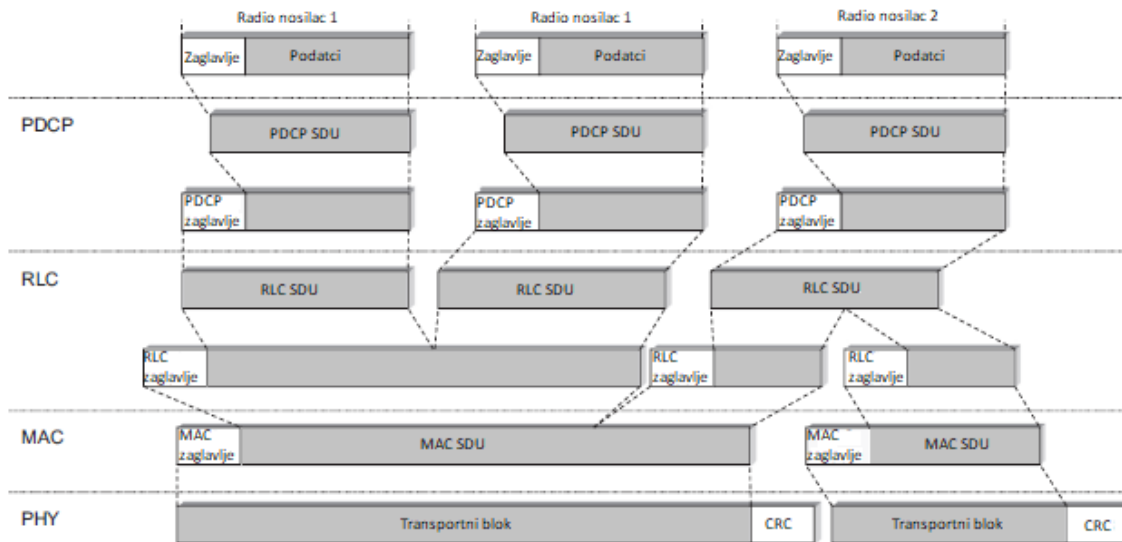
Protokol konverzije paketa podataka (eng. PDCP – *Packet Data Convergence Protocol*), specificiran od strane 3GPP-a, koristi se za kompresiju IP zaglavlja čime se smanjuje broj bitova koji je potrebno prenijeti putem radijskog sučelja. Sam mehanizam sažimanja zaglavlja zasniva se na ROHC-u (eng. *Robust Header Compression*) algoritmu koji se koristi u još nekim tehnologijama mobilne komunikacije, a definiralo ga je IETF (eng. *Internet Engineering Task Force*). Osim funkcije sažimanja, PDCP algoritam također vrši šifriranje te, u korisničkoj ravnini, zaštitu integriteta prenesenih podataka, redosljed isporuke i uklanjanje duplikata radi predaje. Na prijemnoj strani ovaj protokol izvršava odgovarajuće operacije dešifriranja i dekompresije, a javlja se samo jedan konfigurirani PDCP entitet po radijskom nosiocu, tj. mobilnom uređaju [3, 4].

Kontrola radio veze (eng. RLC – *Radio Link Control*) pruža funkcije segmentacije i ponovnog sastavljanja paketa gornjeg sloja kako bi se oni prilagodili veličini koju je moguće prenijeti putem radijskog sučelja. Za radijske nosioce, koji zahtijevaju prijenos bez pogrešaka, RLC sloj izvršava retransmisiju paketa u svrhu dohvaćanja izgubljenih paketa. Uz to, ovaj sloj izvodi preuređivanje kako bi kompenzirao prijem izvan pogona zbog rada hibridnih automatskih ponovljenih zahtjeva (eng. HARQ – *Hybrid Automatic Repeat reQuest*) u nižem sloju. Postoji jedan RLC entitet po radio nosiocu [3].

Sloj srednje kontrole pristupa (eng. MAC – *Medium Access Control*) izvršava multipleksiranje podataka raznih radijskih nosioca. Postoji samo jedan MAC entitet po mobilnom uređaju. Kada se odredi količina podataka koja se može prenijeti sa svakog radijskog nosioca i kada RLC sloj odredi veličinu paketa koju treba pružiti, MAC sloj pokušava ostvariti dogovorenu kvalitetu usluge za svaki radio nosioc.

Na odašiljačkoj strani, svaki sloj zaprima servisnu podatkovnu jedinicu (eng. SDU – *Service Data Unit*) s višeg sloja za koju trenutni sloj pruža uslugu, a predaje protokolnu podatkovnu jedinicu (eng. PDU – *Protocol Data Unit*) nižem sloju. RLC sloj prima pakete od PDCP sloja. Ti paketi se nazivaju PDCP PDU paketi s gledišta PDCP-a i predstavljaju RLC SDU s gledišta RLC-a. Paketi koje RLC sloj pruža MAC sloju su RLC PDU s gledišta RLC-a i MAC SDU s MAC kuta gledišta. Na prijemnoj strani, procesi su obrnuti, pa tako svaki sloj prosljeđuje SDU sloju iznad, gdje se oni zaprimaju kao PDU. Iznimno bitna značajka dizajna LTE protokolnog sloga jest da su SDU i PDU poravnati u bajtovima. To znači da su dužine SDU i PDU jedinica višekratnici 8 bita. Ova značajka olakšava rukovanje mikroprocesora, koji su uobičajeno definirani za rukovanje paketima u jedinicama bajtova. Kako bi se dodatno smanjili zahtjevi za obradom korisničke ravnine protokolnog stoga LTE-a, zaglavlja koja kreiraju PDCP, RLC i MAC sloj su

također poravnata u bajtovima. To znači da su ponekad potrebni neiskorišteni bitovi kako bi se zaglavlje popunilo, a samim time trošak dizajna za učinkovitu obradu uključuje gubitak male količine potencijalno dostupnog kapaciteta [3].



Slika 2.11. Primjer LTE podatkovnog toka [4]

Kao što prikazuje slika 2.11., PDCP vrši kompresiju IP zaglavlja, nakon čega se pokreće proces šifriranja. Dodaje se PDCP zaglavlje koje sadrži informacije potrebne za dešifriranje u terminalu. Izlaz iz PDCP-a se prosljeđuje RLC-u. RLC protokol vrši spajanje i/ili segmentaciju PDCP SDU-a i dodaje RLC zaglavlje. Zaglavlje se koristi za slijednu isporuku (po logičkom kanalu) u terminal i identifikaciju RLC PDU-a u slučaju retransmisije. RLC PDU se šalju na MAC sloj, koji multipleksira RLC PDU-e i spaja ih u MAC zaglavlje koje tvori transportni blok. Veličina transportnog bloka ovisi o trenutnoj brzini prijenosa koju odabire mehanizam prilagodbe veze. Dakle, prilagodba veze utječe na MAC i RLC obradu. U konačnici, fizički sloj dodaje provjeru cikličke zalivosti (eng. CRC – *Cyclic Redundancy Check*) na transportni blok u svrhu otklanjanja pogrešaka, izvodi kodiranje i modulaciju, odašilje rezultatni signal, nudi mogućnost korištenja više odašiljačkih antena [4].

2.3.1. Struktura logičkih, transportnih i fizičkih kanala

MAC sloj koristi logičke kanale kako bi pružio usluge RLC sloju. Svaki logički kanal definira tip informacije koju on prenosi. U LTE-u, postoje dvije kategorije logičkih kanala ovisno o usluzi koju pružaju: logički kontrolni kanali i logički prometni kanali.

Logički kontrolni kanali koji se koriste za prijenos informacija u kontrolnoj ravnini su:

- Kontrolni kanal emitiranja (eng. BCCH – *Broadcast Control Channel*) – odašilje sistemske kontrolne informacije mobilnim terminalima u ćeliji u silaznoj vezi, uključuje pojasnu širinu sustava, uključuje konfiguraciju antene i snage referentnog signala. Zbog velike količine informacija koja se prenosi BCCH kanalom, vrši se mapiranje na dva transportna kanala: odašiljački kanal (eng. BCH – *Broadcast Channel*) i dijeljeni kanal u silaznoj vezi (eng. DL-SCH – *Downlink Shared Channel*);
- Kontrolni kanal za grupno odašiljanje (eng. MCCH – *Multicast Control Channel*) – kanal za prijenos kontrolnih informacija prema UE-ovima u ćeliji. Koriste ga samo oni UE-ovi koji primaju multicast/broadcast usluge, a princip odašiljanja je od jedne točke prema više točaka;
- Kontrolni kanal za upravljanje radio pozivima (eng. PCCH – *Paging Control Channel*) – kanal koji prenosi radio pozive registriranim terminalima u silaznoj vezi. Koristi se za radio pozive terminalima čija lokacija na razini ćelije nije poznata, stoga se *paging* poruke odašilju u više ćelija;
- Zajednički upravljački kanal (eng. CCCH – *Common Control Channel*) – dvosmjerni kanal za odašiljane kontrolnih informacija između mreže i UE-ova kada ne postoji dostupna RRC (eng. *Radio Resource Control*) konekcija s mrežom, a koristi se i kada mobilne stanice koriste zajedničke transportne kanale prilikom pristupanja novoj ćeliji nakon reizbora ćelije;
- Namjenski nadzorni kanal (eng. DCCH – *Dedicated Control Channel*) – dvosmjerni kanal za odašiljanje kontrolnih informacija između mreže i mobilne stanice; koristi se za pojedinačnu konfiguraciju terminala kao što su različite poruke predaje (*handovera*) te kada postoji RRC konekcija, tj. mobilna stanica je spojena na mrežu, kao i za odašiljanje od točke do točke.

Transportni logički kanali, koji prenose informacije u korisničkoj ravnini su:

- Namjenski prijenosni kanal (eng. DTCH – *Dedicated Traffic Channel*) – koristi se za prijenos kontrolnih informacija prema ili od terminala; ovaj kanal se koristi za individualnu konfiguraciju terminala; može postojati i u silaznoj i u uzlaznoj vezi
- Prometni kanal za grupno odašiljanje (eng. MTCH – *Multicast Traffic Channel*) – jednosmjerni kanal koji odašilje prometne podatke s mreže na mobilne uređaje; odašiljanje od točke prema više njih

Fizički sloj koristi transportne kanale kako bi pružio usluge MAC sloju. Transportni kanali karakteriziraju način i karakteristike kojima se podaci prenose preko radijskog sučelja, tj. sheme kodiranja kanala, modulacijske sheme i mapiranje antena. LTE definira dva MAC entiteta, jedan u UE i jedan u E-UTRAN-u, uz pomoć kojih se upravlja potonjim uzlaznim i silaznim transportnim kanalima. Podaci koji se prenose transportnim (prijenosnim) kanalima organizirani su u transportne blokove (eng. *transport blocks*). U svakom transmisijskom vremenskom intervalu (eng. TTI – *Transmission Time Interval*) se najviše jedan transportni blok dinamički promjenjive veličine prenosi na/s terminala u nedostatku prostornog multipleksiranja. Kada je riječ o prostornom multipleksiranju (MIMO) mogu postojati do dva transportna bloka po TTI-u. Na svaki transportni blok nadovezuje se transportni format (eng. *transport format*) koji određuje način na koji će se transportni blok prenositi preko radijskog sučelja. Transportni format objedinjuje podatke o veličini samog bloka, modulacijskoj shemi, shemi kodiranja i mapiranju antene. Mijenjanjem transportnog formata MAC sloj može ostvariti različite brzine prijenosa podataka [4, 8, 12].

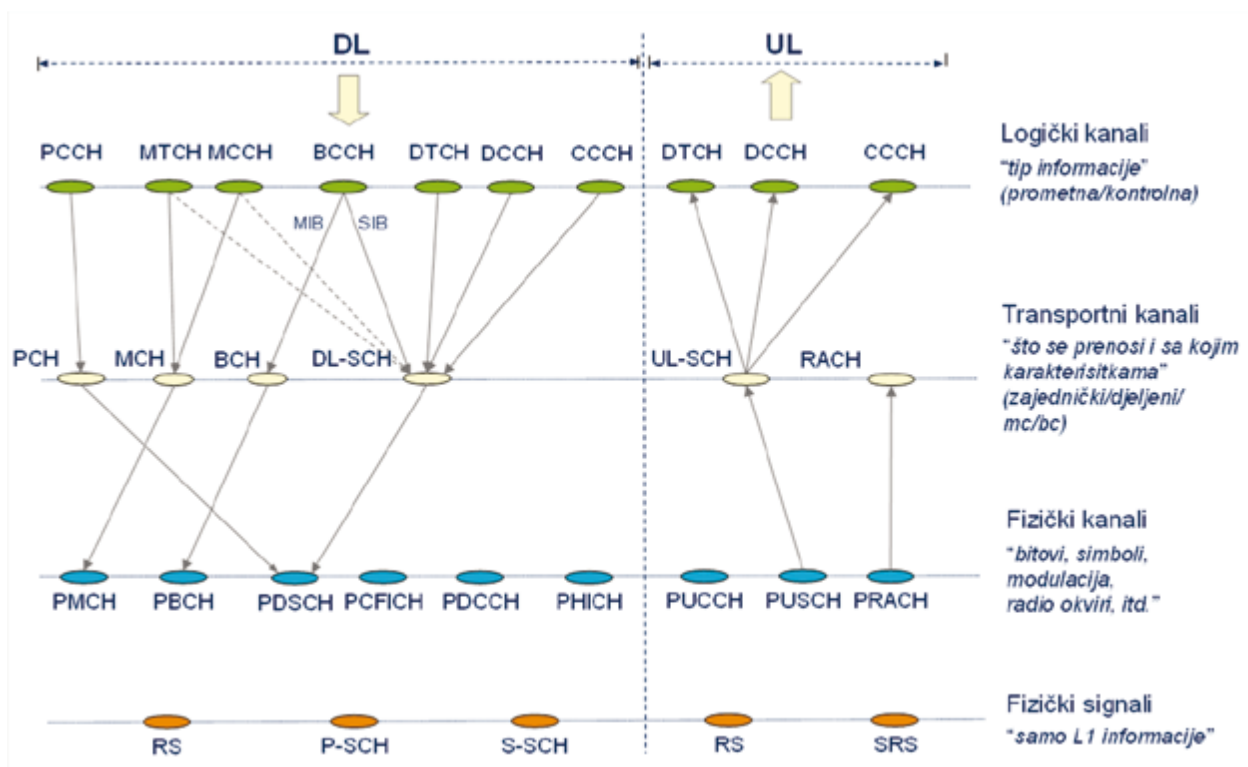
Slikom 2.12. prikazano je mapiranje kanala u silaznoj i uzlaznoj putanji.

Silazni transportni kanali:

- Silazni dijeljeni kanal (eng. DL-SCH – *Downlink Shared Channel*) – koristi se za prijenos podataka kao što su korisnički podaci i kontrolne poruke u silaznom smjeru; povezan je s logičkim kontrolnim i logičkim prometnim kanalima; nudi mogućnost adaptacije veze u vidu izmjena modulacije, kodiranja ili snage kojom se odašilje.
- Odašiljački kanal (eng. BCH – *Broadcast Channel*) – silazni kanal povezan s BCCH logičkim kanalom; koristi se za odašiljanje specifičnih informacija duž cijelog područja pokrivanja ćelije; format prijenosa je fiksna, a kapacitet je ograničen.
- Kanal za grupno odašiljanje (eng. MCH – *Multicast Channel*) – povezan s MCCH i MTCH logičkim kanalima za grupno odašiljanje; podržava MBSFN prijenos (eng. *Multicast/Broadcast Single Frequency Network*), koji prenosi istu informaciju na istom radijskom resursu iz više sinkroniziranih baznih stanica prema više mobilnih uređaja (UE-ova).
- Pozivni kanal (eng. PCH – *Paging Channel*) – povezan s PCCH logičkim kanalom; njime se prenose pozivne informacije prema mobilnim uređajima; kanal odašilje duž cijelog područja pokrivanja ćelije.

Uzlazni transportni kanali:

- Uzlazni dijeljeni kanal (eng. UL-SCH – *Uplink Shared Channel*) – uzlazni pandan DL-SCH kanalu; podržava dinamičku adaptaciju veze, dinamičku i djelomično trajnu raspodjelu resursa; nudi mogućnost upravljanja dijagramom zračenja.
- Kanal slučajnog pristupa (eng. RACH – *Random Access Channel*) – specifičan kanal uzlazne veze koji nije mapiran za logičke kanale; njime se prenosi relativno mala količina podataka za inicijalni pristup ili u slučaju RRC-a promjene stanja; koristi se za pristup mreži kada UE nema preciznu uzlaznu vremensku sinkronizaciju ili kada UE nema nikakav dodijeljeni resurs za prijenos u uzlaznoj vezi.



Slika 2.12. Mapiranje kanala u ulaznoj i silaznoj vezi [8]

Svaki fizički kanal odgovara skupu elemenata resursa u vremensko-frekvencijskoj mreži koja prenosi informacije iz viših slojeva. Entiteti koji tvore fizički kanal su elementi i blokovi resursa. Element resursa predstavlja jedan podnosioc preko jednog OFDM (eng. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) simbola te tipično može nositi jedan modulirani signal (ili dva koristeći prostorno multipleksiranje). Blok resursa predstavlja skup elemenata resursa, a u frekvencijskoj domeni to predstavlja najmanju kvantu resursa koja može biti dodijeljena [12].

Silazni fizički kanali:

- Silazni fizički kontrolni kanal (eng. PDCCH – *Physical Downlink Control Channel*) – prenosi informacije o transportnom formatu i alokaciji resursa vezanih uz DL-SCH i PCH kanale; obavještava UE o transportnom formatu, alokaciji resursa povezanih s UL-SCH kanalom
- Silazni fizički dijeljeni kanal (eng. PDSCH – *Physical Downlink Shared Channel*) – ovaj kanal prenosi korisničke podatke i višeslojnu signalizaciju; povezan je s DL-SCH i PCH kanalima
- Fizički kanal za odašiljanje (eng. PBCH – *Physical Broadcast Channel*) – odgovara BCH transportnom kanalu i prenosi informacije o sustavu
- Fizički kanal za grupno odašiljanje (eng. PMCH – *Physical Multicast Channel*) – prenosi multicast/broadcast informacije za MBMS uslugu
- Fizički Hybrid-ARQ indikator kanal (eng. PHICH – *Physical Hybrid Automatic Repeat Request Indicator Channel*) – ovim kanalom prenose se hibridne ARQ poruke (ACK, NACK) za uzlaznu transmisiju; UE-u se dodjeljuje vlastiti PHICH kanal
- Fizički kanal indikatora kontrolnog formata (eng. PCFICH – *Physical Control Format Indicator Channel*) – informira UE o broju OFDM simbola korištenih za PDCCH kanal

Uzlazni fizički kanali:

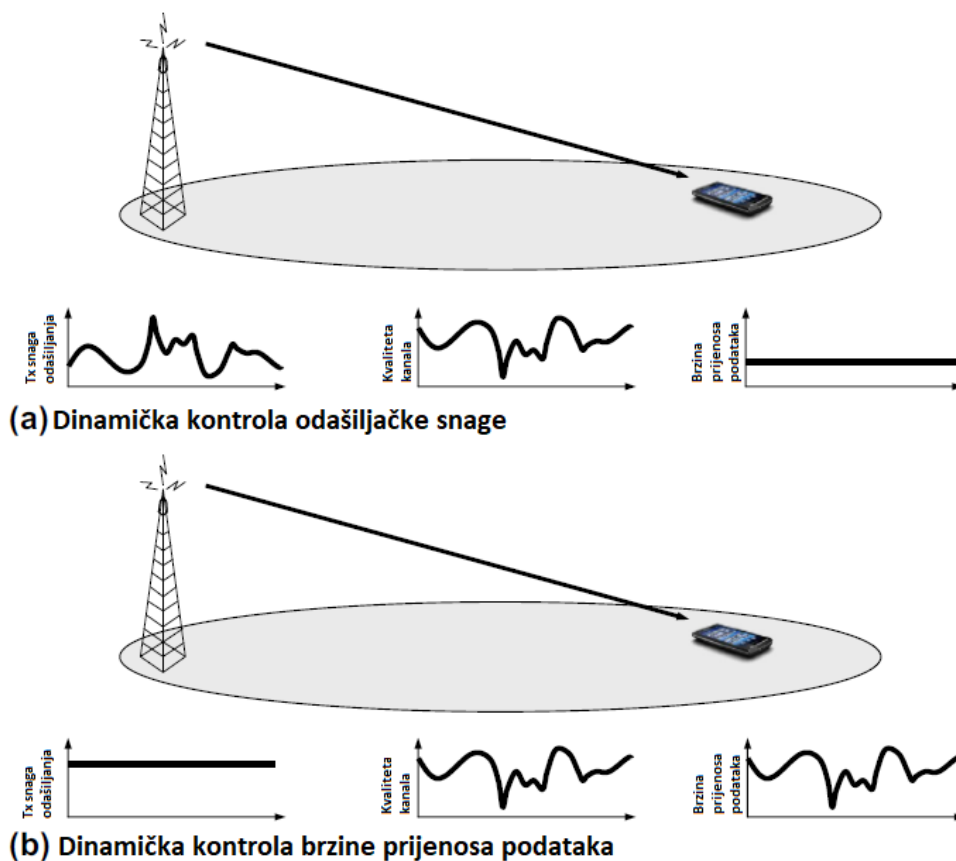
- Uzlazni fizički kontrolni kanal (eng. PUCCH – *Physical Uplink Control Channel*) – prenosi kontrolne informacije u uzlaznom smjeru što uključuje indikator kvalitete signala (eng. *Channel Quality Indicator*), ACK/NACK poruke za H-ARQ kao odgovor na silaznu transmisiju, zahtjevi za raspoređivanje u uzlaznoj vezi, izvješće o statusu kanala itd.
- Dijeljeni fizički kanal u uzlaznoj vezi (eng. PUSCH – *Physical Uplink Shared Channel*) – prenosi korisničke podatke i višeslojnu signalizaciju; komplementaran je UL-SCH transportnom kanalu
- Fizički kanal slučajnog pristupa (eng. PRACH – *Physical Random Access Channel*) – omogućuje blokovima resursa da procjene kašnjenje između blokova resursa i UE-a; ovaj kanal prenosi početnu odredbu slučajnog pristupa koju šalje UE

Osim fizičkih kanala, postoje signali koji su ugrađeni u silaznu i uzlaznu vezu na fizičkom sloju, ali ne prenose podatke i informacije iz viših slojeva:

- Referentni signal (eng. *Reference signal*) – definiran je u silaznoj i uzlaznoj vezi za procjenu kanala čime se omogućuje koherentna demodulacija; mjerenjem kvalitete kanala potpomaže se raspoređivanje;
- Sinkronizacijski signal (eng. *Synchronization signal*) – dijeli se na primarni i sekundarni sinkronizacijski signal; definiran je samo u silaznoj vezi; prenosi informacije o identitetu ćelije; koristi se za vremensko određivanje simbola i detekciju frekvencije silaznog signala.

2.3.2. Prilagodba veze

Dinamička kontrola odašiljačke snage (eng. *DTPC - dynamic transmit-power control*) je, povijesno gledano, korištena već u CDMA mobilnim komunikacijskim sustavima kao što su WCDMA i CDMA2000 u svrhu kompenziranja varijacija trenutnog stanja kanala. DTPC dinamički prilagođava odašiljačku snagu radioveze kako bi kompenzirao varijacije i razlike trenutnog stanja kanala. Cilj DTPC-a je održati gotovo pa konstantan odnos $\frac{E_b}{N_0}$ (omjer energije po bitu i gustoće spektralne snage šuma) na prijemnoj strani kako bi se podaci uspješno prenosili bez uvećanja vjerojatnosti pogreške. Ukratko, kao i što prikazuje slika 2.13., snaga odašiljanja će se povećati na odašiljaču ukoliko se pojave loši uvjeti prijenosa u radijskoj vezi. Može se zaključiti da je odašiljačka snaga obrnuto proporcionalna kvaliteti kanala. To dovodi do uobičajeno konstantnih brzina prijenosa podataka. Za neke usluge ovo je željeno svojstvo, no kada je riječ o mobilnim komunikacijama, pogotovo u slučaju paketnog prijenosa podataka, ne postoji potreba za pružanjem konstante brzine prijenosa podataka duž radio veze. Kada se stvar sagleda iz korisničke perspektive, brzina prijenosa podataka preko radijskog sučelja trebala bi biti što veća. Da se primijetiti da kod onih usluga koje zahtijevaju stalnu brzinu prijenosa, kao što su glas i video (kratkoročno), varijacije u brzini ne predstavljaju veliki problem, sve dok je prosječna brzina prijenosa podataka konstantna, pod pretpostavkom da će se usrednjiti u kratkom vremenskom intervalu. U slučaju da nije potrebna konstantna brzina prijenosa podataka koristi se dinamička kontrola brzine prijenosa podataka (eng. *dynamic rate control*) kako bi se radioveza prilagodila različitim uvjetima na kanalu. Kada su uvjeti na kanalu dobri, brzina se povećava i obrnuto.



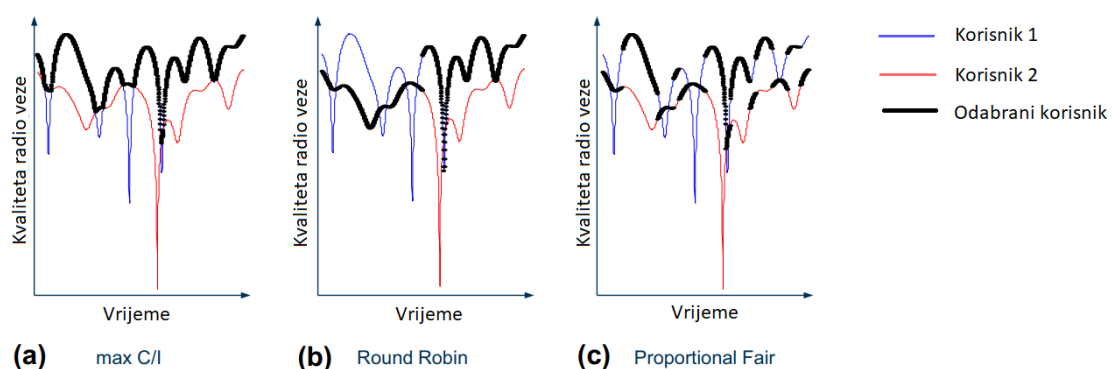
Slika 2.13. Dinamička kontrola snage i brzine [4]

2.3.3. Raspoređivanje resursa

Raspoređivanje resursa (eng. *scheduling*) u mobilnim komunikacijskim sustavima bavi se raspodjelom radijskih resursa dostupnih u sustavu između različitih korisnika (terminala) u svrhu što učinkovitijeg korištenja resursa. To obično podrazumijeva smanjenje količine resursa po korisniku, što u konačnici dovodi do maksimiziranja broja mogućih korisnika sustava, uz zadovoljavanje bilo kojih QoS zahtjeva. Nadalje, kontrolira se alokacija dijeljenih resursa između korisnika u svakom vremenskom trenutku. Vrste raspoređivanja resursa razlikuju se ovisno o karakteristikama radijskog sučelja: kada je veza silazna ili uzlazna, kada se ispituje jesu li prijenosi različitih korisnika međusobno ortogonalni ili ne. U nastavku će biti opisano raspoređivanje resursa u silaznoj vezi.

Raspoređivanje se vrši na osnovu jednog odsječka koji se sastoji od dva bloka resursa čije trajanje iznosi 1 ms. Širina bloka resursa iznosi 12 OFDM podnosioca koji definiraju rasporedni blok (eng. *scheduling block*). Kako svaki OFDM podnositelj prenosi 7 OFDM simbola, konačan broj elemenata u bloku resursa iznosi 84. Korisnicima se dodjeljuju rasporedni blokovi ovisno o

vrsti raspoređivanja resursa koja će biti primijenjena. Promatrajući silaznu vezu, transmisija prema različitim terminalima unutar ćelije najčešće je ortogonalna, pa se može zaključiti kako ne postoji interferencija između transmisija (niti unutar ćelijske interferencije). Unutar ćelijska ortogonalnost se ostvaruje u vremenskoj (eng. TDM – *Time Division Multiplexing*), frekvencijskoj (eng. FDM – *Frequency Division Multiplexing*) i kodnoj domeni (eng. CDM – *Code Division Multiplexing*). Često se TDM povezuje s dijeljenjem radijskih resursa bilo u kodnoj ili frekvencijskoj domeni. Kada je riječ o paketnom prijenosu podataka, gdje promet katkad zna biti raspršujući, preferira se TDM. Kod LTE-a, multipleksiranje u silaznoj vezi vrši se kombinacijom TDM-a i FDM-a, dok se kod HSPA koristi kombinacija TDM-a i CDM-a. Kada se prilikom raspoređivanja resursa u obzir uzmu samo trenutni uvjeti radio veze govorimo o raspoređivanju ovisno o kanalu (eng. *channel dependant scheduling*). Raspoređivanje korisnika s trenutno najboljim uvjetima radio veze naziva se *max-C/I* (eng. *maximum rate*) raspoređivanje. Pošto se uvjeti za različite radio veze unutar ćelije razlikuju, u svakom vremenskom trenutku gotovo uvijek postoji radio veza čija je kvaliteta kanala blizu maksimuma. Takav će se kanal iskoristiti za transmisiju jer je njegova kvaliteta visoka pa će se na njemu moći koristiti veća brzine prijenosa. Ovo neminovno dovodi do povećanja kapaciteta sustava. Dobitak koji se ostvaruje prijenosom na korisnike s povoljnijim uvjetima radioveze, znan je kao višekorisnički diverziteti. Povećanjem dobitaka višekorisničkog diverziteta povećava se i varijacija kanala i broj korisnika unutar ćelije. Nepoželjni efekt koji se pojavljuje ovim načinom raspoređivanja jest ubrzano slabljenje signala što će kao rezultat dati varijacije u kvaliteti radijske veze. Ako su svi terminali, u prosjeku, imaju slične uvjete na kanalima i imaju velike varijacije u trenutnim uvjetima kanala uslijed ubrzanog višestaznog fadinga, svi korisnici će imati istu prosječnu brzinu prijenosa podataka. Sve promjene trenutne brzine podataka su brze, korisnicima često i neprimjetne. Ako se pojavi terminal koji ima jako loše kanalne uvjete, postoji mogućnost da takav terminal nikada ne bude uključen u raspoređivanje.



Slika 2.14. Prikaz tri različite vrste raspoređivanja resursa za dva korisnika s različitim prosječnim kvalitetama kanala: a) max C/I, b) round-robin, c) proportional fair [4]

Na slici 2.14., u scenariju max C/I raspoređivanja prikazano je da će u raspoređivanju biti samo onaj korisnik koji ima bolju kvalitetu radio veze. Kapacitet sustava je u ovom scenariju najveći, no u praksi ne zadovoljava QoS uvjete. Sljedeći razmatrani scenarij raspoređivanja jest round-robin, slika 2.14. pod b). Ovom vrstom raspoređivanja korisnici dijele jednaku količinu resursa neovisno o kvaliteti radio veze. Ovim scenarijom se u obzir ne uzimaju trenutne promjene kanalnih uvjeta. Nadalje, ovaj scenarij ne zadovoljava QoS zahtjeve, spušta performanse sustava, ali ujednačava kvalitetu usluge za različite komunikacijske veze. Stoga, potrebna je strategija raspoređivanja koja će koristiti brze varijacije kanala kako bi poboljšala ukupnu propusnost ćelija, osiguravajući istovremeno prosječan protok za sve korisnike. Potrebna je strategija koja će u obzir uzimati brze varijacije kanalnih uvjeta, kao i određeni stupanj raspodjele prioriteta. Na slici 2.14. pod c) je prikazan takav način raspoređivanja. Ovom strategijom, zajednički resursi se dodjeljuju korisniku s relativno najboljim uvjetima za radio vezu, tj. u svakom vremenskom trenutku, korisnik k je odabran za transmisiju prema formuli:

$$k = \arg \max \frac{R_i}{\bar{R}_i} \quad (2-1)$$

gdje je:

- R_i – trenutna brzina prijenosa podataka za korisnika i
- \bar{R}_i – prosječna brzina prijenosa podataka za korisnika i .

Prosjeak se računa kroz period prosječnog trajanja vremena T_{PF} . Kako se želi osigurati efikasnost u kratkotrajnim kanalskim varijacijama i ograničiti dugotrajna razlika u kvaliteti usluge, vremenska konstanta T_{PF} treba biti veća od konstante kratkotrajnih varijacija. Pritom T_{PF} treba dovoljno kratak tako da se varijacije u kvaliteti tijekom intervala T_{PF} ne primijete.

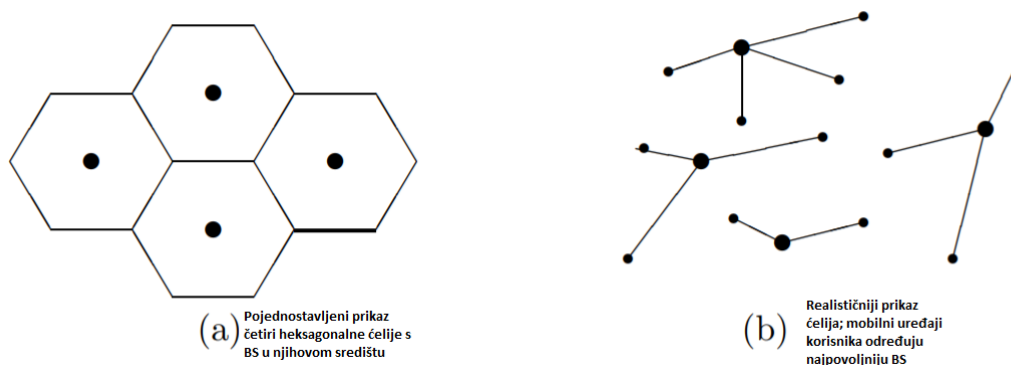
U prethodno opisanom slučaju, resursi u silaznoj vezi dodjeljivani su pojedinačnim korisnicima. Raspoređivanje resursa obavlja se u vremenskoj domeni koristeći TDM između korisnika. TDM tehnika komplementarna je tehnikama CDM i FDM, pa se stoga koriste njihove kombinacije.

3. ZRAČNO/RADIJSKO SUČELJE

3.1. Bežična digitalna komunikacija

Bežični sustavi rade na principu prijenosa informacija kroz prostor, a kod mobilnih mreža prijenos se vrši radiovalovima. Činjenica da nije potrebna žična povezanost nudi prednosti za korisnike ovakvih sustava. Neki od potencijalnih problema koji se javljaju prilikom bežične komunikacije su: varijacije komunikacijskog kanala kroz vrijeme i interferencija između korisnika.

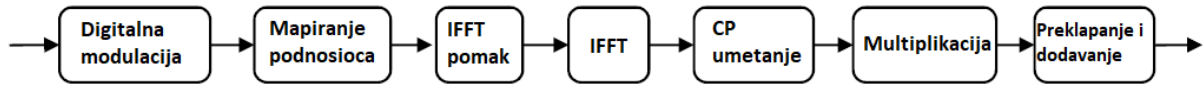
Mobilna mreža sastoji se od velikog broja bežičnih pretplatnika koji koriste mobilne uređaje diljem cijeloga svijeta. Također, postoji velik broj baznih stanica (eng. BS – *Base Station*) koje su pravilno raspoređene kako bi omogućile bežičnu radijsku komunikaciju s proizvoljno lociranim mobilnim uređajima. Područje koje pokriva BS naziva se ćelija (eng. *cell*). Ćelije se mogu aproksimirati heksagonima, u čijim se središtima nalaze BS kao što prikazuje slika 3.1. pod a). Uzme li se za primjer grad Osijek, može se zamisliti da je čitav grad prekriven heksagonalnim ćelijama koje omogućavaju mobilnu komunikaciju korisnicima. U stvarnosti, BS se ne mora nalaziti u središtu ćelija, već će njen položaj ovisiti o lokaciji (vrhovi zgrada, brda, brežuljaka i sl.) s koje mogu pružati dobru komunikacijsku pokrivenost, kao u slučaju na slici 3.1. pod b). Uzme li se za primjer poziv s jednog mobilnog uređaja, taj uređaj će se uz pomoć vlastite antene i elektromagnetskog zračenja povezati s BS koja mu nudi najbolji prividni komunikacijski put.



Slika 3.1. Prikaz ćelija i BS za mobilnu mrežu [13]

3.1.1. Slanje signala

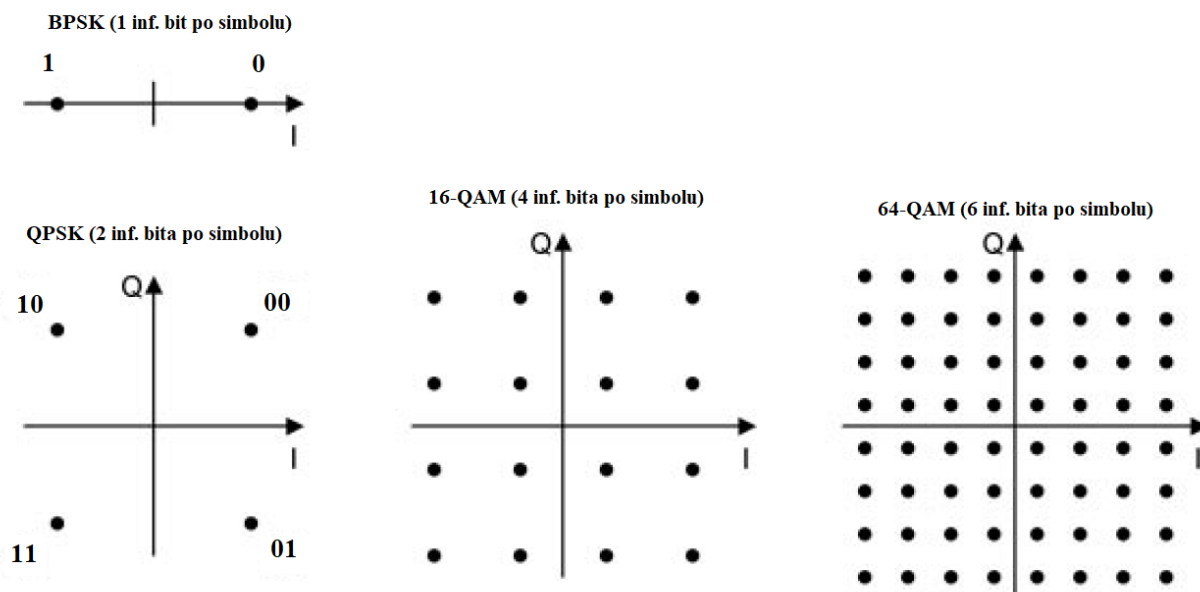
Prijemnik i predajnik sačinjavaju bežični komunikacijski LTE sustav kao što je prikazano na slici 3.2.



Slika 3.2. Arhitektura tijekom obrade podataka LTE OFDM modulatora za prijenos u silaznoj vezi [14]

Uloga modulatora je da modulira signal koji se prenosi (eng. *carrier*) tako što koristi jednu od četiri mogućih modulacijskih shema prilikom kojih dolazi do promjene parametara prijenosnog signala, kao što su amplituda i faza, ovisno o toku bita koji ulazi u modulator.

Binarna modulacija faze (eng. BPSK - *Binary Phase Shifting Key*) šalje po jedan informacijski bit za simbol, koristeći pritom dva stanja koja se mogu predstaviti fazama 0° i 180° s amplitudama ± 1 . Ova modulacijska shema se koristi za ograničen broj kontrolnih tokova, ne za uobičajene prijenose podataka. Kvadratura faza modulacija (eng. QPSK – *Quadrature Phase Shifting Keying*) omogućava slanje dva bita podatka odjednom. Iz niza podataka koje se šalju, podaci se dijele na dva dijela te se svaki od podnizova modulira BPSK modulacijom. 16 kvadratura modulacija faze (eng. 16-QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*) šalje po 4 informacijska bita po simbolu. Koristi 16 mogućih stanja za različite amplitude i faze. Kod 64 kvadrature modulacije faze (64-QAM) šalje se po 6 informacijskih bita koristeći 64 stanja koja imaju različite amplitude i faze. Na slici 3.3. prikazani su konstelacijski dijagrami modulacijskih shema koje se koriste u LTE.



Slika 3.3. Konstelacijski dijagrami modulatorskih shema BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM [2]

Nakon što modulator izvrši jednu od četiri moguće modulacije nad prijemnim signalom (QPSK, BPSK, 16-QAM, 64-QAM) ulazni podaci se preslikavaju (mapiraju) na IFFT podnosiocima (eng. *Inverse Fast Fourier Transformation*) te se umeće nulta istosmjerna (DC) komponenta. Ovaj postupak se naziva mapiranje podnosioca (eng. *subcarrier mapping*). Shodno tome IFFT pomakom preuređuje se ulazni niz IFFT-a kako bi se DC komponenta pomaknula na sredinu niza. Stvarna OFDM modulacija, koja će biti objašnjena kasnije u radu, izvedena je putem IFFT izračuna koristeći FFT jezgre i mijenjajući realne i imaginarnu dijelove ulaznih i izlaznih nizova podataka. U svrhu ublažavanja međusimolne interferencije (eng. *ISI – Inter-Symbol Interference*) između susjednih OFDM simbola, zbog efekata vremenske disperzije višekanalnih sustava, kraj simbola se kopira i dodaje na početak sljedećeg i to tvori operaciju dodavanja cikličkog prefiksa (eng. *Cyclic Prefix Insertion*). Vršiti se i dodatna obrada kako bi se poboljšale izvedbe u slučaju zračenja izvan frekvencijskog pojasa LTE kanala (eng. *Out of Band*). Dolazi do multipliciranja početka i kraja simbola te preklapanja i dodavanja kraja simbola na početak sljedećeg. U smislu aritmetičke složenosti i korištenja resursa, najzahtjevnija je IFFT operacija jer se ostale operacije poglavito sastoje od pohranjivanja i prosljeđivanja podataka uz malen broj aritmetičkih proračuna [14].

3.1.2. Prijem signala

Signal kojeg šalje odašiljač širi se prostorom sve dok ne stigne do prijemnika, pa tako njegova snaga opada. Prijemna snaga P_R manja je od snage odašiljača P_T jer signal doživljava gubitke propagacije ili gubitke puta (eng. *path loss*) koji se označavaju s oznakom PL i računaju se prema formuli:

$$PL = \frac{P_T}{P_R} \quad (3-2)$$

U slučaju da signal putuje kroz prazan prostor, kao elektromagnetski val, on će na udaljenosti r od odašiljača zauzeti površinu sfernog oblika u iznosu od $4\pi r^2$. Gubici propagacije su tako proporcionalni kvadratu udaljenosti. Kada je riječ o mobilnim mrežama, signal se često reflektira i apsorbira nailazeći na prepreke u vidu zgrada, kuća, tla, vode i sl. što u konačnici utječe na propagacijske gubitke. Eksperimentalnim putem došlo se do zaključka da je propagacijski gubitak u mobilnim mrežama približno proporcionalan r^m gdje je vrijednost m broj iz intervala [3.5 – 4]. Signal koji se zaprima na prijemniku remete termički šum i interferencija zbog drugih odašiljača. Ovi efekti narušavaju preciznu procjenu odaslane amplitude i faze. Prijemnik ovome doskače tako što izdvaja amplitudu i fazu dolaznog signala u oblik kontinuirano promjenjivih realnih brojeva na temelju kojih demodulator obrađuje zaprimljene bitove. U slučaju da su šum i interferencija dovoljno veliki, vrijednost bita '1' može biti detektirana kao '0' te se na taj način unose pogreške na strani prijemnika. Stopa pogreške će ovisiti o odnosu snage signala i snage interferencije i šuma (eng. SINR – *Signal to Interference Noise Ratio*) koji se mjeri na prijemniku. Primjerice, LTE koristi 64-QAM modulacijsku tehniku u slučaju visokog SINR-a. Shodno tomu, QPSK modulacijska tehnika nudi manju stopu rizika od pogrešaka i sigurnija je za korištenje kod manjih vrijednosti SINR-a. LTE koristi dinamičko prebacivanje između modulacijskih tehnika pri padu vrijednosti SINR kako bi smanjio broj pogrešaka [2].

3.1.3. Tehnike višestrukog pristupa

Ove tehnike omogućavaju da veliki broj korisnika mobilnih uređaja dijeli dodijeljeni spektar na najučinkovitiji način. Spektar je ograničen, pa je tako dijeljenje nužno kako bi se povećao kapacitet ćelije. U svrhu povećanja kapaciteta kroz određeno geografsko područje omogućeno je dijeljenje dostupne pojasne širine za različite korisnike. Sve akcije ne smiju narušiti QoS zahtjeve postojećih korisnika. Kod bežične komunikacije često je poželjno omogućiti korisnicima simultano slanje podataka prema BS i istovremeno zaprimanje podataka od BS [15].

Iz razloga što BS odašilje podatke na veliki broj različitih uređaja dolazi do podjele resursa na zračnom sučelju koja se naziva tehnika višestrukog pristupa. Mobilni komunikacijski sustavi koriste nekoliko različitih tehnika. Kod višestrukog pristupa s podjelom frekvencije (eng. FDMA – *Frequency Division Multiple Access*), korištenog u analognim 1G sustavima, svakom mobilnom uređaju dodjeljuje se frekvencija signala nosioca što ga razlikuje od drugih uređaja primjenom analognih filtera. Nosioci su odvojenim nekorištenim frekvencijskim zaštitnim pojasom kako bi se spriječila njihova međusobna interferencija. Korištenjem višestrukog pristupa s vremenskom podjelom (eng. TDMA – *Time Division Multiple Access*) mobilni uređaji će zaprimati podatke na istoj frekvenciji signala nosioca ali u različitim vremenima. Primjer korištenja FDMA i TDMA tehnike je GSM, gdje svaka ćelija ima nekoliko frekvencija nosioca koje dijeli osam različitih korisnika. Sustavi treće generacije koriste tehniku višestrukog pristupa s podjelom koda (eng. CDMA – *Code Division Multiple Access*) kod koje mobilni uređaji u isto vrijeme zaprimaju podatke na istoj frekvenciji nosioca, ali su u neku ruku označeni uporabom ortogonalnih kodova što omogućava mobilnom uređaju da razdvoji svoj signal od signala drugih korisnika. LTE koristi neke od koncepata CDMA tehnike za neke od svojih kontrolnih signala.

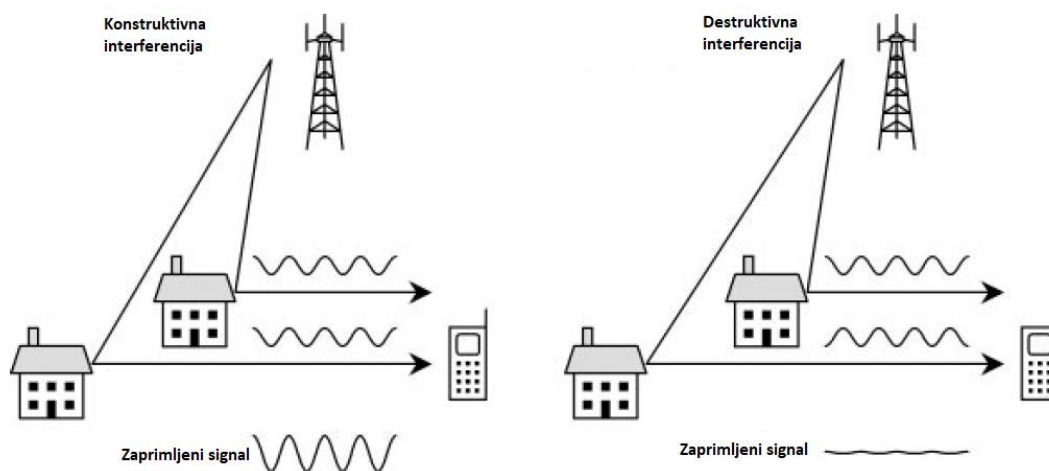
Nameće se pitanje kako razlikovati prijenose mobilnih uređaja od prijenosa same BS. Mobilni komunikacijski sustavi prenose informacije u TDD (eng. *Time Division Duplex*) i FDD (eng. *Frequency Division Duplex*) načinu rada. Korištenjem FDD-a bazna stanica i njezini mobilni uređaji prenose podatke istovremeno različitim frekvencijama za silaznu i uzlaznu vezu. Primjenom TDD-a mobilni uređaji i BS će slati i primati podatke na istim frekvencijama, ali u različitim vremenima. Ove dvije tehnike imaju svoje nedostatke. Primjerice, FDD način rada pruža simultan prijenos i prijem, iako nije uvijek spektralno efikasan jer promet koji prenosi može biti asimetričan. Također, FDD način rada zahtijeva hardversku kompleksnost u primopredajnicima i tako utječe na troškove (duplexer za odvajanje primljenog i poslanog signala). TDD način rada zna imati problema s interferencijom ukoliko primjerice jedna BS odašilje dok njoj bliska BS zaprima podatke. Da se ovo izbjegne potrebno je ostvariti dobru vremensku sinkroniziranost i korištenje iste frekvencijske alokacije za silaznu i uzlaznu vezu. Ovo čini TDD pogodnom za mreže izoliranih žarišnih točki (eng. *hotspot*), dok je FDD pogodniji za širokopojasne mreže.

3.1.4. Smetnje i upravljanje pogreškama

3.1.4.1. Višestazno prostiranje i fading

Gubici propagacije i šum nisu jedini problemi koji se javljaju kod bežičnih komunikacijskih sustava. Odaslani se signal, na svom putu do prijemnika, susreće s još nekoliko

problema. Zrake koje se reflektiraju od razne objekte na svom putu od odašiljača prema prijemniku na prijemnu stranu dolaze kroz više puteva, tj. kasne za originalnim signalom. Ova pojava se naziva višestazno prostiranje (eng. *multipath*) i ona uzrokuje povećanje kašnjenja i ISI koja proširuje simbol u prijemu čime ometa druge simbole. Na prijemnoj strani se nadolazeće zrake superponiraju na razne načine. Ukoliko se amplitude dolaznih zraka podudaraju, signali se međusobno pojačavaju, a tu pojavu nazivamo konstruktivna interferencija (eng. *constructive interference*). Ako se faze dolazećih signala ne podudaraju, dolazi do destruktivne interferencije (eng. *destructive interference*) kod koje se zrake međusobno poništavaju (slika 3.4. – destruktivna interferencija).



Slika 3.4. Pojednostavljeni prikaz konstruktivne i destruktivne interferencije [2]

Destruktivna interferencija može značajno prigušiti snagu zaprimljenog signala, a ta pojava se naziva fading (eng. *fading*) koja za posljedicu ima povećanje stope pogreške u mobilnim komunikacijskim sustavima. Uslijed kretanja korisnika, odnosno kretanja mobilnog uređaja, geometrija izračenih zraka se mijenja, pa se pritom izmjenjuju konstruktivna i destruktivna interferencija. Budući da je fading funkcija vremena, amplituda i faza zaprimljenog vala variraju kroz vremenski period koji se naziva period koherencije T_C koji se procjenjuje prema [2]:

$$T_C \approx \frac{1}{f_D} \quad (3-2)$$

U gore spomenutom izrazu f_D predstavlja Dopplerovu frekvenciju koja se računa prema izrazu [2]:

$$f_D = \frac{v}{c} f_C \quad (3-3)$$

u kojem je f_c frekvencija nosioca, v brzina kretanja mobilnog uređaja, a c je brzina svjetlosti ($3 \cdot 10^8$ m/s).

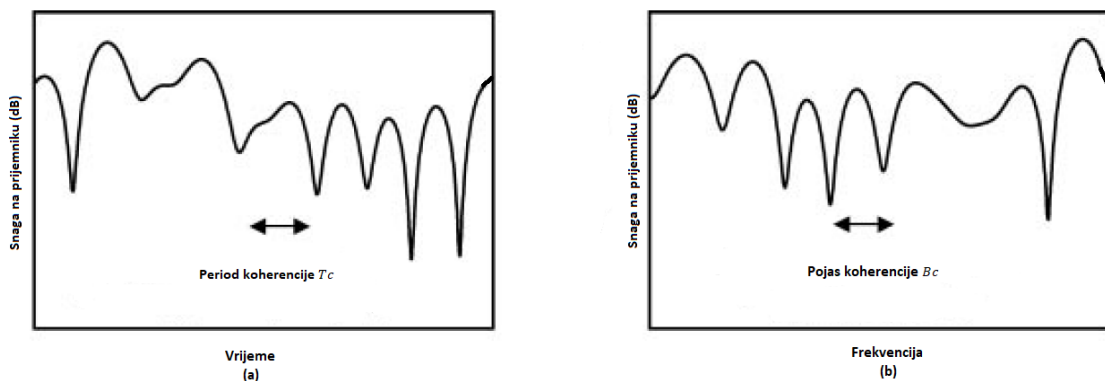
Prilikom promjene frekvencije nosioca mijenja se i valna duljina signala što utječe na uzorak interferencije, pa se može zaključiti da je fading također i frekventijska funkcija (Sl. 3.5.). Amplituda i faza zaprimljenog vala variraju ovisno o frekvenciji, pri čemu je ta varijacija mala unutar frekventijskog pojasa koji se naziva pojas koherencije (eng. *coherency band*) B_c i procjenjuje se prema [2]:

$$B_c \approx \frac{1}{\tau} \quad (3-4)$$

Ovdje τ predstavlja maksimalno kašnjenje zbog višestaznog prostiranja, tj. razliku u vremenu dolaska zaprimljenih zraka. Računa se prema izrazu [2]:

$$\tau = \frac{\Delta L}{c} \quad (3-5)$$

gdje je ΔL razlika između prijednog puta najduljih i najkraćih zraka.



Slika 3.5. Fading kao funkcija vremena (a) i frekvencije (b) [2]

3.1.4.2. FEC

Tehnika ispravljanja pogrešaka unaprijed (eng. FEC – *Forward Error Correction*) jedna je od najvažnijih tehnika za ispravljanje pogrešaka prilikom prijenosa podataka. Originalna informacija, koja se prenosi, proširuje se dodavanjem bitova i predstavljena je kodnom riječi. Dodani bitovi predstavljaju redundantne podatke uz pomoć kojih prijemnik dolazi do originalne informacije. Kodna brzina (eng. *coding rate*) predstavlja omjer broja informacijskih bitova i prenesenih bitova. FEC algoritmi najčešće rade s fiksnom kodnom brzinom. Najznačajniji algoritam, kojeg koristi LTE, naziva se turbo kodiranje (eng. *turbo coding*). Promjene kodne brzine imaju sličan utjecaj promjenama u modulacijskoj shemi. Ukoliko je kodna brzina niska,

preneseni podaci sadrže veliki broj redundantnih bitova što omogućava prijemniku ispravak velikog broja pogrešaka i rad pri niskom SINR-u iako će opasti brzina prijenosa podataka. Kako se kodna brzina bliži svom maksimumu (1), brzina prijenosa podataka je veća, ali sustav postaje osjetljiviji na pogreške [2].

3.1.4.3. ARQ

Zahtjev za automatsko ponavljanje (eng. ARQ – *Automatic Repeat Request*) pripada tehnikama ispravljanja pogrešaka. Odašiljač uzima blok informacijskih bitova i iskorištava ih za računanje dodatnih bitova koji se nazivaju CRC. Odašiljač potom dodaje te bitove u informacijski blok i šalje ta dva skupa podataka. Prijemnik razdvaja skupove i koristi informacijske bitove za računanje očekivanih CRC bitova. Ukoliko se očekivani CRC bitovi podudaraju s izračunatim CRC bitovima zaključuje se da je informacija uspješno prenesena i šalje se ACK poruka odašiljaču. Shodno tome, ukoliko postoji razlika između očekivanih i primljenih CRC bitova zaključuje se da je došlo do pogreške u prijenosu i odašiljač zaprima NACK poruku i traži retransmisiju. Bežični komunikacijski sustavi kombiniraju FEC i ARQ tehnike u svrhu uklanjanja pogrešaka [2].

3.1.4.4. Hybrid ARQ

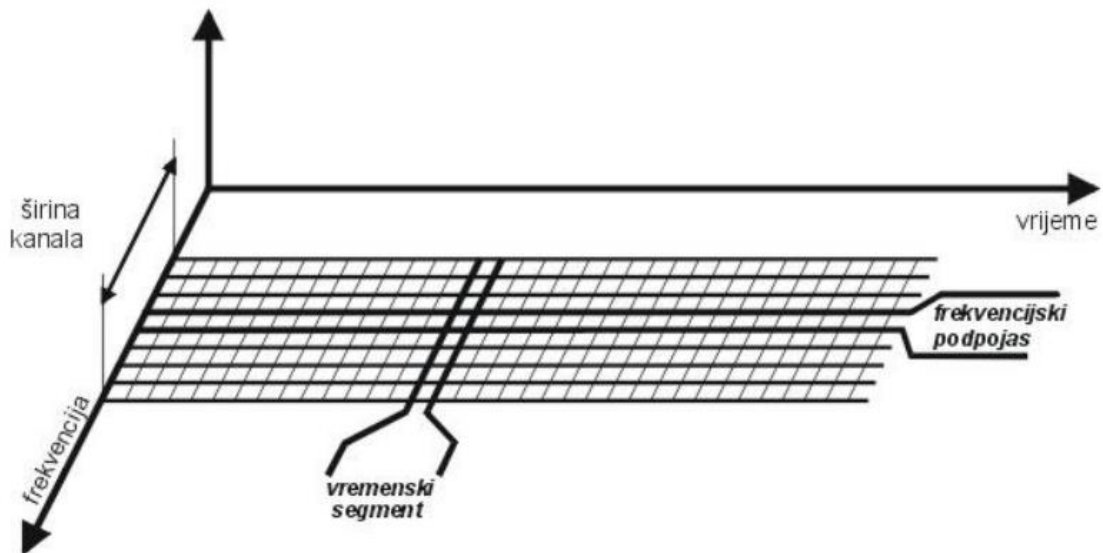
U slučaju kada, primjenom ARQ tehnike, blok podataka ne zadovolji CRC provjeru prijemnik ga odbacuje, iako je u njemu još sadržan koristan dio informacije. Kao rješenje za gubitak korisnog dijela informacije pojavila se tehnika zvana hibridni ARQ (eng. *Hybrid ARQ*). Prilikom rada ove tehnike odašiljač šalje podatke kao i prije, ali u ovom slučaju prijemnik prosljeđuje meke odluke na sljedeću razinu. Dekoder tvrde odluke koristi podatke koji poprimaju fiksni skup mogućih vrijednosti, 0 ili 1 u binarnom kodu, dok podaci mekog dekodera poprimaju niz vrijednosti između, pa je stoga meki dekodek bolji izbor u prisutnosti oštećenih podataka, pa tako i u ovom slučaju. Prijemnik inicijalno ne uključuje meke odluke kako bi se u obzir uzeli svi bitovi koje odašiljač ukloni, a nakon toga sprema rezultirajuću kodnu riječ u međuspremnik. Kodna riječ tada prolazi faze ispravljanja i otkrivanja pogrešaka nakon kojih šalje potvrdu natrag na odašiljač. U slučaju da CRC provjera bude neuspješna vrši se retransmisija nakon koje prijemnik koristi podatke iz prve transmisije i retransmisije kako bi nad njima vršio meke odluke, za razliku od ARQ tehnike gdje se podaci iz prve transmisije odbacuju. Time se povećava mogućnost uspješne CRC provjere [2].

3.2. OFDM

Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosioca (eng. OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) je tehnika višestrukog prijenosa koja omogućava slanje signala, u vidu slijeda podataka, na više podnosioca. Zasniva se na velikom broju ortogonalnih podnosioca od kojih svaki radi na vlastitoj frekvenciji. OFDM je inicijalno zamišljen kao rješenje za međusimbolnu interferenciju i frekvencijski selektivan fading. Međutim, OFDM se također može koristiti i kao shema višestrukog pristupa, gdje se podnosioci dijele korisnicima [16].

OFDM dijeli dostupnu pojasnu širinu u niz međusobno ortogonalnih podnosioca (nema međusobne interferencije između njih) od kojih svaki može prenositi nezavisan niz informacija. Podnosioci su međusobno ortogonalni u frekvencijskoj domeni što ublažava međusimbolnu interferenciju. Potkanalima se, velikom brzinom, digitalna informacija prenosi u obliku moduliranih podnosioca. Cilj je razdijeliti serijski slijed podataka na više manjih paralelnih slijedova koji se potom zasebno moduliraju. Brzina prijenosa podataka u svakom od potkanala je mala i ne zauzima veliki dio spektra.

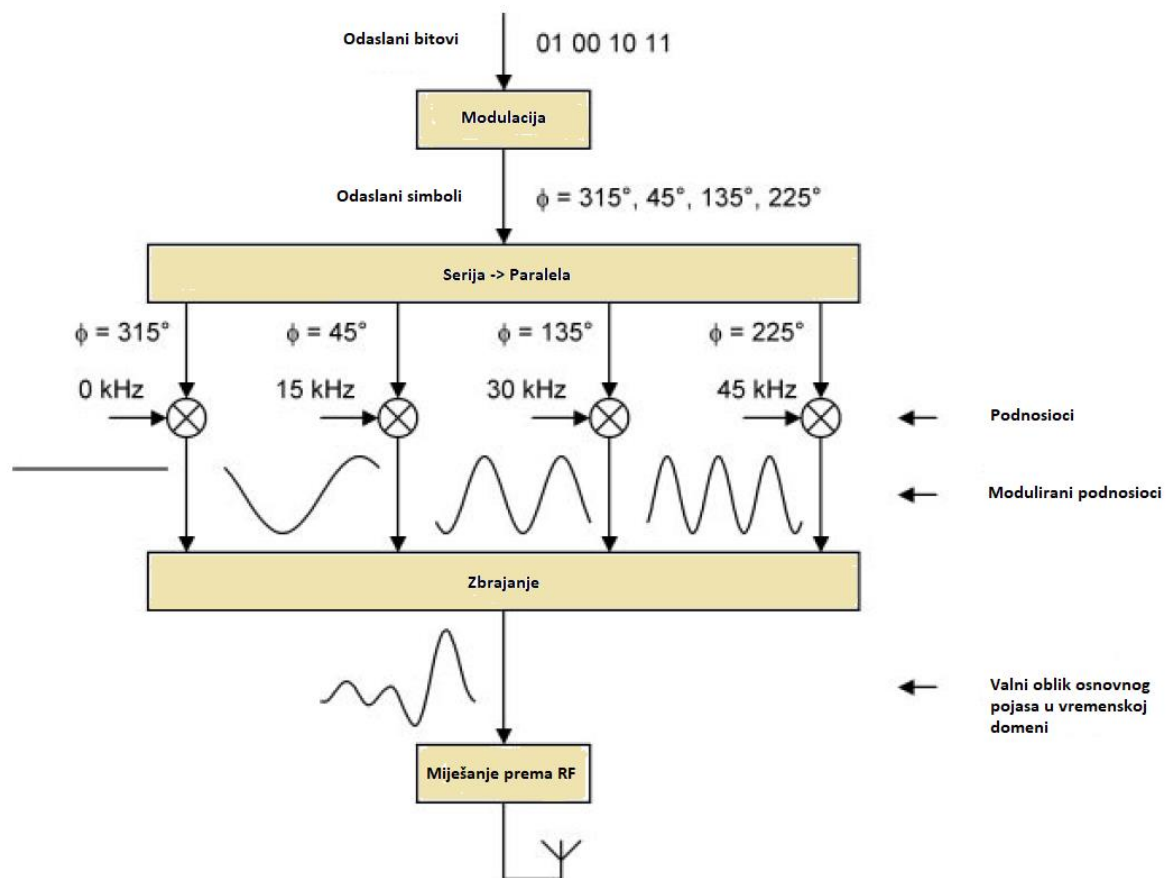
Fizički kanal OFDM-a sačinjava skup frekvencijskih potpojaseva i vremenskih segmenata kao što je prikazano na slici 3.6.



Slika 3.6. Grafički prikaz OFDM kanala u frekvencijskoj i vremenskoj domeni [17]

OFDM sustavi se mogu sastojati od stotina podnosioca s razmakom od 15kHz između njih. Budući da se više podnosioca u OFDM-u prenosi paralelno, moguće je da se svaki prenosi nižom stopom brzine simbola pa je tako trajanje simbola duže što za posljedicu ima smanjenje

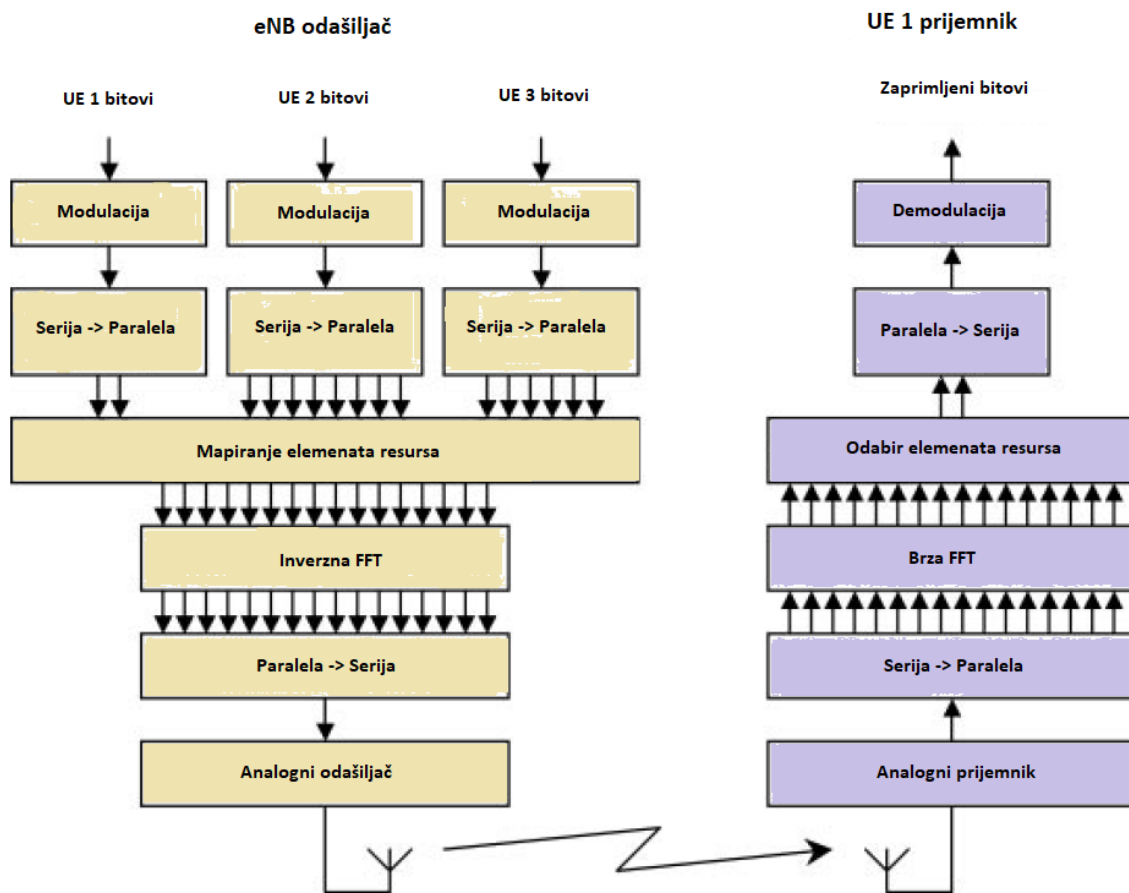
međusimbolne interferencije. To poboljšava robustnost tehnologije za uvjete mobilne propagacije [16].



Slika 3.7. Koraci u obradi pojednostavljenog analognog OFDM odašiljača [2]

Slikom 3.7. predstavljen je pojednostavljeni blok dijagram analognog OFDM odašiljača u svrhu lakšeg shvaćanja osnovnih principa ove tehnike. Odašiljač zaprima niz bitova s više protokolne razine i pretvara ih u simbole koristeći jednu od modulacijskih shema. Serijsko – paralelni pretvarač potom uzima blok simbola i miješa svaki simbol s jednim od signala podnosioca tako što utječe na amplitudu i fazu. Kako LTE koristi fiksni razmak podnosioca od 15 kHz, podnosioci imaju frekvencije 0, 15, 30 i 45 kHz. Trajanje jednog simbola recipročno je razmaku podnosioca, pa stoga iznosi $66.7 \mu\text{s}$ (mikrosekunda). Podnosioc frekvencije 15 kHz prolazi kroz jedan ciklus tijekom trajanja simbola od $66.7 \mu\text{s}$, dok će podnosioci na 30 i 45 kHz proći kroz dva, odnosno tri ciklusa. To će rezultirati s ukupno 4 sinusna vala, na frekvencijama od 0, 15, 30 i 45 kHz čije su amplitude i faze predstavljene s osam poslanih bitova. Zbrojem sinusnih valova generiramo valni oblik u vremenskoj domeni, što je niskofrekventni prikaz signala koji se mora poslati. Preostalo je miješanje valnog oblika do radio frekvencija za prijenos.

Za potrebe serijsko-paralelne konverzije koristi se inverzna diskretna Fourierova transformacija (eng. IDFT – *Inverse Discrete Fourier Transform*). Fourierova transformacija prebacuje podatke iz vremenske domene u frekvencijsku domenu, pa tako odašiljač zahtjeva inverzno prebacivanje koje provodi obrnuti postupak. Korištenjem ove tehnike mogu se zaobići komplicirani koraci koji opisuju miješanje signala, tako što se simbol proslijedi na IFT koja rezultira signalom u vremenskoj domeni. Diskretna Fourierova transformacija može se poprilično brzo implementirati korištenjem brze Fourierove transformacije (eng. FFT – *Fast Fourier Transform*). Za učinkovit rad FFT-a, broj podatkovnih točaka mora biti izričito potencija broja dva.



Slika 3.8. Blok dijagram OFDM odašiljača i prijemnika [2]

Ako se pretpostavi da sustav radi u silaznoj vezi, tada je odašiljač BS, a prijemnik mobilni uređaj. Na slici 3.8. BS šalje nizove bita na tri različita mobilna uređaja. Svaki niz se zasebno modulira bilo kojom od mogućih modulacijskih shema (QPSK, BPSK, 16-QAM, 64-QAM). Zatim

se prosljeđuje svaki tok simbola kroz serijsko-paralelni pretvornik kako bi ih razdvojio u pod-tokove. Broj pod-tokova po mobilnom uređaju ovisit će o brzini prijenosa podataka. Primjerice, glasovne aplikacije koriste nekoliko pod-tokova dok za razliku od njih video aplikacije koriste njihov veći broj. Mapiranjem elemenata resursa uzimaju se pojedini pod-tokovi i odabiru podnosioci na kojima će se oni odašiljati. Podnosioci mobilnog uređaja se mogu nalaziti u susjednom bloku (kao u slučaju UE 1 i UE 3) ili mogu biti podijeljeni (UE 2). Dobivena informacija predstavlja amplitudu i fazu svakog podnosioca kao funkciju frekvencije. Prolaskom kroz fazu inverzne FFT mogu se izračunati fazna i kvadraturna komponenta odgovarajućeg valnog oblika u vremenskoj domeni. Nakon toga slijedi A/D pretvorba, filtriranje i miješanje na odašiljačku radio frekvenciju.

Mobilni uređaj obrće gore opisani postupak. Prvo se vrši uzorkovanje nadolazećeg signala, njegovo filtriranje i zatim pretvaranje u osnovni frekvencijski pojas. Podaci potom prolaze kroz fazu FFT-a (eng. *Forward FFT*) kako bi se povratile amplitude i faze svih podnosioca. Pod pretpostavkom da je BS obavijestila mobilni uređaj koje podnosioce treba koristiti, uz pomoć tehnika raspoređivanja resursa, mobilni uređaj odabire tražene podnosioce i dekodira prenesenu informaciju dok pritom odbacuje ostatak.

3.3. OFDMA

LTE koristi tehniku višestrukog pristupa s ortogonalnom raspodjelom podnosioca (eng. OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) za silaznu vezu. Ona je tip FDM-a u kojem se dostupni frekvencijski pojas dijeli na određeni broj ortogonalnih podnosioca. Podaci se prvo prebacuju u paralelne nizove bita koji se potom moduliraju na svakom podnosiocu koristeći dostupne modulacijske sheme. OFDMA omogućuje istodobno posluživanje više korisnika s različitom propusnošću te sadrži kraće i konstantnije kašnjenje. Pruža fleksibilnost jer se sitnim modifikacijama zračnog sučelja može koristiti za razne frekvencijske pojaseve. Efekt višestaznog fedinga smanjuje se primjenom OFDMA jer se podaci svakog korisnika moduliraju na više ortogonalnih frekvencija, koje se mijenjaju ovisno o kvaliteti kanala, umjesto da se koristi fiksna frekvencija za čitav period konekcije. Nadalje, ova tehnika ne samo da olakšava dijeljenje kapaciteta u dostupnoj pojasnoj širini, već povećava kapacitet za svakog korisnika korištenjem nekoliko frekvencija.

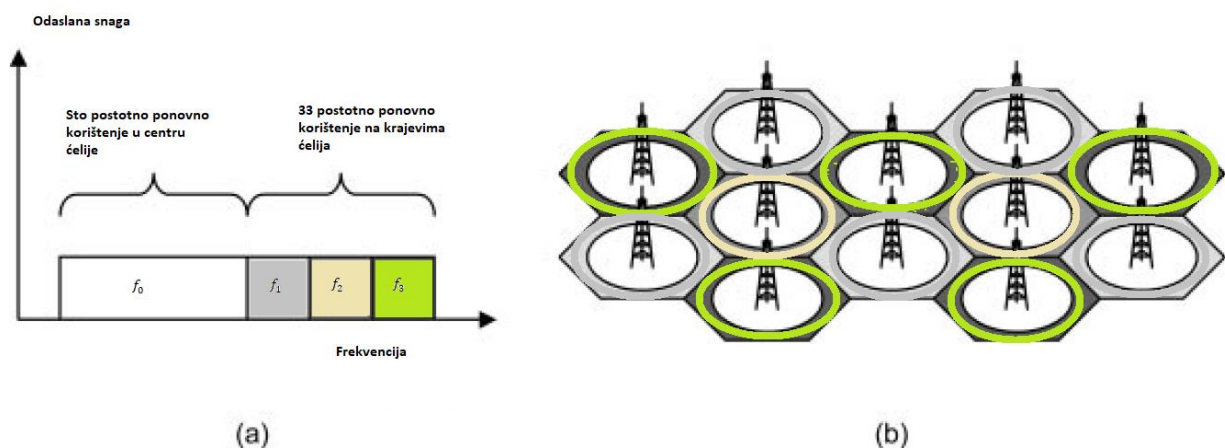
Glavna razlika između OFDM i OFDMA sustava jest da se kod OFDM-a korisnici alociraju na samo vremensku domenu dok je kod korištenja OFDMA korisnik alociran po vremenu i frekvenciji. To je korisno za LTE jer omogućava iskorištavanje frekvencijski ovisnog

raspoređivanja resursa. Na primjer, moguće je iskoristiti činjenicu da korisnik može imati bolju kvalitetu radio veze na nekom specifičnom dijelu pojasa dostupne pojasne širine.

U sljedećih nekoliko potpoglavlja detaljnije će biti opisan rad OFDMA tehnike.

3.3.1. Ponovno korištenje frekvencija

Jedna BS može slati informacije velikom broju mobilnih uređaja. Ipak, mobilni komunikacijski sustavi građeni su od velikog broja BS, pa tako svaki mobilni uređaj mora primiti signal od jedne BS pod utjecajem interferencije drugih BS. Svaka BS u LTE mreži može odašiljati u istom frekvencijskom pojasu. Međutim, ona također može alocirati podnosiocima unutar frekvencijskog pojasa na poprilično fleksibilan način korištenjem frakcionalnog ponovnog korištenja frekvencija (eng. *fractional frequency re-use*). Svaka pojedina BS upravlja jednom ćelijom i svaka pojedina ćelija dijeli isti frekvencijski pojas, f_0 unutar kojeg svaka ćelija odašilje signale bliskim mobilnim uređajima koristeći iste skupove podnosioca. Uređaji koji su blizu svojih BS zaprimaju zadovoljavajuće jak signal dovoljno otporan na svaku vrstu interferencije, no oni uređaji koji su udaljeniji od BS zaprimaju slabije signale koji su osjetljivi na interferenciju. Ovaj problem se rješava na način da susjedne ćelije mogu odašiljati na one uređaje koji koriste različite skupove podnosioca.



Slika 3.9. Frakcionalno ponovno korištenje frekvencija kod OFDMA: a) korištenje frekvencijske domene, b) rezultirajući mrežni plan [2]

Iz dijela slike 3.9. (pod (a)) jasno se vidi da je pola frekvencijskog pojasa rezervirano za uređaje u neposrednoj blizini, dok je ostatak pojasa podijeljen u tri skupa - f_1 , f_2 i f_3 kojima se koriste udaljeni uređaji. Rezultirajući faktor ponovnog korištenja iznosi 67%. Postoje i fleksibilnije implementacije ponovnog korištenja frekvencija. Primjerice, jedna ćelija može

koristiti skup podnosioca za udaljene uređaje dok susjedna BS koristi isti skup podnosioca za uređaje u blizini. Bazne stanice će tada izmijeniti signalizacijske poruke kroz X2 sučelje preko kojih će jasno iskomunicirati kako koriste frekvencijski pojas.

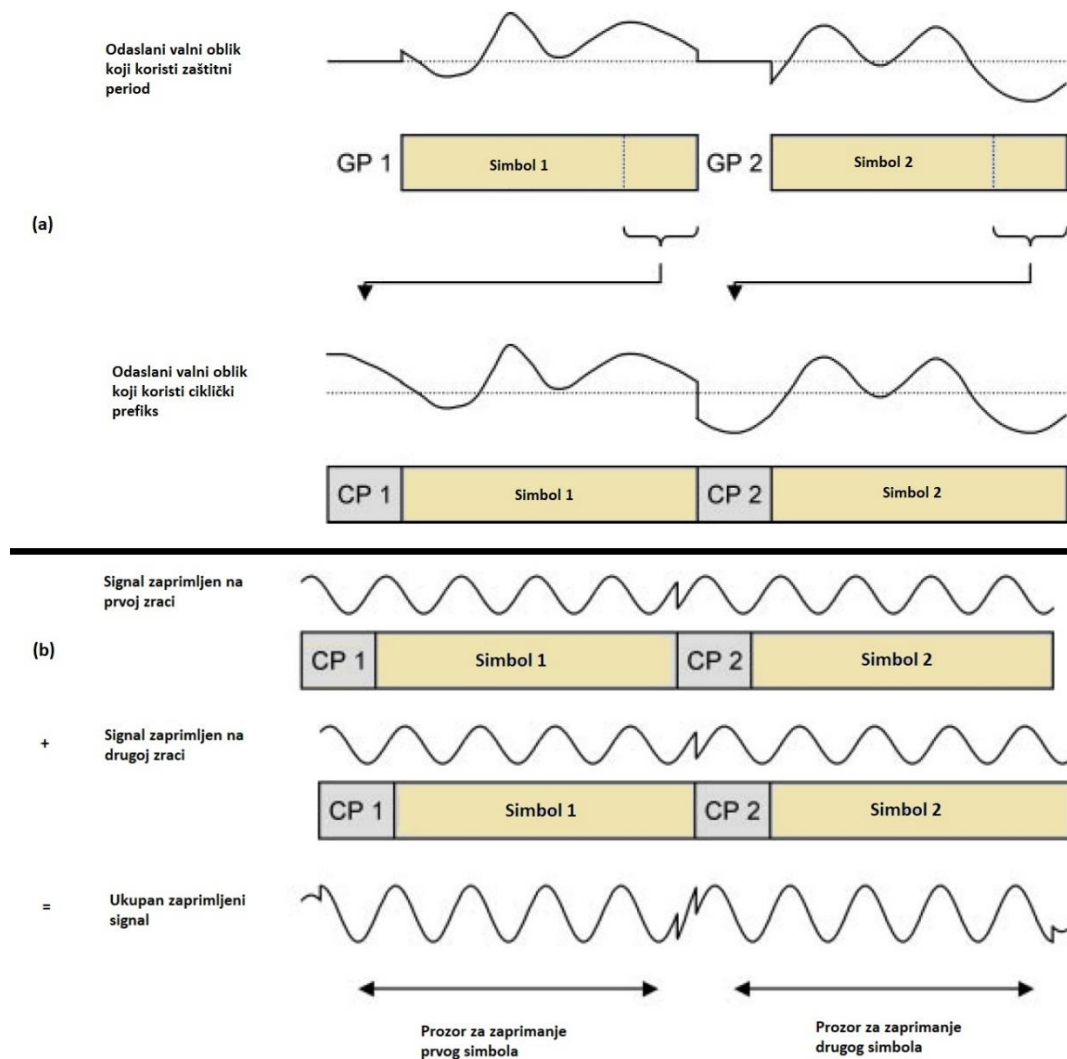
3.3.2. Estimacija kanala

Do prijemnika mogu stići svi podnosioci s posve proizvoljnom amplitudom i fazom. Kako bi se ovo spriječilo, OFDMA odašiljač umeće referentne simbole unutar odaslanog toka podataka. Prijemnik mjeri nadolazeće referentne simbole uspoređujući ih s onima koji su odaslani i koristi rezultat usporedbe kako bi uklonio amplitudne promjene i pomake u fazi nadolazećeg signala. U prisutnosti frekvencijskog fedinga amplituda signala i fazni pomaci su funkcije frekvencije jednako kao i vremena i utječu na različite podnosioce na razne načine. Kako bi prijemnik mogao provjeriti sve informacije koje su mu potrebne LTE referentni simboli, koji zauzimaju približno deset posto prenesenog toka podataka, raspoređuju se duž vremenske i frekvencijske domene i pritom ne uzrokuju značajne troškove.

3.3.3. Umetanje cikličkog prefiksa

Ranije u radu je spomenuto kako OFDMA umanjuje količinu međusimbolne interferencije odašiljanjem podataka preko više podnosioca. No, osmišljena je tehnika koja u potpunosti umanjuje ISI. Umeće se zaštitni period (eng. GP – *Guard Period*) prije svakog OFDM simbola tijekom kojega se ništa ne prenosi. Ako je zaštitni period duži od raspršenja kašnjenja, prijemnik može dekodirati informaciju simbol po simbol, što će spriječiti preplitanje simbola koji prethode ili slijede.

LTE koristi nešto složeniju tehniku znanu kao umetanje cikličkog prefiksa (eng. CPI – *Cyclic Prefix Insertion*) kod kojeg odašiljač umeće GP prije svakog simbola, pa potom kopira podatke s kraja sljedećeg simbola kako bi popunio GP. Dokle god je ciklički prefiks duži od raspršenja kašnjenja prijemnik može biti siguran da čita informaciju simbol po simbol.



Slika 3.10. a) Operacija umetanja cikličkog prefiksa, b) Operacija cikličkog prefiksa na jednom podnosiocu [2]

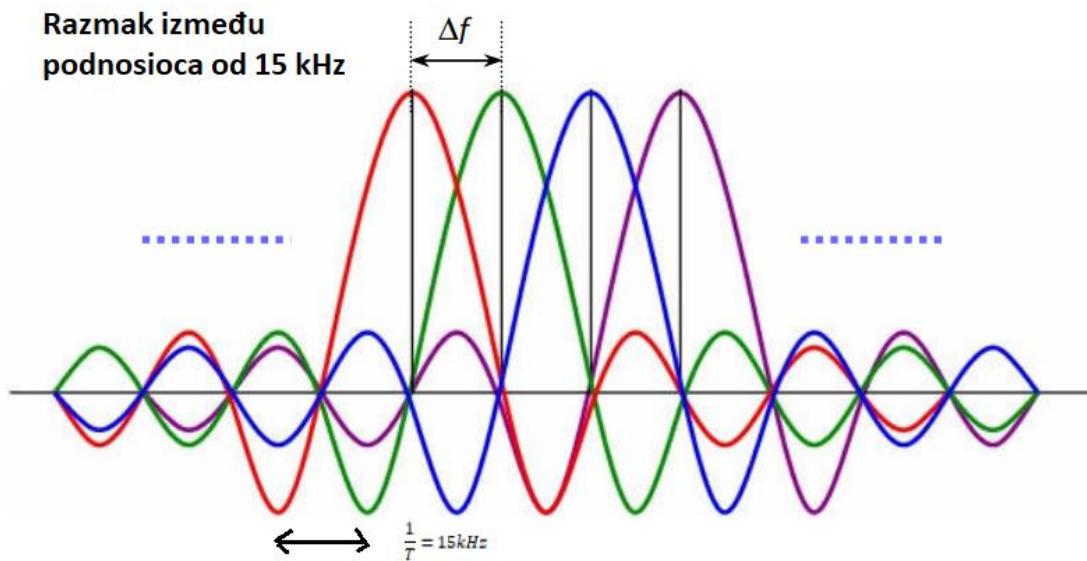
Preneseni signal je u obliku sinusnog vala čije se amplitude i faze mijenjaju od simbola do simbola (slika 3.10.). Svaki OFDM simbol sadrži točan broj ciklusa sinusnog vala tako da su amplitude i faza na početku svakog simbola jednake amplitude i fazi na kraju. Zbog ovoga se preneseni signal glatko prilagođava kako se pomiče od jednog cikličkog prefiksa prema simbolu koji slijedi. Kada je riječ o višestaznom okruženju, prijemnik će skupiti višestruke kopije poslanih signala s različitim dolaznim vremenima. Oni se zbrajaju na prijemniku i formiraju sinusni val koji ima istu frekvenciju, a različitu amplitudu i fazu. Primljeni signal se i dalje glatko mijenja na prijelazu iz cikličkog prefiksa u simbol koji slijedi.

LTE koristi ciklički prefiks duljine $4.7 \mu\text{s}$, što odgovara maksimalnoj dozvoljenoj razlici puteva između najudaljenijih i najbližih zraka, što zadovoljava gotovo sve potrebe osim onih najvećih i najzagušenijih ćelija. Umetanjem cikličkog prefiksa smanjuje se brzina prijenosa

podataka za otprilike 7%, ali taj postotak je zanemariv zbog činjenice da se umetanjem cikličkog prefiksa u potpunosti anulira međusymbolna interferencija.

3.3.4. Korištenje frekvencijske domene

Primjenom OFDMA tehnike, u vremenskoj domeni, svaki se podnosioc prvo generira u obliku sinusnog vala da bi se modulacijskim tehnikama njegove amplitude i fazni pomaci mijenjali u intervalima trajanja simbola T koji traju $66.7 \mu\text{s}$. Ovo širi signal u frekvencijskoj domeni na pojasnu širinu od otprilike $\frac{1}{T}$.



Slika 3.11. Amplitudni spektar signala susjednih podnosioca u frekvencijskoj domeni [18]

Amplitudni spektar podnosioca poprima i pozitivne i negativne vrijednosti, te u svakom intervalu prolaze kroz nulu (slika 3.11.). Ukoliko je razmak između podnosioca Δf jednak $\frac{1}{T}$ dolazi do preplitanja podnosioca u frekvencijskoj domeni, no maksimalne amplitude svakog podnosioca koincidiraju s nulama ostalih podnosioca. Zbog ove značajke mobilni uređaji mogu uzorkovati jedan podnosioc i mjeriti njegovu amplitudu i fazu bez interferencije drugih podnosioca iako su poprilično zgusnuti. Podnosioci s ovakvim karakteristikama nazivaju se ortogonalnima.

Ovo svojstvo omogućuje efikasnu upotrebu frekvencijskog spektra i jedno je od značajnijih razloga zašto je spektralna efikasnost LTE sustava veća od spektralne efikasnosti prethodnih mobilnih komunikacijskih sustava.

3.3.5. Odabir razmaka među podnosiocima

Kada se mobilni uređaj kreće pojavljuje se Dopplerov pomak frekvencija koji utječe na nadolazeće radijske signale tako što ih prebacuje na više ili niže frekvencije, pa je zbog toga potrebna određena korekcija pristupa u odnosu na onaj opisan u prethodnom odjeljku.

Kada je riječ o višestaznom okruženju, mobilni se uređaji mogu se kretati prema radiovalovima koji se potom pomiču na višu frekvenciju ili od radiovalova što za rezultat ima snižavanje frekvencije takvih radiovalova. To rezultira smetnjama u pomicanju podnosioca, pa je mobilnim uređajima teško izmjeriti vršni odziv podnosioca jer će interferencija drugih podnosioca unijeti smetnje. Tako se gubi svojstvo ortogonalnosti. U tom slučaju potrebno je odabrati valjani razmak između podnosioca prema izrazu:

$$\Delta f \gg f_D \quad (3-6)$$

gdje f_D predstavlja Dopplerov pomak, a Δf razmak između podnosioca. Maksimalna brzina mobilnog uređaja s kojom LTE može raditi iznosi 350 km/h dok je maksimalna frekvencija nosioca približna 3.5 GHz što daje maksimalni Dopplerov pomak od 1.1 kHz. Ovo predstavlja 7% razmaka između podnosioca čime je gore navedeni uvjet zadovoljen.

Još jedno ograničenje parametara LTE-a predstavlja minimiziranje utjecaja međusimbolne interferencije koje se vrši prema izrazu:

$$T \gg \tau \quad (3-7)$$

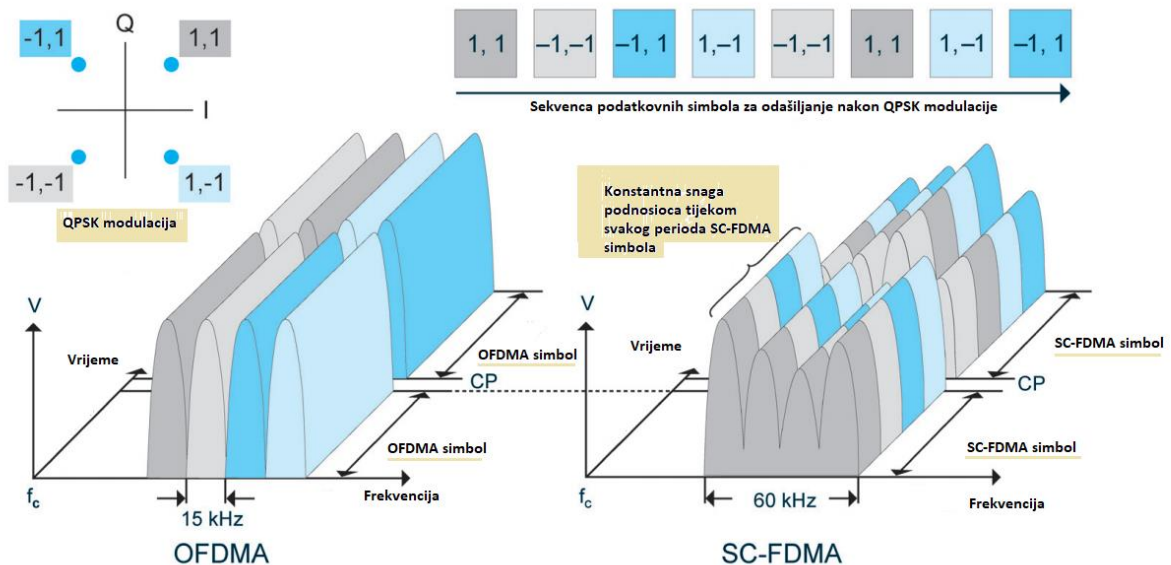
gdje τ predstavlja raspršenje kašnjenja (fading), a T trajanje simbola. LTE najčešće radi u sredinama s maksimalnim raspršenjem kašnjenja do 4.7 μ s. To trajanje predstavlja 7% od trajanja simbola koje iznosi 66.7 μ s, pa je tako gore navedeno ograničenje zadovoljeno.

Konačno, može se zaključiti da bi u slučaju razmaka među podnosiocima manjeg od 15 kHz sustav bio sklon interferenciji između podnosioca na velikim brzinama mobilnih uređaja. Kada bi razmak između podnosioca bio veći, sustav bi postao sklon međusimbolnoj interferenciji u velikim, zasićenim ćelijama. Pravi odabir razmaka između podnosioca rezultat je svojevrsnog kompromisa između ova dva ekstrema.

3.4. SC-FDMA

Iako je OFDMA radi dobro za silaznu vezu, njegovo uporaba u uzlaznoj vezi ima svoje nedostatke. Varijacije snage odašlanog signala remete rad pojačala na odašiljaču. Kod linearnih pojačala izlazna snaga proporcionalna je ulaznoj snazi, pa je dobiveni valni oblik jednak onom ulaznom. Kod ne-linearnih pojačala izlazna snaga nije proporcionalna ulaznoj snazi, pa dolazi do izobličenja izlaznog valnog oblika. Sva izobličenja vala u vremenskoj domeni će izobličiti spektar snage u frekvencijskoj domeni što kao rezultat ima prelijevanje signala u susjedne frekvencijske pojaseve i uzrokovanje interferencije drugim prijemnicima. Kako je BS znatnije skuplji dio mrežne infrastrukture, ovaj problem se rješava na način da se koriste skupa pojačala, koja su praktički linearna. Mobilni uređaji su pak, u usporedbi s BS, znatno jeftiniji, pa opcija s pojačalima nije moguća. Iz ovog razloga OFDMA nije bila pogodna za LTE uzlaznu vezu [2].

Kako je visoki odnos vršne i prosječne snage (eng. PAPR - *Peak to Average Power Ratio*) povezan s OFDM-om bio izuzetno velik, 3GPP je pronašao novu modulatorsku shemu za uzlaznu vezu LTE-a [18, na 19]. Kao rješenje pojavila se SC-FDMA (eng. *Single Carrier FDMA*).



Slika 3.12. Usporedba između prijenosa QPSK simbola primjenom OFDMA i SC-FDMA [19]

Stvarni uzlazni SC-FDMA signali su alocirani u jedinice od 12 podnosioca koji čine blok resursa. U gornjem prikazu koristi se samo četiri (M) podnosioca preko dva perioda simbola u QPSK modulaciji.

Na lijevoj strani slike 3.12. M susjednih podnosioca širine 15 kHz nalaze se na željenom mjestu u pojasnoj širini kanala i modulirani su za OFDMA simbol perioda $66.7 \mu\text{s}$ s jednim QPSK podatkovnim simbolom. M podnosioca su paralelni. Ovo su QPSK podatkovni simboli, pa je samo faza svakog podnosioca modulirana dok je snaga podnosioca konstantna između simbola. Kada prođe jedan period OFDMA simbola, umeće se CP i sljedeća četiri simbola se odašilju paralelno. Zbog vizualizacije umetanje CP-a predstavljeno je prazninom, iako u stvarnosti taj prostor popunjava kopijom kraja idućeg simbola što znači da je odašiljačka snaga kontinuirana, ali ima fazni diskontinuitet na granici simbola. Za kreiranje odašiljačkog signala koristi se IFFT na svakom podnosiocu da se stvori M signala vremenske domene. Oni se u konačnici vektorski zbrajaju da bi kreirali konačan valni oblik u vremenskoj domeni koji se koristi za transmisiju.

Desna strana slike 3.12. prikazuje SC-FDMA. Najočitija razlika između dvaju shema jest ta da OFDMA odašilje četiri QPSK podatkovna simbola paralelno, jedan po podnosiocu, dok SC-FDMA odašilje četiri OFDMA podatkovna simbola u nizu pri četiri puta većoj brzini, gdje svaki podatkovni simbol zauzima $M \times 15 \text{ kHz}$ pojasnu širinu. Vizualno, OFDMA se vidno sastoji od više nosioca (1 nosioc, 1 simbol), dok se signal SC-FDMA čini kao shema s jednim nosiocem gdje je svaki simbol predstavljen jednim širokim signalom. Valja istaknuti da je duljina OFDMA i SC-FDMA simbola jednaka – $66.7 \mu\text{s}$. Međutim, SC-FDMA simbol sadrži M pod-simbola koji predstavljaju modulacijske podatke. Paralelni prijenos više OFDMA simbola uzrokuje nepoželjno visok PAPR. Odašiljanjem M podatkovnih simbola u seriji pri M puta većoj brzini, zauzeta pojasna širina SC-FDMA jednaka je kao OFDMA, ali je PAPR jednak kao i kod OFDMA. Dodavanje mnogih uskopojasnih QPSK valnih oblika u OFDMA rezultirat će većim vršnim vrijednostima nego u širokopojasnom QPSK valnom obliku jednog podnosioca u SC-FDMA. Kako se povećava broj podnosilaca M , PAPR u OFDMA sa slučajnim modulacijskim podacima približava se statistici Gaussovog šuma, dok kod SC-FDMA PAPR ostaje isti neovisno o broju podnosilaca M .

3.5. Tehnike višestrukih antena

Na samome početku, dizajn LTE sustava omogućavao je mobilnim uređajima i BS korištenje višestrukih antena za radijski prijenos i prijem. Performanse bežične mobilne komunikacije poboljšavaju se korištenjem tehnika višestrukih antena. U posljednja dva desetljeća ostvario se veliki napredak u radu bežičnih sustava. Za razliku od naglaska na glasovne komunikacije kod prethodnih sustava, čovječanstvo danas zahtjeva usluge za Internet, laptop, FM radio, video na zahtjev i slične multimedijske aplikacije s velikom mogućnošću mobilnosti. U

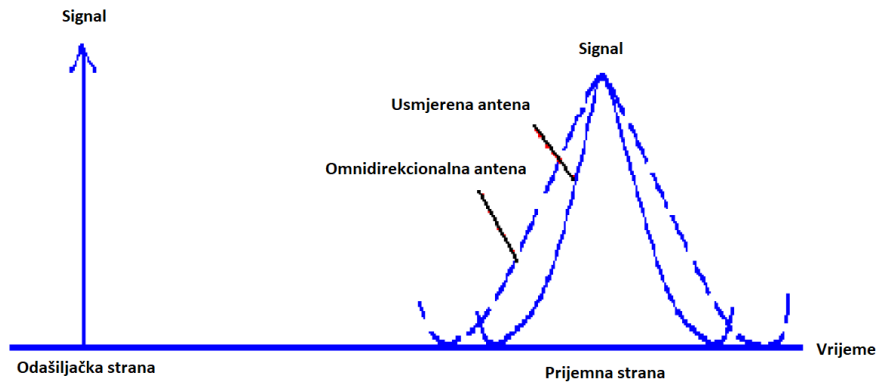
svrhu ispunjavanja ovih zahtjeva počelo se raditi na poboljšanim mrežnim protokolima, novim adaptivnim kodnim tehnikama, povećanoj brzini transmisije, smanjenjem interferencije i fedinga. Shodno tome, razvojem tehnika odašiljanja antena, uz prethodno navedena poboljšanja, u mogućnosti je riješiti mnoge probleme kod bežičnih komunikacijskih sustava.

Najčešće korištena tehnika naziva se obrada diverzitija (eng. *diversity processing*), koja povećava snagu prijemnog signala i smanjuje količinu fedinga korištenjem višestrukih antena na odašiljaču, prijemniku ili na oba kraja. Kod prostornog multipleksiranja (eng. *spatial multiplexing*) i odašiljač i prijemnik koriste višestruke antene u svrhu povećanja brzine prijenosa podataka. Na koncu, prilikom digitalnog oblikovanja snopa signala koriste se višestruke antene na BS kako bi se povećalo područje pokrivanja signala. Prostorno multipleksiranje se još naziva MIMO (eng. *multiple input multiple output*) antene.

Na bežičnu komunikaciju utječu gubici u rasprostiranju, dugotrajni feding (slabljenje), kratkotrajni feding, istokanalna interferencija, smetnje susjednog kanala i međusimbolna interferencija. Kako bi se ublažilo slabljenje signala i interferencija u mobilnom okruženju, tehnike antena predstavljaju značajnu ulogu u prevenciji. Ovisno o potrebama promatranih aplikacija biraju se različiti tipovi antena. Tipovi antena variraju od:

- Širokopolasne antene koje rade na širokom frekvencijskom pojasu;
- Višefrekvencijske antene koje rade na dva ili više frekvencijska opsega relativno uskih frekvencijskih opsega;
- Antene višestrukih zraka koje generiraju višestruke simultane zrake.

Također, antene mogu biti usmjerene ili omnidirekionalne (rad u svim smjerovima). Raspršenje kašnjenja veće je kod omnidirekcionalnih antena nego u usmjerenim antenama. Na slici 3.13. prikazana je usporedba raspršenja kašnjenja između omnidirekcionalnih i usmjerenih antena.



Slika 3.13. Raspršenje kašnjenja u mobilnom okruženju [20]

Tehnike višestrukih antena pružaju veliku brzinu širokopoljsne multimedijске komunikacije s umanjenom interferencijom i fadingom.

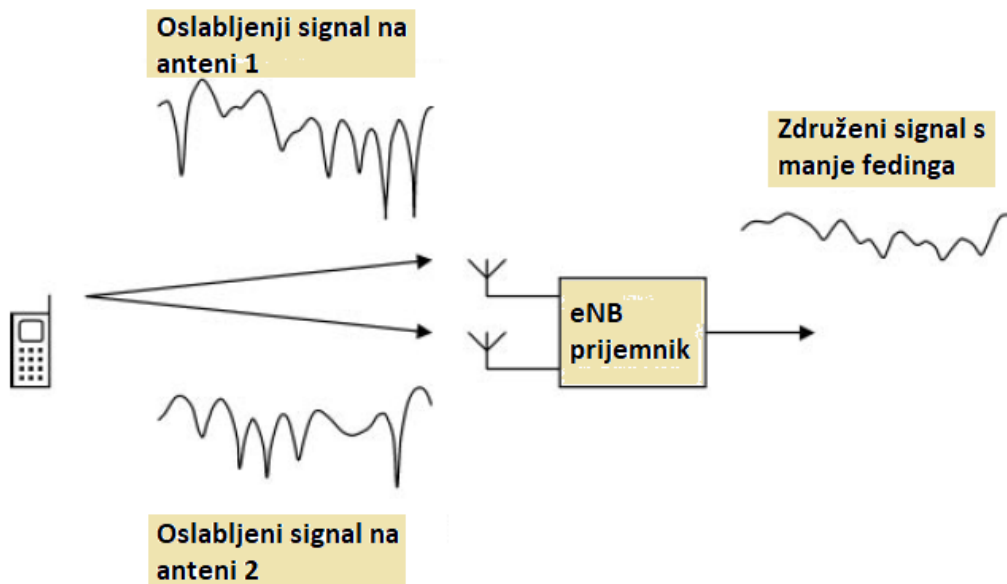
3.5.1. Obrada diverzitija

3.5.1.1. Prijemni diverziti

Kod prijemnog diverzitija bazna stanica koristi dvije prijemne antene kako bi prikupila dvije kopije zaprimljenog signala. Signali dolaze do prijemnih antena pod različitim faznim pomacima koji se anuliraju korištenjem estimacije (procjene) kanala, pa ih BS zbraja u fazi, bez rizika destruktivne interferencije između njih.

Signale formiraju brojne manje zrake, pa su zbog toga podložne fadingu. Ukoliko oba signala postanu podložna fadingu u isto vrijeme, njihova združena snaga biti će niska (slika 3.14.). No, ukoliko su antene dovoljno udaljene, barem nekoliko valnih duljina frekvencije nosioca, geometrije fadinga biti će različite, pa će signali doživjeti fading u različitim vremenima. Na taj način se umanjila količina slabljenja združenog signala što smanjuje stopu pogreške.

BS uobičajeno imaju više od jedne prijemne antene. Specifikacije LTE mobilnih uređaja nalažu da uređaji koriste dvije prijemne antene, stoga LTE sustavi koriste prijemni diverziti i u DL i u UL vezi. Udaljenost između antena mobilnog uređaja je manja od udaljenosti antena BS-a, što smanjuje koristi prijemnog diverzitija, ali ovom se doskače korištenjem dvaju neovisnih polarizacija dolaznog signala.



Slika 3.14. Umanjenje fediga koristeći diverziti prijemnik [2]

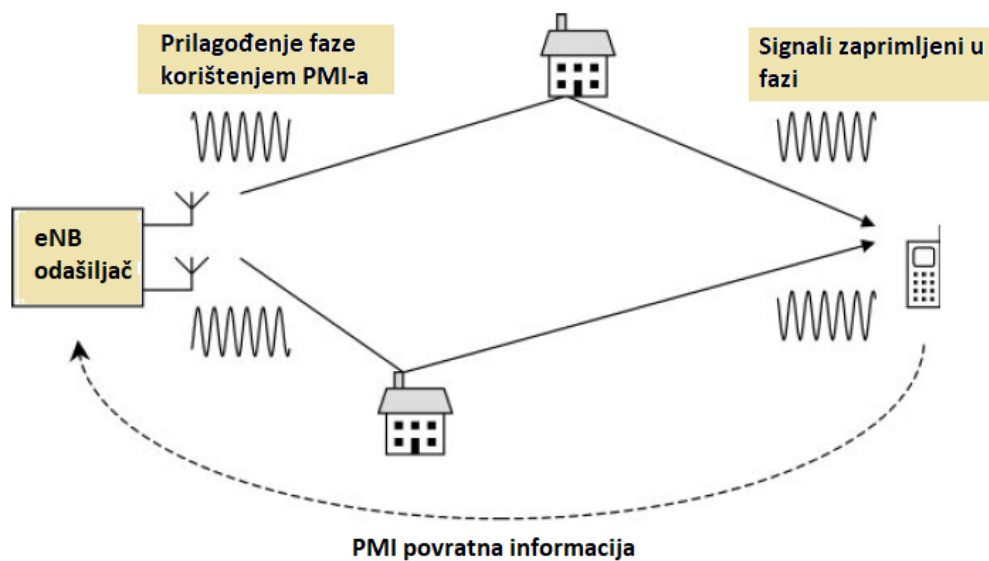
3.5.1.2. Odašiljački diverziti zatvorene i otvorene petlje

Odašiljačkim diverzitetijem smanjuje se količina fedinga uslijed korištenja dvaju ili više antena na odašiljaču.

Signali koji se zbrajaju na prijemnoj anteni povećavaju rizik destruktivne interferencije. Ovaj problem rješava se tehnikom odašiljačkog diverzitetija zatvorene petlje kog kojeg odašiljač šalje dvije kopije signala, kao i kod prijemnog diverzitetija, te dodaje fazni pomak na jedan ili oba signala prije odašiljanja. Ovime se osigurava da dva signala na prijemnik dođu u fazi, bez rizika destruktivne interferencije. Fazni pomak određuje se uz pomoć indikatora matrice pred-kodiranja (eng. PMI - *precoding matrix indicator*) koji se računa na prijemniku i šalje na odašiljač (slika 3.15.).

PMI indikator može odaslati oba signala bez faznog pomaka ili može odaslati drugi signal uz fazni pomak od 180° . Ako prvi scenarij dovede do destruktivne interferencije, automatski će se izvršiti drugi scenarij. Amplitude združenog signala će biti niske samo u slučaju kada dva zaprimljena signala dožive fading u istom trenutku. Fazni pomak kojeg uvodi radio kanal ovisno o valnoj duljini signala nosioca, tj. o njegovoj frekvenciji. Ovo ukazuje da je najbolji izbor PMI indikatora funkcija frekvencije. Kod OFDMA sustava ovaj problem se rješava tako što prijemnik vraća odašiljaču povratne informacije u vidu različitih PMI vrijednosti za različite setove podnosioca. Najbolji odabir PMI-a ovisit će i o poziciji uređaja, pa će mobilni uređaj koji se kreće

velikom brzinom imati PMI koji će često varirati. Petlja povratnih informacija uvodi kašnjenje u sustav, pa nije pogodna za mobilne uređaje s velikom brzinom kretanja.



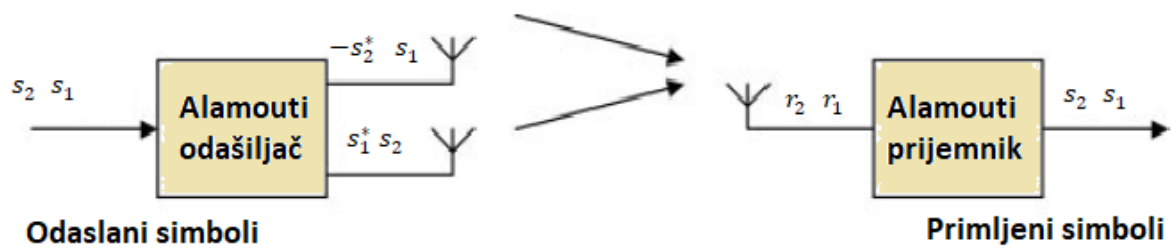
Slika 3.15. Koraci odašiljačkog diverzitija zatvorene petlje [2]

3.5.1.3. Odašiljački diverziti otvorene petlje

Ova tehnika, još se naziva i Alamoutijeva tehnika, koristi dvije antene odašiljača za slanje dva simbola, koji se označuju kao s_1 i s_2 , u dva uzastopna vremenska koraka (slika 3.16.). U prvom koraku, odašiljač šalje s_1^* s prve antene i s_2^* s druge antene, dok u drugom koraku šalje s_2^* s prve antene i s_1^* s druge antene (oznaka * - odašiljač mijenja znak kvadraturene komponente kompleksnom konjugacijom).

Time se prijemniku omogućava da dva puta uspješno izmjeri primljeni signal, koji odgovara različitim kombinacijama s_1 i s_2 . Rješavaju se rezultirajuće jednadžbe kako bi se povratili preneseni simboli.

Ova tehnika ima dva zahtjeva. Prvi je taj da uzorci fadinga moraju biti otprilike jednaki između prvog i drugog vremenskog koraka, a drugi je taj da signali ne smiju slabiti u isto vrijeme.

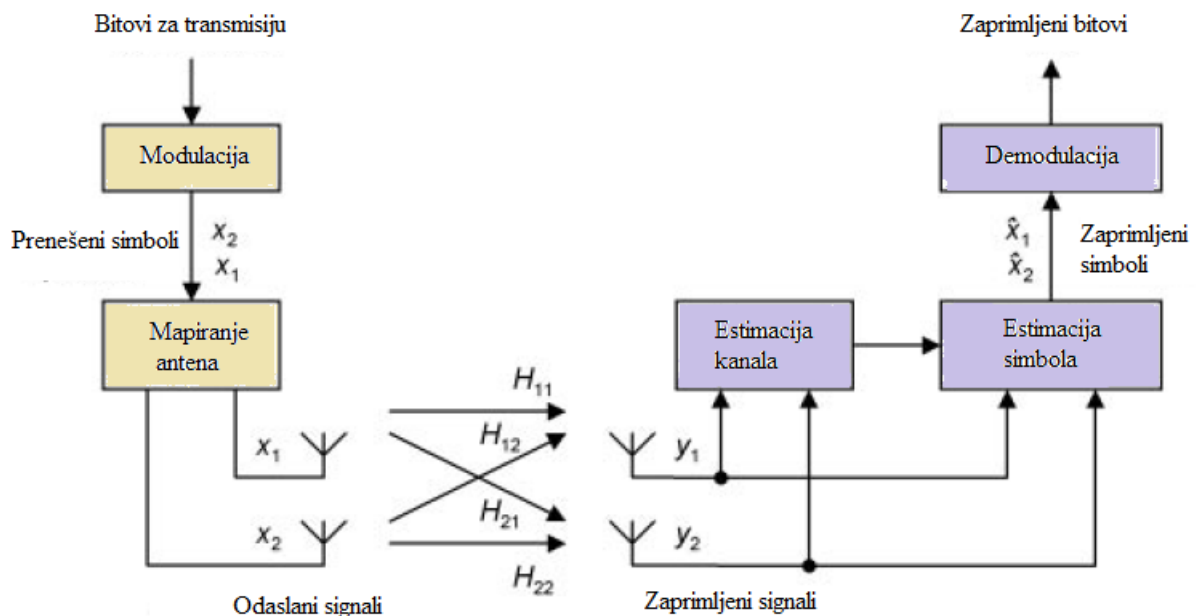


Slika 3.16. Koraci pri uporabi Alamoutijeve tehnike za odašiljački diverziteti otvorene petlje [2]

Kombiniranjem tehnika otvorene i zatvorene petlje omogućava se obrada diverzitija korištenjem višestrukih antena na odašiljačkoj i prijemnoj strani.

3.5.2. Prostorno multipleksiranje (MIMO)

Prostornim multipleksiranjem postiže se višestruki paralelan prijenos podataka između višestrukih antena na odašiljaču i prijemniku. Sustav koji se sastoji od N_T odašiljačkih i N_R prijernih antena, znan kao $N_T \times N_R$ sustav prostornog multipleksiranja, ima vršnu brzinu prijenosa podataka proporcionalnu funkciji $\min(N_T, N_R)$.



Slika 3.17. 2x2 MIMO sustav [2]

Na slici 3.17. odašiljač i prijemnik imaju po 2 antene. Na odašiljačkoj strani, u postupku mapiranja antena modulacijski simboli (BPSK) uzimaju se u paru te se potom pojedinačno šalju na svaku antenu. Prijemnik je dizajniran da uzme u obzir vremensku razliku u prijemu signala (kašnjenje), dodatne šumove ili interferencije i izgubljene signale.

Odašiljanjem identičnih podataka na više tokova, MIMO unosi redundanciju u prijenos podataka za razliku od sustava s jednom antenom za odašiljanje i jednom za zaprimanje (eng. SISO – *single input single output*). Zbog ovoga su MIMO sustavi razvili prednosti u odnosu na SISO sustave.

MIMO sustavi mogu koristiti ogibne i reflektirane RF signale (znane kao višestazna propagacija) kako bi poboljšali snagu signala i u slučajevima kada ne postoji direktna linija pogleda (eng. LOS – *Line of Sight*) između BS i uređaja, jer MIMO sustavi zaprimaju i obrađuju višestruke tokove istih podataka u blago različitim vremenskim intervalima. Ova karakteristika je izuzetno pogodna za urbane sredine, gdje je prisutan problem s degradacijom signala između pojedinih antena bez direktne linije pogleda (eng. NLOS – *No LOS*). Urbano okruženje utječe na širok dijapazon mogućih puteva refleksije za MIMO signale koji se prenose. Također, omogućuje i poboljšanje u propusnosti korisnika u vidu povećanja kvalitete i kvantitete podataka koji se prenose (npr. multimedija). Korištenjem višestrukih tokova podataka problemi poput fedinga, koji utječu na gubitak ili ispadanje podatkovnih paketa, mogu se smanjiti, što će utjecati na primjer na bolju kvalitetu multimedije.

3.5.3. Tehnike višestrukih antena koristeći antenske nizove

3.5.3.1. Antene za skeniranje zraka

Antene za skeniranje izrađuju se kao niz antena koje se pobuđuju signalima različite faze. Svakom pojedinačnom elektroničkom promjenom faze antene, smjer maksimalnog zračenja antene se može nagnuti u proizvoljnom smjeru (kao na slici 3.18.). Faktor niza jednolikog linearnog niza od n članova računa se prema:

$$AF = \frac{\sin\left(\frac{n\psi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (3-8)$$

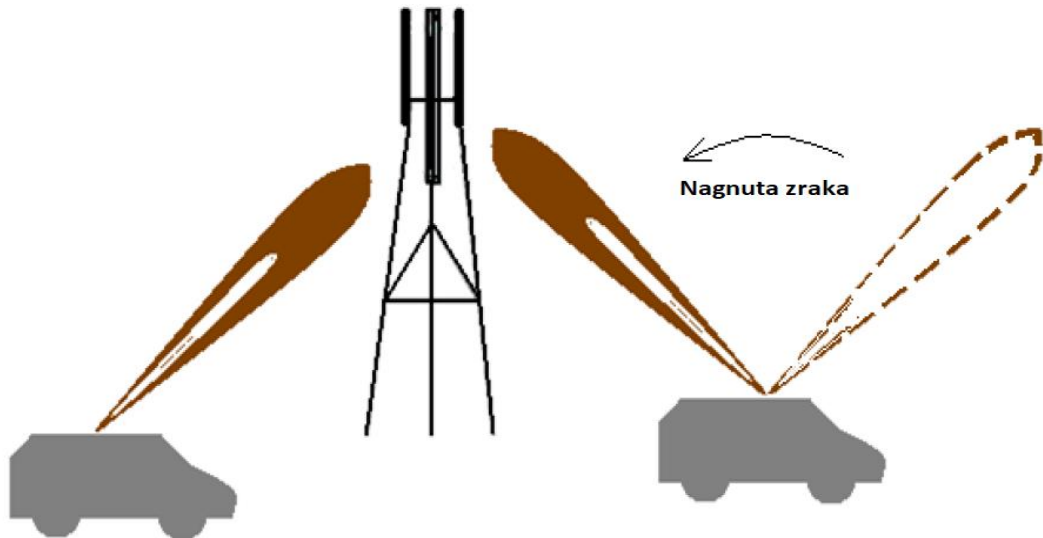
gdje se ψ tumači kao:

$$\psi = \beta d \cos(\theta) + \alpha \quad (3-9)$$

pa d predstavlja razmak između elemenata niza, oznaka α predstavlja progresivni pomak faze, a β iznosi:

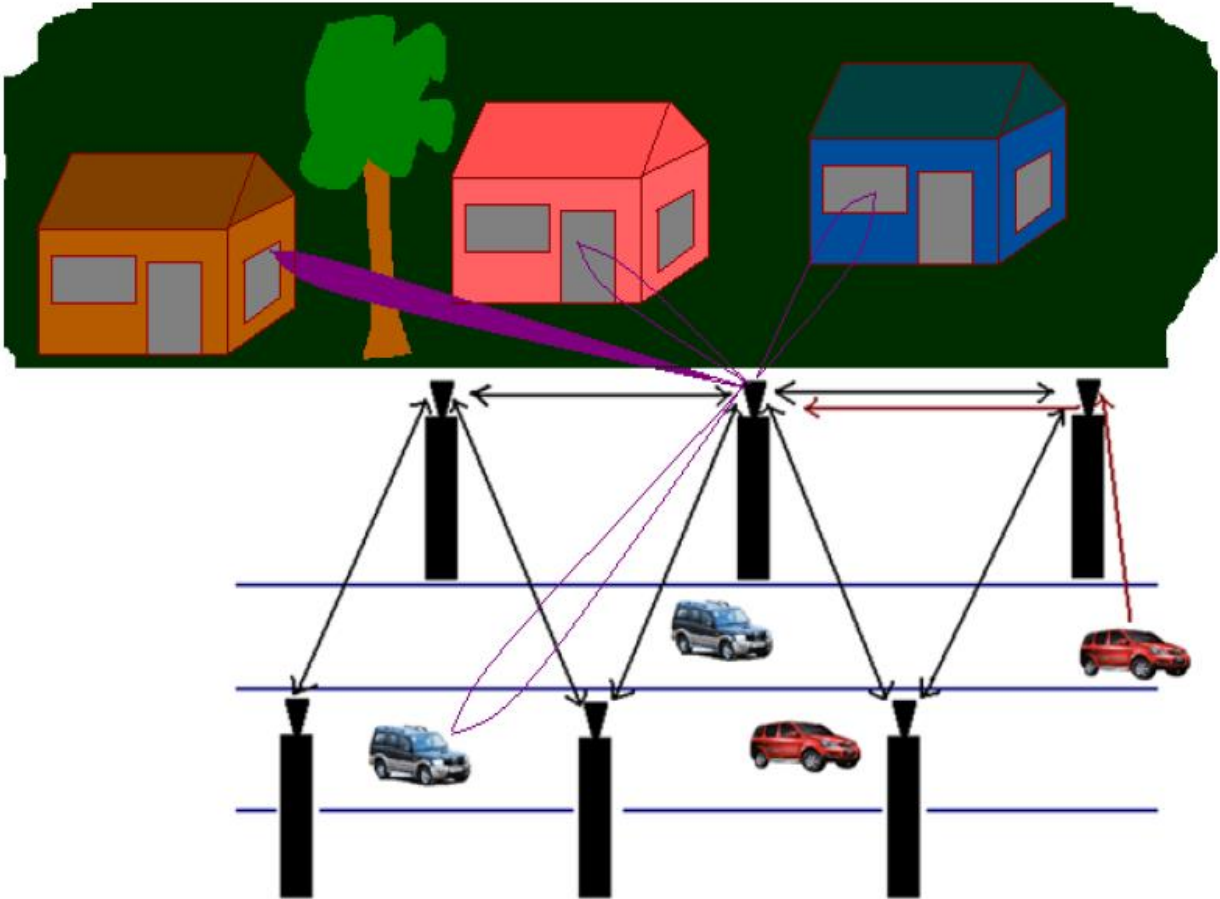
$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3-10)$$

Ako je glavna zraka nagnuta pod kutem θ_0 , onda se progresivni pomak faze prilagođava prema izrazu 3.10.



Slika 3.18. Antene za skeniranje kod primjene u vozilima [20]

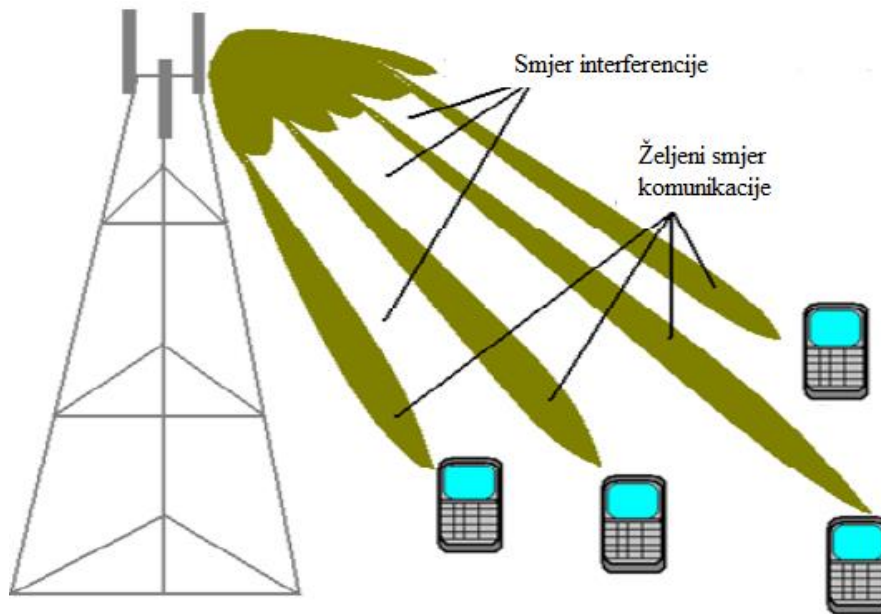
Antene za skeniranje zraka korisne su u bežičnoj komunikaciji koja koristi milimetarski radijski pojas, kao u IEEE 802.16. Arhitektura inteligentnih transportnih sustava (ITS) koristi milimetarsku radijsku tehnologiju gdje se koristi ovakva vrsta antena (slika 3.19.). ITS pružaju bežičnu PAN (eng. *Wireless Personal Area Network*) komunikaciju, komunikaciju između vozila u svrhu sprječavanja prometnih nesreća te komunikaciju između prometne okoline i vozila.



Slika 3.19. Antene za skeniranje zraka kod inteligentnih transportnih sustava [20]

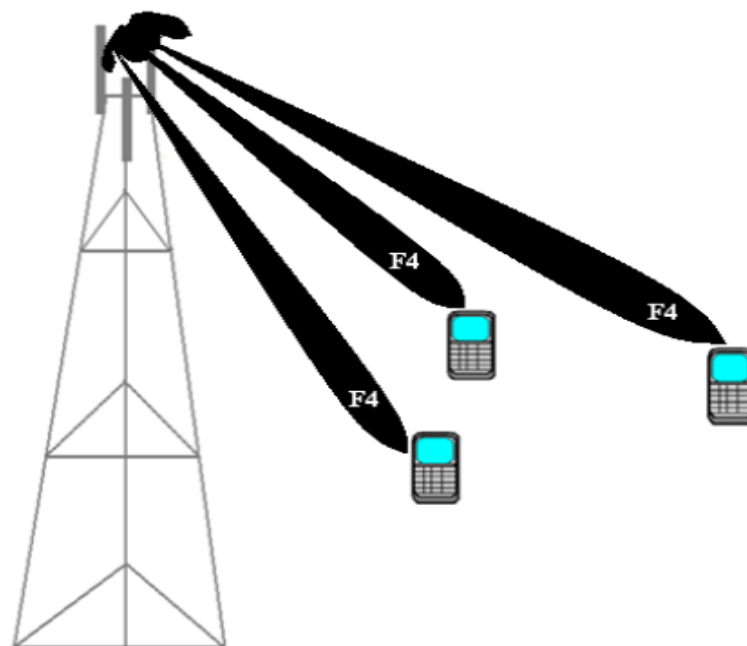
3.5.3.2. Pametne i SDMA antene

Pametne antene smanjuju gubitke u snazi pružajući komunikaciju od točke do točke (eng. *point to point communication*) baziranu na smjeru dolaska signala (slika 3.20.). Ova prilagodljiva antena anulira odašiljanje ili prijem iz neželjenog smjera i daje znatno usmjereniju zraku prema željenom smjeru. Zraka se prilagođava podešavanjem amplituda i faza signala u svrhu ostvarivanja željenog uzorka korištenjem antenskih nizova.



Slika 3.20. Pojednostavljeni prikaz rada pametne antene [20]

Kod SDMA (eng. *Spatial DMA*) tehnike generiraju se višestruke zrake na istoj frekvenciji s prostornim i kutnim odvajanjem kako bi se komuniciralo s višestrukim ko-kanalnim korisnicima unutar istog frekvencijskog pojasa (slika 3.21.). SDMA je generalno bazirana na MIMO sustavu ili na sustavu pametne antene i pogodan je za mobilne i *ad hoc* mreže. U ovom slučaju, kapacitet mreže, tj. broj korisnika po ćeliji je velik.



Slika 3.21. SDMA antena [20]

Višestruke antene u SDMA štite kvalitetu radiosignala, štede snagu i brane ga od interferencije. Prostorno multipleksiranje u SDMA postiže se odašiljanjem niza bita kroz višestruke antene čime se povećava brzina prijenosa podataka.

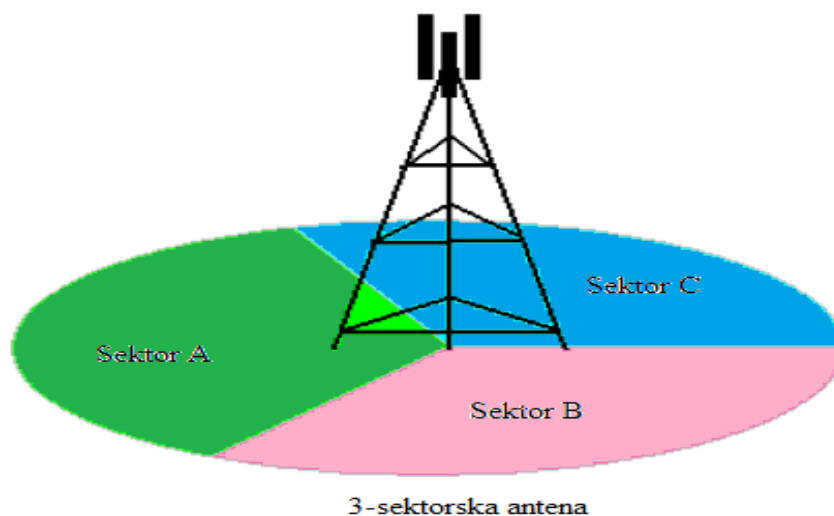
3.5.4. Tehnike višestrukih antena korištenjem neovisnih višestrukih antena

3.5.4.1. Diverzitetni antenski sustav

Ovaj antenski sustav koristi višestruke antene kako bi poboljšao performanse sustava u fading okruženju. Antene se postavljaju kako bi primile signale s visokom međusobnom korelacijom. Svojstva elemenata antenskog niza se kombiniraju na RF nivou, ali u diverzitetni shemi signali s diverzitetni antena se kombiniraju ili na IF razini ili na razini osnovnog pojasa. Kod prostornog diverziteta antene se udaljuju na udaljenost veću od koherentne udaljenosti. Pri frekvencijskom diverzitetu antene se koriste za prijem različitih frekvencija. Kod polarizacijskog diverziteta određen broj antena se koristi kako bi se: izvršio prijem vertikalno polariziranog signala, izvršio prijem kružne polarizacije u desno ili u lijevo.

3.5.4.1.1. Sektorske antene

Sektorske antene su usmjerene antene koje tvore dijagram zračenja koji pokriva dio ćelijskog područja (slika 3.22.). Sektori od 120°, 90°, 60°, 30° su znani kao 3-sektorske, 4-sektorske, 6-sektorske i 12-sektorske antene. Tehnike višestrukih antena korištene u sektorskim antenama smanjuju ko-kanalnu interferenciju, povećavaju spektralnu efikasnost u ćelijskoj komunikaciji, smanjuje raspršenje kašnjenja, time i BER. Korištenje ovih antena pruža efikasno ponovno korištenje frekvencija.



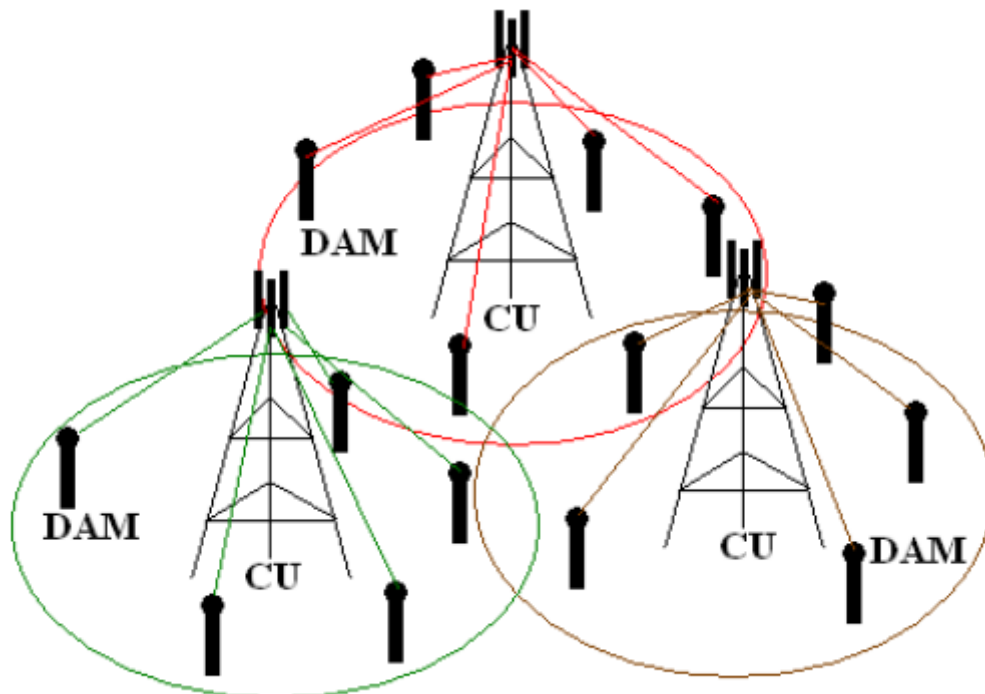
Slika 3.22. Sektorska antena [20]

3.5.4.2. MIMO antene

MIMO bežični sustavi prostornim multipleksiranjem povećavaju spektralnu efikasnost i koriste tehnike različitosti (prostorno-vremensko kodiranje) kako bi poboljšali pouzdanost veze korištenjem višestrukih antena. Performanse MIMO antena ovisit će o visini na kojoj se antene nalaze i o prostornom okruženju u kojem se nalaze. Antene su udaljene nešto više od koherentne udaljenosti. MIMO tehnika pogodna je za WiFi, WiMAX, IEEE 802.11, 802.16, 4G i LTE. Za buduće potrebe mobilnih korisnika, MIMO neće biti u stanju zadovoljiti QoS zahtjeve, stoga se razvija masivni MIMO sustav koji će odgovoriti zahtjevima.

3.5.4.3. Distribuirani antenski sustav

U distribuiranim antenskim sustavima (eng. DAS – *Distributed Antenna System*) višestruke antene koriste se kako bi se pružila bežična komunikacija visoke kvalitete u urbanim i suburbanim područjima, gdje je primijećena relativno loša kvaliteta signala. Glavni modul za obradu antene centraliziran je na lokaciji središnje jedinice (eng. CU – *Central Unit*) i povezan je s distribuiranim antenskim modulom (eng. DAM – *Distributed Antenna Module*) kao što prikazuje slika 3.23. Višestruke antene su zemljopisno raspoređene u svrhu smanjenja udaljenosti pristupa, a naglasak je na što manjoj potrošnji snage.



Slika 3.23. Distribuirani antenski sustav [20]

4. PROGRAMSKI DEFINIRAN RADIO (SDR)

Eksplozivnim rastom načina i sredstava pomoću kojih korisnici trebaju komunicirati (podatkovna komunikacija, glasovna i vide komunikacija, emitiranje poruka, komunikacijske naredbe i kontrole i sl.) jeftine i lako isplative modifikacije na radio uređajima postale su iznimno važne. Programski definiran radio (eng. SDR – *Software Defined Radio*) donosi fleksibilnost, isplativost i napredak u komunikaciji koje su prepoznali davatelji usluga i razvojni inženjeri.

SDR Forum u kolaboraciji s IEEE P1900.1 grupom, pokušao je precizno definirati SDR kako bi bila jasna njegova primjena. Može se reći da je SDR radio u kojem su sve ili neke funkcije fizičkog sloja programski (softverski) definirane.

Radio je svaka vrsta uređaja koja bežično odašilje ili zaprima signal u RF dijelu elektromagnetskog spektra u svrhu olakšavanja prijenosa informacija. Danas postoje mnoštvo uređaja koje sadrže radio – mobilni uređaji, računala, vozila, televizije itd.

Tradicionalni radio uređaji zasnovani na sklopovlju ograničavaju međufunkcionalnosti i mogu se modificirati jedino kroz fizičke izmjene radija. To rezultira povećanjem proizvodnih troškova i minimalnom fleksibilnosti pri podržavanju standarda više valnih oblika. Nasuprot tome, programski definirana radio tehnologija pruža učinkovito i relativno jeftino rješenje ovog problema, omogućujući poboljšanja višemodnim, višepojasnim ili višenamjenskim bežičnim uređajima kroz programsku (softversku) nadogradnju.

SDR definira skup sklopovskih i programskih tehnologija gdje se sve ili neke funkcije radija implementiraju kroz računalni program koji se može mijenjati. Ovi uređaji uključuju FPGA (eng. *Field Programmable Gate Arrays*), DSP (eng. *Digital Signal Processors*), GPP (eng. *General Purpose Processors*), programabilni SoC (eng. *System on Chip*) ili programabilne procesore koji su aplikacijski specifikirani. Upotreba ovih tehnologija omogućuje dodavanje novih bežičnih značajki i mogućnosti koje se mogu dodati postojećim radijskim sustavima bez potrebe za novim sklopovljem ili izmjenama postojećeg [21].

4.1. RTL-SDR, LTE800 i LTE-Cell-Scanner

4.1.1. RTL-SDR

Za potrebe mjerenja u ovome diplomskom radu korišten je RTL-SDR. On se može koristiti kao računalni radijski skener za primanje radijskih signala u realnom vremenu bez Internetske konekcije. Ovisno o modelu, uređaj može raditi s frekvencijama od 500 kHz do 1.75 GHz.

Model RTL-SDR uređaja koji je korišten za izradu skenera je RTL2832U R820T2 TXCO+BIAS T+HF (SI.4.1.) [22].



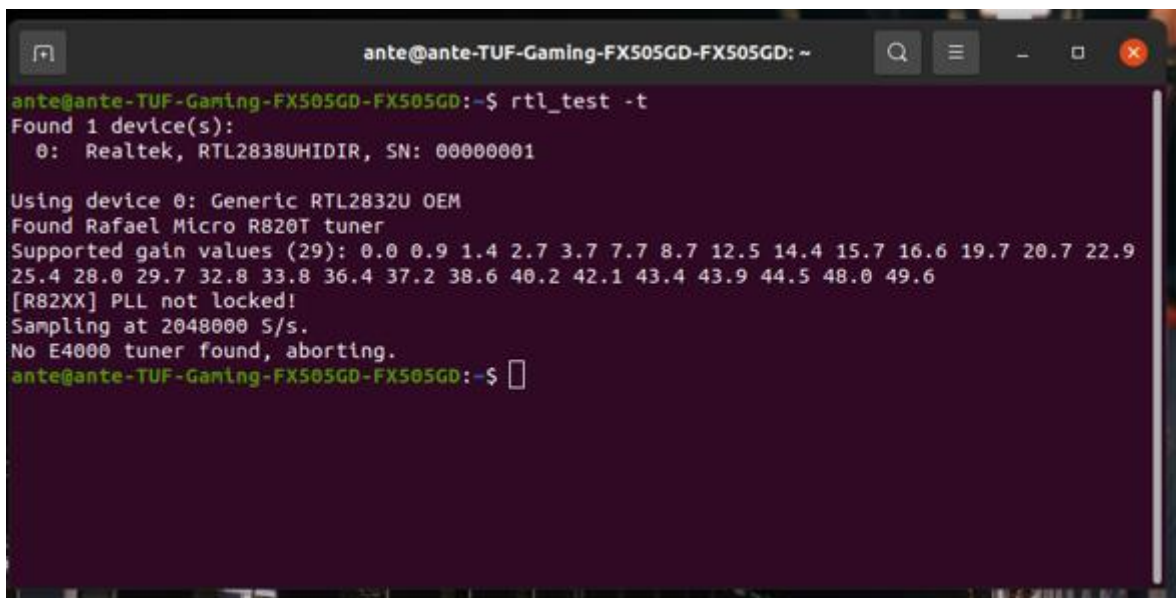
Slika 4.1. RTL-SDR uređaj s pripadajućom antenom

4.1.1.1. Instalacija i pokretanje RTL-SDR uređaja

Instaliranje upravljačkog programa RTL-SDR uređaja provodi se prema sljedećim koracima. Nakon pokretanja Ubuntu 20.04 operacijskog sustava, otvara se terminal i u njega se unosi naredba `sudo apt-get update` uz pomoć koje se vrši preuzimanje liste paketa iz spremišta te se potom vrši njihovo ažuriranje kako bi se dobile informacije o najnovijim verzijama paketa i njihovim ovisnostima. Nakon toga unosi se naredba `sudo apt-get install rtl-sdr` kojom se instaliraju upravljački programi RTL-SDR-a. Potom se naredbom `sudo apt-get install libusb-1.0-0-dev` instalira C biblioteku koju pruža generički pristup USB uređajima. Nadalje, naredbom `git clone git://osmocom.org/rtl-sdr.git` dohvaćaju se upravljački programi za RTL2832U uređaj. Potom se unose sljedeće naredbe: `cd rtl-sdr/` (otvaranje direktorija „rtl-sdr“), `mkdir build` (kreiranje

direktorija „build“), `cd build` (otvaranje direktorija „build“), `cmake ../ -DINSTALL_UDEV_RULES=ON` (uz pomoć `cmake`-a upravlja se procesom prevođenja programskih alata), `make` (naredba kojom se prevode i izgrađuju izvršni programi i biblioteke iz izvornog koda), `sudo make install` (instaliranje datoteka u direktorije u statusu administratora), `sudo cp ../rtl-sdr.rules /etc/udev/rules.d/` (kopiranje pravila iz „rtl-sdr“ direktorija u putanju „/etc/udev/rules.d“), `sudo ldconfig` (ovom naredbom se stvaraju, ažuriraju i uklanjaju potrebne veze i priručna memorija).

Zatim je potrebno kreirati tekstualnu datoteku „rtlsdr.conf“ u direktoriju `/etc/modprobe.d` te u nju dodati liniju „blacklist dvb_usb_rtl28xxu“. Nakon ponovnog pokretanja računala, unosom naredbe `rtl_test -t` u terminal (dok je RTL-SDR uređaj priključen u računalo), ispisuju se sljedeće poruke ukoliko je RTL-SDR uređaj uspješno osposobljen za rad (Sl.4.2.).



```
ante@ante-TUF-Gaming-FX505GD-FX505GD: ~
ante@ante-TUF-Gaming-FX505GD-FX505GD:~$ rtl_test -t
Found 1 device(s):
 0: Realtek, RTL2838UHIDIR, SN: 00000001

Using device 0: Generic RTL2832U OEM
Found Rafael Micro R820T tuner
Supported gain values (29): 0.0 0.9 1.4 2.7 3.7 7.7 8.7 12.5 14.4 15.7 16.6 19.7 20.7 22.9
25.4 28.0 29.7 32.8 33.8 36.4 37.2 38.6 40.2 42.1 43.4 43.9 44.5 48.0 49.6
[R82XX] PLL not locked!
Sampling at 2048000 S/s.
No E4000 tuner found, aborting.
ante@ante-TUF-Gaming-FX505GD-FX505GD:~$
```

Slika 4.2. Ispis nakon unosa naredbe za uspješnu detekciju RTL-SDR uređaja

4.1.2. LTE800 sustav

Mrežni operateri u RH, ovisno o raspodjeli frekvencijskog spektra, koriste sljedeće pojaseve za rad LTE tehnologije:

- B20 (LTE 800 MHz);
- B8 (LTE 900 MHz);
- B3 (LTE 1800 MHz);
- B1 (LTE 2100 MHz);
- B7 (LTE 2600 MHz).

Ovaj rad bavi se mjerenjima na B20 LTE pojasu kojeg u RH koriste dva mobilna operatera. Frekvencija na kojoj su vršena mjerenja u radu pripada dijelu frekvencijskog spektra kojeg iznajmljuje Hrvatski Telekom d.d.. Spektar je raspoređen na način da je raspon frekvencija od 806 do 821 MHz dodijeljen za silaznu vezu, dok je za uzlaznu vezu dodijeljen raspon frekvencija od 847 do 862 MHz, uz razmak od 41 MHz između dva raspona [23].

B20 LTE pojas drugi je najpopularniji pojas korišten od strane mobilnih operatera u svrhu implementacije LTE mreže. Ovaj tip pojasa pokazao se dobrim za pokrivanje širokog područja u regionalnom i ruralnom okruženju te za pokrivanje unutar zgrada, a uz to predstavlja digitalnu dividendu koja je proizašla iz prelaska televizijskih kuća na digitalan prijenos signala. B20 pojas podržava širine kanala od 5, 10, 15 i 20 MHz [24].

4.1.3. LTE-Cell-Scanner

LTE-Cell-Scanner predstavlja skup programskih alata otvorenog koda za lociranje i praćenje LTE baznih stanica. Alati korišteni u diplomskom radu su *CellSearch* i *LTE-Tracker*. LTE-Cell-Scanner moguće je preuzeti na [25].

Postupak preuzimanja koda i instalacije dan je u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Postupak preuzimanja i instalacije alata *LTE-Cell-Tracker*

Preuzimanje koda	git clone git://github.com/JiaoXianjun/LTE-Cell-Scanner
Biblioteke potrebne za instalaciju	Boost, ITTP, rtsdr, fftw
Kompajliranje/prevođenje	cd LTE-Cell-Scanner mkdir build cd build cmake .. make
Instalacija	sudo make install

Kod je instaliran u operacijskom sustavu Ubuntu 20.04, koji je dostupan na [26], koji koristi Linux kao jezgru operacijskog sustava.

CellSearch je program otvorenog koda koji se koristi za pretragu frekvencija nosilaca za signale LTE baznih stanica i kao rezultat vraća listu svih pronađenih ćelija. Ćelija će biti pronađena ukoliko je MIB (eng. *Master Information Block*) blok uspješno dekodiran, tj. ukoliko je CRC provjera uspješna. Tijekom izvođenja programa ispisuje se status (je li na toj frekvenciji pronađena

ćelija ili ne) i u slučaju pronalaska ćelije ispisuje odgovarajuću poruku (SI.4.1.). Nakon što se program izvrši do kraja ispisuje se rezime svih nosioca gdje je LTE signal bio prisutan i listu svih detektiranih ćelija.

LTE ćelije rade ili u TDD ili u FDD načinu rada. Svaka BS u LTE mobilnoj mreži razlikuje se prema jedinstvenom identifikatoru (ID). Postoji 504 identifikatora prema kojima se razlikuju ćelije, a nazivaju se *cell ID*. Raspored baznih stanica provodi se na način da su BS koje imaju jednake identifikatore za ćelije dovoljno udaljene jedna od druge. UE koji pokušava komunicirati s BS prvo dekodira *cell ID* najbliže BS. Postupak održavanje vremenske i frekvencijske sinkronizacije i pronalaska *cell ID*-a naziva se pretraga ćelija (eng. *cell search*). Tijekom ovog procesa, UE prikuplja osnovne podatke u koje spadaju *cell ID*, način dupleksiranja, frekvencijski pomak u odnosu na BS itd.

Prijenos podataka u LTE sustavima vrši se na okvirima trajanja 10 ms unutar dane pojasne širine. Svaki okvir dijeli se u 10 pod-okvira, gdje je trajanje svakog pod-okvira 1 ms, koji se kasnije dijele u dva niza jednakog trajanja. Svaki niz se sastoji od 6 ili 7 OFDM simbola, ovisno o duljini CP-a. Blok resursa (RB) je najmanja vremensko-frekvencijska jedinica koja može biti dodijeljena korisnicima. Svaki se RB sastoji od 6 ili 7 simbola, s po 12 elemenata resursa u svakom od simbola. Element resursa je resurs kojeg pruža podnosilac u OFDM simbolu. Kanal namijenjen LTE sinkronizaciji podijeljen je u dva dijela: PSCH (primarni sinkronizacijski kanal) i SSCH (sekundarni sinkronizacijski kanal). Signali koji se prenose PSCH kanalom su primarne sinkronizacijske sekvence (eng. PSS – *Primary Synchronization Sequence*) koje prenose sektorski identifikator (eng. SID - *sector ID*), dok se SSCH kanalom prenose sekundarne sinkronizacijske sekvence (eng. *Secondary Synchronization Sequence*) koje prenose identifikator grupe (eng. GID - *Group ID*). Dohvaćanje *cell ID* vrijednosti vrši se prema izrazu [27]:

$$cell ID = (3 \cdot GID) + SID \quad (4-1)$$

Kako bi UE uspješno detektirao *cell ID*, on mora izdvojiti SID i GID iz oba kanala za sinkronizaciju. Nakon detekcije *cell ID*-a, UE pokušava dekodirati informacije s BCH kanala koje potvrđuju uspješan postupak pretraživanja ćelije.


```

ante@ante-TUF-Gaming-FX505GD-FX505GD:~$ cd LTE-Cell-Scanner
ante@ante-TUF-Gaming-FX505GD-FX505GD:~/LTE-Cell-Scanner/build$ ./src/CellSearch --freq-start 813500000 -g 28.0
LTE CellSearch (release) beginning. 1.0 to 1.1.0: An enhanced LTE Cell Scanner/tracker. Xianjun Jiao (putaoshu@msn.com)
PPM: 0
correction: 1
Found Rafael Micro R820T tuner
[R82XX] PLL not locked!
RTLSDR device FOUND!
capture_data Warning: It is not RTLSDR_TUNER_E4000
set fc_programmed=fc_requested
Use HW begin with 813.5MHz actual 813.5MHz 1.92e+06MHz
Search frequency: 813.5 to 813.5 MHz
with freq correction: 0 kHz
Search PSS at fo: -140 to 135 kHz

Examining center frequency 813.5 MHz ... try 0
capture_data Warning: It is not RTLSDR_TUNER_E4000
set fc_programmed=fc_requested
PSS XCORR cost 4.29447s
Hit num peaks 2
try peak 0 tdd_flag 0
Detected a FDD cell! At frequency 813.5MHz, try 0
cell ID: 389
PSS ID: 2
RX power level: -17.8107 dB
residual frequency offset: 1438.31 Hz
k_factor: 0.999998
try peak 0 tdd_flag 1
try peak 1 tdd_flag 0
Detected a FDD cell! At frequency 813.5MHz, try 0
cell ID: 85
PSS ID: 1
RX power level: -19.7254 dB
residual frequency offset: 1436.56 Hz
k_factor: 0.999998
try peak 1 tdd_flag 1
Detected the following cells:
DPX:TDD/FDD; A: #antenna ports C: CP type ; P: PHICH duration ; PR: PHICH resource type
DPX CID A fc freq-offset RXPWR C nRB P PR CrystalCorrectionFactor
FDD 389 2 813.5M 1.44k -17.8 N 75 N one 1.0000017680583468405
FDD 85 2 813.5M 1.44k -19.7 N 75 N one 1.0000017659056894548

```

Slika 4.3. *CellSearch* naredba i rezultati mjerenja (statički)

Na slici 4.3. prikazan je ispis programa nakon unosa naredbe za pretragu ćelija (statički). Nakon otvaranja direktorija unutar kojeg je instaliran program (*cd LTE-Cell-Scanner*) unosi se naredba za pretragu ćelija na frekvenciji 813.5 MHz uz postavljanje vrijednosti dobitka antene na 28.0 dBi (*./src/CellSearch --freq-start 813500000 -g 28.0*). Ispis programa dao je sljedeće:

- detektirane su LTE ćelije s ID-em 389 i 85 na frekvenciji nosioca od 813.5 MHz (ID ćelije je identifikator ćelije unutar fizičkog sloja LTE mreže);
- svaka ćelija posjeduje dvije odašiljačke antene i frekvencijski pomak između ćelije i RTL-SDR uređaja iznosi 1.44 kHz;
- *RX power level* vrijednost (objašnjena dalje u radu) za ćeliju 389 iznosi -17.8 dB, dok *RX power level* vrijednost ćelije 85 iznosi -19.7 dB; obje ćelije imaju normalan ciklički prefiks;
- obje ćelije okupiraju po 75 RB što kazuje da širina kanala iznosi 15 MHz, PHICH ima normalno trajanje i tip resursa je jedan.

LTE-Tracker je program otvorenog koda koji kontinuirano pretražuje LTE ćelije na određenoj frekvenciji u stvarnom vremenu i mjeri vrijednosti odnosa SNR s ulaza odašiljačke antene. Nakon početne kalibracije frekvencija, program ulazi u prozor unutar kojeg se pojavljuje

lista, osvježavana u stvarnom vremenu, unutar koje se nalaze sve detektirane ćelije. Kako prijemnik RTL-SDR, mijenja lokaciju (vožnja automobilom), tj. ulazi u područja pokrivanja drugih ćelija, tako se nove ćelije pojavljuju, odnosno uklanjaju s liste. Za sve ćelije program prikazuje vremenski pomak, SNR vrijednost svih ulaza s odašiljačke antene i SNR vrijednost sinkronizacijskog kanala.

```
LTE-Tracker www.evrytania.com; 1.0 to 1.1.0: An enhanced LTE Cell Scanner/tracker. Xianjun Jiao (putaoshu@msn.com).
FDD Cell ID 389][TO: 1030.3][Health:100]
P0 -0.3 dB SNR
P1 -1.4 dB SNR
S 2.3 dB SNR
FDD Cell ID 85][TO: 128.3][Health:100]
P0 -1.5 dB SNR
P1 -1.3 dB SNR
S 0.7 dB SNR
FDD Cell ID 74][TO: 17082.9][Health:100]
P0 -4.7 dB SNR
P1 -6.9 dB SNR
S -4.9 dB SNR
FDD Cell ID 84][TO: 128.1][Health:100]
P0 -14.8 dB SNR
P1 -12.7 dB SNR
S -9.0 dB SNR
```

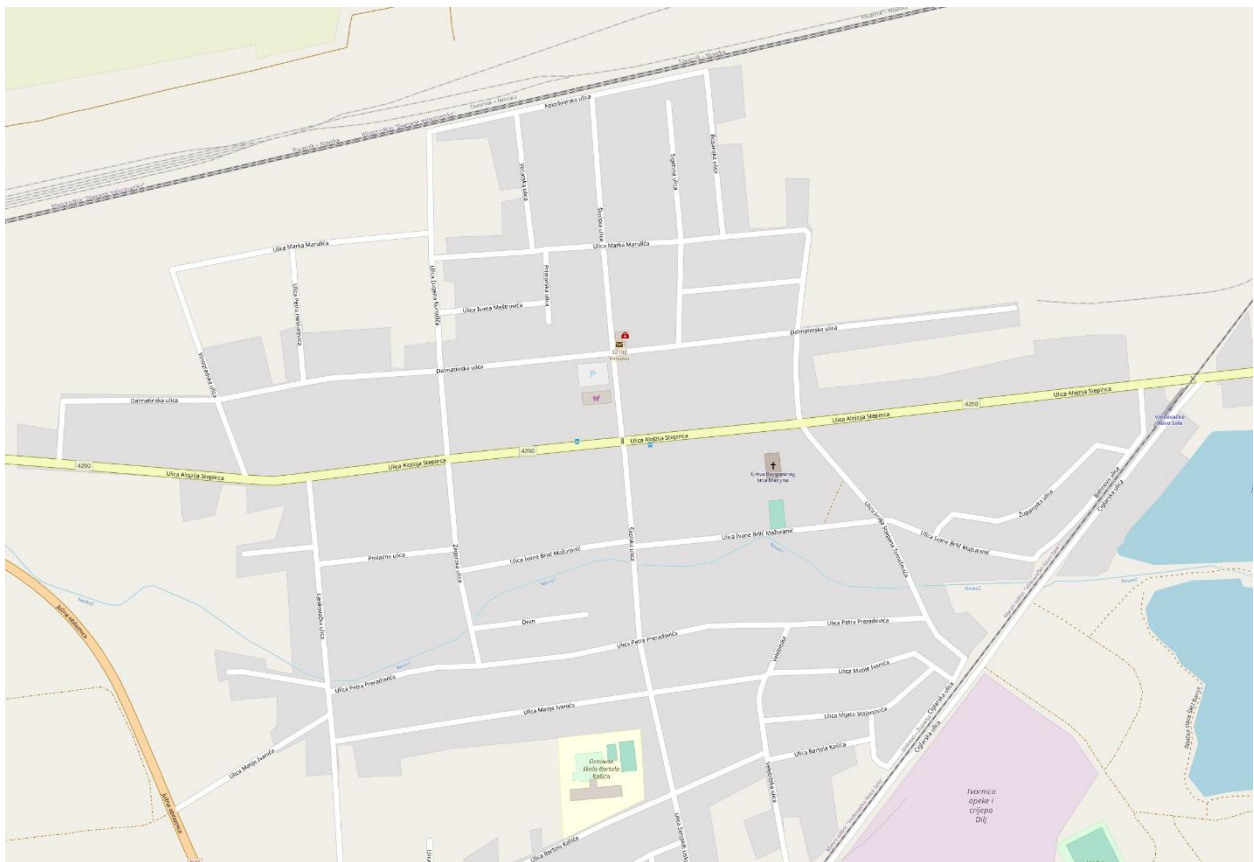
Slika 4.4. Rezultati mjerenja *LTE-Tracker* naredbe (statički)

Pokretanjem programa *LTE-Tracker* s naredbom `.src/LTE-Tracker -f 813500000 -g 28.0` pokreće se pretraživanje LTE ćelija na frekvenciji od 813.5 MHz, uz postavljenu vrijednost dobitka prijemne antene od 28.0 dBi. Program će prikazati popis ćelija koje se trenutno prate, uz dinamičku promjenu vrijednosti SNR-a s ulaza odašiljačke antene i sinkronizacijskog kanala. Kako se UE kreće prostorom tako se pojavljuju nove detektirane ćelije, dok se neke uklanjaju iz liste pronađenih, ovisno o rezultatima mjerenja. U gornjem prikazu najbolju vrijednost SNR-a daje ćelija 389 jer su njezine vrijednosti najveće. Pozitivna vrijednost SNR omjera ukazuje na to da je snaga signala veća od snage šuma. Vrijednosti SNR-a izmjerene s ulaza odašiljačke antena variraju s vremenom.

4.2. Mjerenje LTE800 signala

Cilj praktičnog dijela diplomskog rada bio je RTL-SDR-om i LTE-Cell-Scanner alatima izmjeriti LTE800 signal (B20) za vrijeme vožnje u automobilu i grafički prikazati dobivene rezultate.

Uz pomoć OpenStreetMap web-stranice [28] pribavljeni su potrebni kartografski podaci. Na slici 4.5. prikazana je karta područja na kojem je provedeno mjerenje. Raspon geografske širine prikazan na karti je $[45^{\circ} 17' 18.16'' - 45^{\circ} 17' 46.10'']$, dok je raspon geografske dužine u intervalu $[18^{\circ} 45' 23'' - 18^{\circ} 46' 59.77'']$.

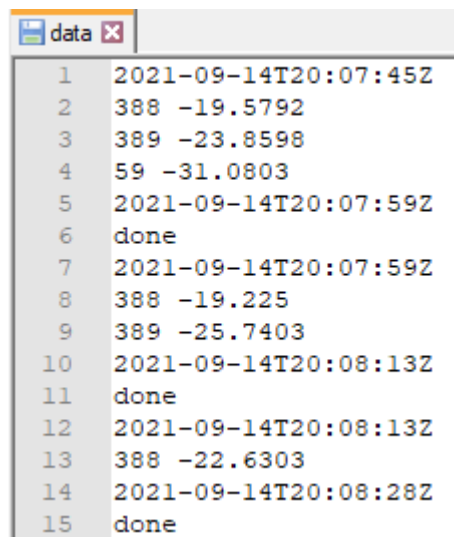


Slika 4.5. Kartografski prikaz područja mjerenja

Mjerenja su izvršena na sljedeći način. Odabrana je ruta kretanja prilikom koje će se mjeriti LTE signal uz pomoć RTL-SDR uređaja. Mjerenja se ponavljaju 2 puta, prvi put za mjerenje identifikatora ćelije i relativnog iznosa snage, a drugi put za mjerenje SNR-a s ulaza odašiljačke antene.

Prvim obilaskom rute pretraživane su ćelije i mjereno je iznos relativne snage s odašiljača. U nastavku slijede koraci prvog mjerenja.

RTL-SDR uređaj se priključuje na prijenosno računalo. Pokreće se Ubuntu 20.04 OS. Nakon što se otvori terminal unosi se naredba za otvaranje datoteke unutar koje je instaliran LTE-Cell-Scanner alat. Unosom naredbe za pozivanje izvođenja *bash* skripte (*./scan.sh*) pokreće se *CellSearch* alat (naredba *./src/CellSearch -freq-start 813500000 -g 28.0*) koji vrši mjerenje LTE signala u silaznoj vezi na frekvenciji 813.5 MHz tijekom vožnje kroz rutu te svakom izvršenom mjerenju pridodaje vremensku oznaku (eng. *timestamp*). Po završetku mjerenja, pritiskom kombinacije tipki Ctrl + c koje zaustavljaju izvođenje skripte, odnosno mjerenja. Uz pomoć napisanog koda u *filter.cpp* izdvajaju se traženi podaci („CellID“ i „RX power level“) koji se upisuju u tekstualnu datoteku *data* sve dok se ne zaustavi mjerenje (slika 4.6.). *Python* skripta *common.py* sadrži funkcije za parsiranje vremena u oblik koji je potreban, čitanje izmjerenih SNR vrijednosti i čitanje GPS podataka dobivenih od *GPS Logger* aplikacije.



```
data X
1 2021-09-14T20:07:45Z
2 388 -19.5792
3 389 -23.8598
4 59 -31.0803
5 2021-09-14T20:07:59Z
6 done
7 2021-09-14T20:07:59Z
8 388 -19.225
9 389 -25.7403
10 2021-09-14T20:08:13Z
11 done
12 2021-09-14T20:08:13Z
13 388 -22.6303
14 2021-09-14T20:08:28Z
15 done
```

Slika 4.6. Prikaz detektiranih ćelija i pripadnih izmjerenih vrijednosti relativne snage signala zapisanih u tekstualnu datoteku *data*

Kada se pokreće *CellSearch* alat, istovremeno se pali i *GPS Logger*, mobilna aplikacija koja je dostupna na *GooglePlayStore*-u. Po završetku mjerenja *CellSearch*-a, zaustavlja se praćenje *GPS Logger*-a koji formira *.gpx* datoteku unutar koje se nalazi niz geografskih širina i dužina te vremenskih oznaka koje označuju u kojem vremenskom trenutku je RTL-SDR bio na danoj geografskoj širini i dužini.

Unosom naredbe `python3 plot.py imeGPSdatoteke.gpx data` pokreće se *Python* skripta `plot.py` koja kao argumente prima tekstualnu datoteku `data` i `.gpx` datoteku koju generira *GPS Logger* mobilna aplikacija. Na kartografskom prikazu se crtaju točke na kojima je mjerenje izvršeno, na način da se za svaku točku uzima srednja pozicija geografske širine i dužine tijekom kretanja automobilom u približno 10 sekundi koliko je potrebno da se *CellSearch* naredba izvede (tijekom mjerenja, nakon naredbe za pozivanje *bash* skripte, u terminalu se ispisuju poruke „Počinjem mjerenje“ i „Mjerenje završeno“ ovisno o statusu).

Svaka detektirana točka obojana je sukladno s vrijednosti *RX power level* koja je izmjerena. *RX power level* zapravo predstavlja relativan iznos izmjerene snage u određenoj mjernoj točki izražen u dB. Prema podacima koji su pribavljeni putem *GPS Logger* aplikacije, prosječna vrijednost brzine kretanja automobila tijekom *CellSearch* mjerenja iznosila je 17.2 km/h, dok je maksimalna brzina koja je ostvarena iznosila 35 km/h.

Drugim obilaskom iste rute mjeren je odnos signala i šuma s ulaza odašiljačke antene. U nastavku slijede koraci drugog mjerenja.

Nakon pokretanja terminala otvara se direktorij unutar kojeg je instaliran *LTE-Cell-Scanner* alat. U terminal se unosi naredba `LTE-Tracker -f 813500000 -g 28.0` kojom se započinje bilježenje vrijednosti SNR-a s ulaza odašiljačke antene, a samim time i mjerenje. Modifikacijom postojećeg koda dobivena mjerenja su se zapisivala svake sekunde. Rezultati mjerenja zapisuju su u tekstualnu datoteku `snr_log` (SI.4.7.), sve dok se ne prekine proces mjerenja na način da se prvo stisne tipka `q`, a potom kombinacija tipki `Ctrl + c`. Paralelno s izvođenjem *LTE-Tracker* naredbe, pokreće se *GPS Logger* aplikacija koja formira `.gpx` datoteku u koju se nalazi niz geografskih širina i dužina s pripadnim vremenskim oznakama. Unosom naredbe `python3 plotsnr.py imeGPSdatoteke.gpx snr_log` u terminal pokreće se *Python* skripta `plot.snr` koja na kartografskom prikazu iscrtava vrijednosti SNR-a s ulaza odašiljačke antene.

```

snr_log x
1 Cell 388 1632425204
2 Cell 388 1632425205
3 P0 11.6
4 P1 11.4
5 S 9.2
6 Cell 388 1632425206
7 P0 10.5
8 P1 10.8
9 S 9.0
10 Cell 388 1632425207
11 P0 10.1
12 P1 10.3
13 S 9.1
14 Cell 388 1632425208
15 P0 10.4
16 P1 10.9
17 S 9.2

```

Slika 4.7. Prikaz izmjerenih vrijednosti SNR-a s ulaza odašiljačke antene i sinkronizacijskog kanala za svaku od detektiranih ćelija zapisanih u tekstualnu datoteku *snr_log*

Mrežni operateri, za LTE800 sustav, najčešće koriste 3-sektorske antene koje se nalaze na istom antenskom stupu. Za svaki sektor odašilje se u širini horizontalnog kuta od 60°, s horizontalnom polarizacijom, dok su antenski nizovi povezani za pojedini antenski ulaz zakrenuti na +45° i -45°, tj. međusobno su pod pravim su kutom. Svaki sektor definira ćeliju sa svojim identifikatorom ćelije.

Izmjerene vrijednosti SNR-a će se kategorizirati prema tablici 4.2. [29]

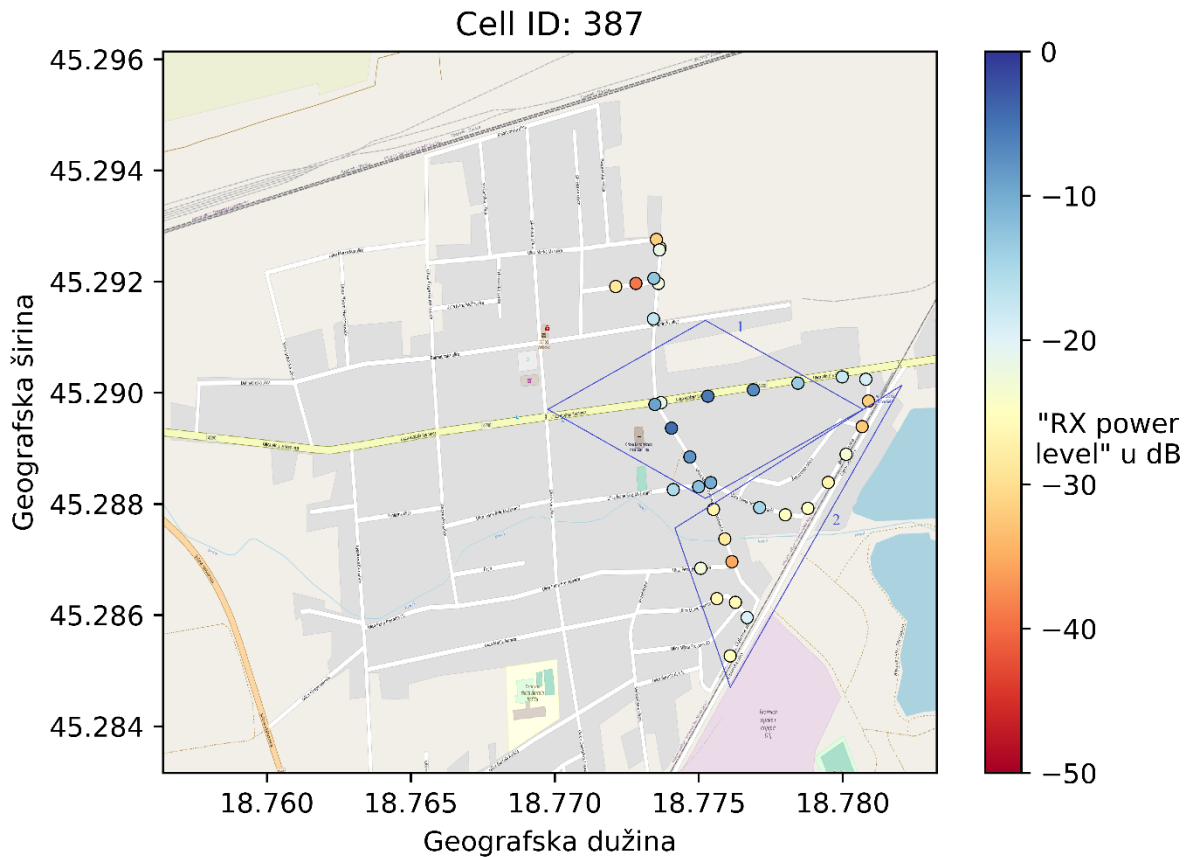
Tablica 4.2. Prikaz RF uvjeta ovisno o vrijednosti SNR-a u [dB]

RF uvjeti	SNR [dB]
Odlično	≥ 20
Dobro	od 13 do 20
Sredina ćelije	od 0 do 13
Rub ćelije	≥ 0

4.2.1. Rezultati mjerenja

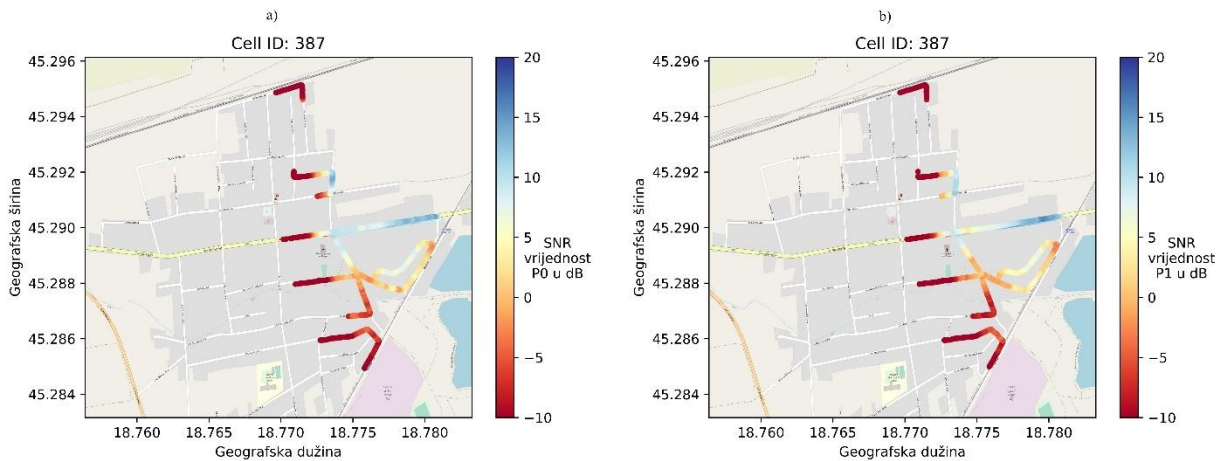
Na slici 4.8. nalazi se prikaz izmjerenih vrijednosti relativne snage za ćeliju s identifikatorom 387 na kartografskom prikazu. Na x-osi prikaza nalazi se geografska dužina, dok se na y-osi prikaza nalazi geografska širina. Desno od kartografskog prikaza dana je skala koja

prikazuje relativnu vrijednost snage zaprimljenu na prijemniku (od 0 do -50 dB) te je prikladno obojana.



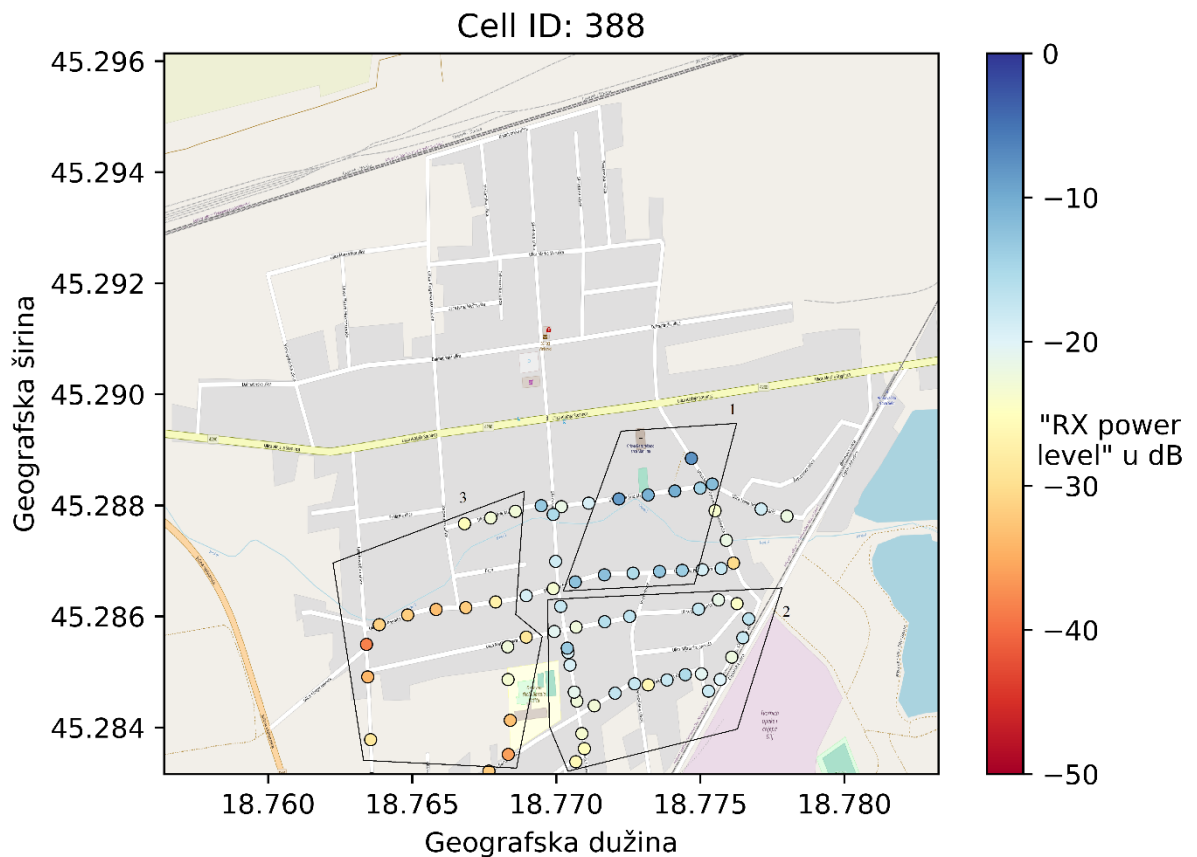
Slika 4.8. Rezultati mjerenja „Rx power level“ za ćeliju ID: 387

Točke s najboljom izmjerenom vrijednošću „Rx power level“ mjere relativnu snagu s odašiljača u iznosu od -5 dB do -10 dB (područje označeno s brojem 1 na slici 4.8.) što upućuje na to da je u tim točkama pokrivanja ćelije izmjerena izuzetno kvalitetna relativna snaga signala. Na prikazu se vidi da kretanjem prema istoku, u vidu nekoliko stotina metara od točke s najvećom izmjerenom vrijednosti snage, vrijednost izmjerene snage prvo pada na -10 dB, a potom i na -20 dB što upućuje na smanjenje relativne izmjerene snage, odnosno kvalitete signala. Sjeveroistočni i jugoistočni dijelovi rute na karti sadrže točke na kojima su očitane vrijednosti relativne snage ispod -20 dB (oznaka 2 na slici 4.8.) što ukazuje da je signal na tim točkama lošiji u odnosu na područje označeno brojem 1.



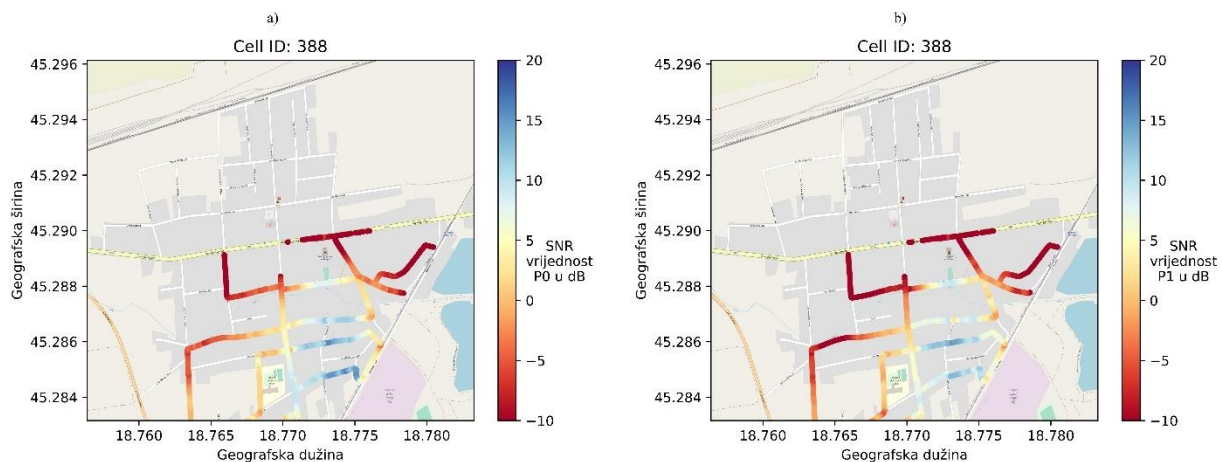
Slika 4.9. Rezultati mjerenja SNR-a s za ćeliju s ID: 387 a) na ulazu 0 antene; b) na ulazu 1 antene

Kao što prikazuje slika 4.9. najbolji rezultati izmjerene SNR-a za ulaze odašiljačke antene 0 i 1 odgovaraju područjima gdje su izmjerene najveće vrijednosti „RX power level“. U područjima gdje je „RX power level“ bio u rasponu od 0 do -20 dB, vrijednosti SNR-a za oba ulaza antene pripadaju odličnim i dobrim RF uvjetima (područje 1 na slici 4.8.). Dobivene vrijednosti SNR-a su pozitivne što upućuje na to da je na tom području snaga signala veća od snage šuma, stoga je LTE signal koji dopire u ta područja jači od detektiranog šuma. U područjima gdje je izmjerena relativna snaga u rasponu od -20 dB do -30 dB (područje 2 na slici 4.8), vrijednosti SNR-a pripadaju sredini ćelije, a kako se prilikom mjerenja uređaj kretao prema područjima manjih vrijednosti izmjerene snage, uređaj se približavao rubu pokrivanja ćelije. Na mjestima gdje vrijednost SNR-a pada ispod nule UE traži BS koje mu nude bolje komunikacijske uvjete i dolazi do predaje (eng. *handover*) UE-a drugoj BS.



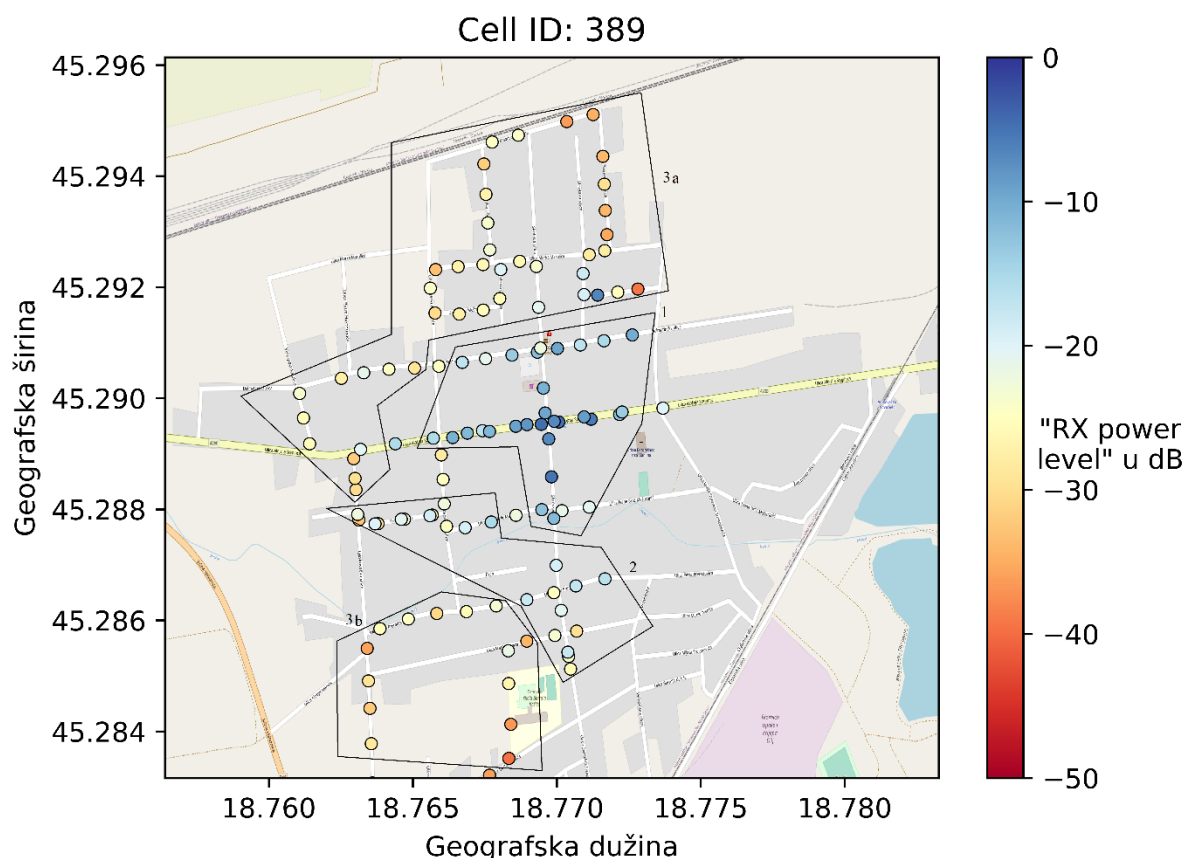
Slika 4.10. Rezultati mjerenja „Rx power level“ za ćeliju ID: 388

Na slici 4.10. nalazi se prikaz očitanih vrijednosti relativne snage za ćeliju s identifikatorom 388 na kartografskom prikazu. Kretanjem kroz zadanu rutu, detektirano je više točaka za ćeliju s identifikatorom 388 no što ih je detektirano za ćeliju s identifikatorom 387 jer je rutom voženo kroz područje koje je u većoj mjeri pokriveno od strane ćelije 388, no 387. U neposrednoj blizini BS (područje 1 na slici 4.10.), vrijednosti „Rx power level“ pripadaju intervalu od 0 do -10 dB što upućuje da je u tim točkama izmjerena najveća relativna snaga signala, stoga je signal u ovom području najkvalitetniji. Kretanjem prema jugoistoku (područje 2 na slici 4.10.) i jugozapadu (područje 3 na slici 4.10.) izmjerene vrijednosti „Rx power level“ postepeno su se smanjivale. Na području 2 se usprkos povećanoj udaljenosti od BS mjeri zadovoljavajuća razina „Rx power level“ pa se zaključuje da je u tom području signal i dalje kvalitetan. Područje 3 sadrži točke koje na kojima je očitana slabija relativna snaga signala te je u tim točkama kvaliteta signala lošija usporedno s područjima 1 i 2. Iz rezultirajuće slike vidljivo je da je izmjerena relativna snaga zadovoljavajuća u većini točaka, stoga je kvaliteta signala zadovoljavajuća za veći dio rute kojeg obuhvaća ćelija s identifikatorom 388 unutar koje su točke detektirane.



Slika 4.11. Rezultati mjerenja SNR-a s za ćeliju s ID: 388 a) na ulazu 0 antene; b) na ulazu 1 antene

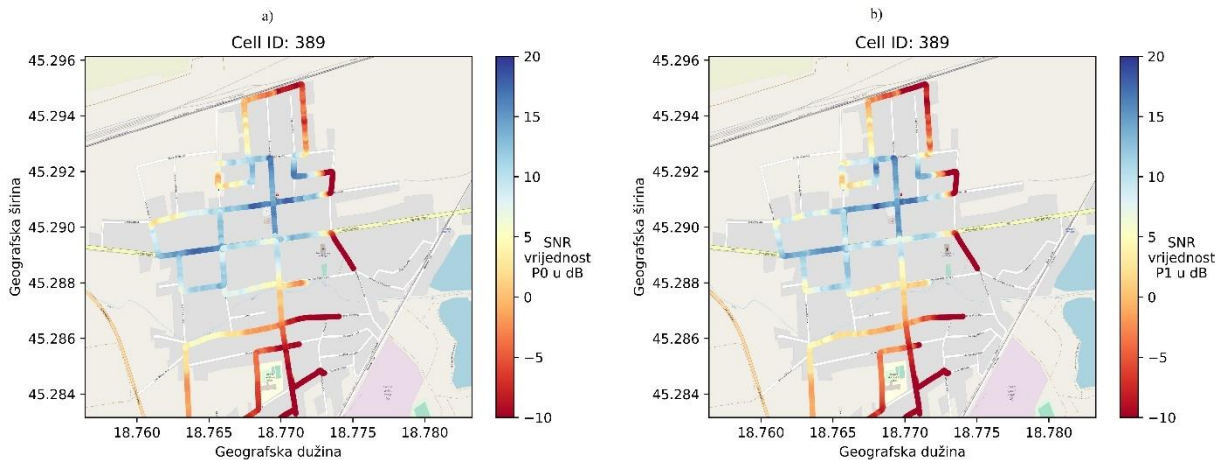
Na slici 4.11. prikazani su rezultati mjerenja SNR-a s ulaza odašiljačke antene 0 i 1 za ćeliju s identifikatorom 388. Vrijednosti SNR-a prate najveće izmjerene vrijednosti „RX power level“, pa tako u točkama gdje je signal najjači vrijednosti SNR-a s ulaza odašiljačke antene pripadaju u RF uvjete odličnog i dobrog signala (područje 1 i dijelovi područja 2 na slici 4.10.). Kretanjem kroz dijelove rute u kojima je izmjerena relativna snaga s odašiljača nešto manja (područje 3 sa slike 4.10.), vrijednosti SNR-a za oba antenska ulaza spadaju u RF uvjete koji definiraju sredinu, a potom rub pokrivanja ćelije. Usporedno s slikom 4.9., na slici 4.11. je vidljivo da je kroz veći dio rute kojom se kretalo prilikom mjerenja, SNR vrijednost za oba ulaza odašiljačke antene ima pozitivnu vrijednost što upućuje da je ćelija s identifikatorom 388 u većoj mjeri adekvatnije pokrila rutu kretanja no što je ćelija s identifikatorom 387.



Slika 4.12. Rezultati mjerenja „RX power level“ za ćeliju ID: 389

Na slici 4.12. nalazi se prikaz izmjerenih vrijednosti relativne snage za ćeliju s identifikatorom 389 na kartografskom prikazu. Mjerenjem je detektiran najveći broj točki za ćeliju s identifikatorom 389, stoga se može zaključiti da se prilikom mjerenja LTE signala zadanom rutom kretalo područjem kojeg u najvećoj mjeri pokriva i poslužuje ćelija s identifikatorom 389. Na samome središtu slike, u neposrednoj blizini BS (područje 1 na slici 4.12.), da se uočiti najveći broj točaka u kojima je izmjerena vrijednost „RX power level“ broj iz intervala od 0 do -10 dB, što upućuje na to da je snaga signala u ovome području najveća, a signal najkvalitetniji. Kretanje vozila prema sjeveru i sjeverozapadu (područje 3a na slici 4.12.), jugu (područje 2 na slici 4.12.) i jugozapadu (područje 3b na slici 4.12.) kao rezultat imat će postepeno smanjenje izmjerenih relativne vrijednosti snage s odašiljača kako se vozilo udaljavalo od same BS. Područje 2 obuhvaća točke u kojima je vrijednost izmjerene relativne snage s odašiljača zadovoljavajuća, područje 3a većinski sadrži točke u kojima je izmjerena relativna snaga signala manja od -20 dB što upućuje na nešto lošiju kvalitetu signala u tom području. Konačno, u području 3b, izmjerene vrijednosti

relativne snage signala padaju i ispod -30 dB, što upućuje na lošu kvalitetu signala, tj. područje diskonekcije.



Slika 4.13. Rezultati mjerenja SNR-a s za ćeliju s ID: 389 a) na ulazu 0 antene; b) na ulazu 1 antene

Izmjerene vrijednosti SNR-a s ulaza odašiljačke antene, za ćeliju s identifikatorom 389, prikazane su na slici 4.13. Vrijednosti SNR-a, za oba antenska ulaza, u većem dijelu kretanja rutom su pozitivni brojevi veći od 0, pa se da zaključiti da je kvaliteta signala zadovoljavajuća za veći dio rute. Rezultati dobiveni na središtu prikaza (područje 1 na slici 4.12.), u neposrednoj blizini BS, pripadaju odličnim i dobrim RF uvjetima, dok se kretanjem automobila prema sjeveru (područje 3a na slici 4.12.) i jugu vrijednosti SNR-a za oba antenska ulaza postepeno smanjuju i ulaze u RF uvjete sredine ćelije (područje 2 na slici 4.12.) i ruba ćelija (područje 3b na slici 4.12.), što upućuje na to da je u tim točkama snaga signala opada i da se javlja povećanje snage šuma što za rezultat ima smanjenje kvalitete signala u tim točkama.

Razlog negativnih izmjerenih vrijednosti SNR-a (u dijelovima rute koje pokrivaju ćelije 387, 388, 389) leži u tome što su se vrijednosti s ulaza odašiljačke antene prikupljale u svim područjima gdje je ćelija bila detektirana i praćena. Pa su tako na slici prikazane i one vrijednosti SNR-a koje spadaju u rub ćelije ili područje diskonekcije ($\text{SNR} < 0 \text{ dB}$).

Na mjestima gdje je izmjerena relativna snaga manja od -30 dB, a iznos SNR-a s oba ulaza odašiljačke antene $< 0 \text{ dB}$, UE će pokušati ostvariti konekciju s BS koja mu nudi bolje komunikacijske uvjete te će doći do predaje (eng. *handover*).

Na količinu očitavanja točaka gdje je kvaliteta i snaga signala odlična ili dobra utjecat će sama udaljenost između bazne stanice pripadajuće ćelije i mjernog uređaja. Na kvalitetu i snagu

zaprimljenog signala utjecaj imaju i gubici propagacije u koje spadaju refleksija, difrakcija, refrakcija, disperzija i apsorpcija radio vala. Ukoliko ne postoji direktna linija vidljivosti (eng. LOS - *Line of Sight*) između odašiljača i prijemnika, val će na prijemnik doći drugom putanjom povećavajući tako mogućnost greške. Također, kvalitetu signala može kvariti i interferencija radio valova kao i fading uslijed višestaznog prostiranja radio vala ili nekakvih prepreka na trasi radio vala. Efekti višestaznog prostiranja mogu uzrokovati gušenje i izobličenje signala ili postojanje signala u sjeni kada dođe do difrakcije ili kada je signal reflektiran od neke prepreke. Nadalje, na kvalitetu signala utjecat će i opterećenje sustava. Visoko opterećeni sustavi će unositi više šuma i na taj način kvariti kvalitetu signala unutar mjernog područja. Konačno, na rezultat mjerenja utjecat će i kvaliteta i performanse samog mjernog uređaja odnosno sklopovlja (RTL-SDR) i pripadajuće antene.

5. ZAKLJUČAK

Najrašireniji 4G standard u svijetu, LTE mobilni komunikacijski sustav, omogućuje širokopojasnu komunikaciju za mobilne uređaje i podatkovne terminale. LTE je uveden 2009. godine u izdanju 8 od strane 3GPP grupe. LTE standardom povećani su kapacitet i brzina mobilnih mreža, uz ostvarenje brzina prijenosa podataka od više stotina MB/s. U odnosu na prethodne generacije, LTE je u potpunosti zasnovan na IP protokolu, pružajući tako prednosti u sigurnosnom aspektu u odnosu na prethodne generacije.

Zračno sučelje LTE mreža zasniva se na OFDM tehnici. LTE koristi OFDMA u silaznoj vezi, dok za uzlaznu vezu koristi SC-OFDMA. OFDMA u silaznoj vezi omogućio je odašiljanje podataka s BS prema više korisnika s većim podatkovnim brzinama u odnosu na 3G sustave, s poboljšanom spektralnom efikasnosti. SC-FDMA u uzlaznoj vezi smanjila je omjer vršne i srednje snage, a time i potrebnu snagu odašiljanja za korisničke terminale. MIMO antenski sustavi, zajedno s OFDM, omogućili su veći odnos signal-šum na prijemniku, osiguravajući tako poboljšanu pokrivenost i propusnost bežične mreže, osobito u gustim urbanim područjima. LTE podržava efikasne modulacijske tehnike, poput QAM-a. Doradom LTE-a, u vidu LTE-Advanced i LTE-Advanced Pro, QAM konfiguracija podržava više stanja moduliranog signala što dovodi do većih podatkovnih brzina. LTE omogućuje smanjenje kašnjenja, skalabilan kapacitet i pojasne širine te kompatibilnost sa postojećim GSM-om i UMTS-om.

U okviru ovog rada provedena su mjerenja LTE signala primjenom LTE skenera izrađenom u programski definiranom radio uređaju RTL-SDR. Mjerenjem LTE signala, tijekom vožnje kroz zadanu rutu, detektirane su ćelije s pripadajućim identifikatorima te je mjerena relativna snaga s odašiljača. Iznos izmjerene relativne snage s odašiljača ovisi o udaljenosti od same BS, gubicima propagacije i kvaliteti samog RTL-SDR uređaja. Provedeno je i mjerenje vrijednosti SNR-a s ulaza odašiljačke antene, kroz istu rutu kao i mjerenje relativne snage, te su rezultati pokazali da vrijednosti SNR-a prate izmjerene vrijednosti relativne snage. Ovisno o vrijednostima SNR-a s ulaza odašiljačke antene, RF uvjeti na prikazanom mjernom području variraju od odličnih, dobrih, sredina ćelije i rub ćelije. U točkama gdje je izmjerena relativna snaga s odašiljača poprilično mala, a vrijednosti SNR-a negativne ili blizu nule, UE će tražiti konekciju s onom BS koja nudi bolju mogućnost komunikacije i tada dolazi do predaje poziva drugoj BS.

Mjerenja LTE signala prilikom vožnje automobilom (eng. *drive test*) mrežni operateri provode kako bi detektirali i ispravili potencijalne probleme u mreži i na taj način poboljšali performanse same LTE mreže. Mrežni operateri koriste sofisticirane mjerne uređaje za potrebe

mjerenja, umanjujući tako greške koje se mogu javiti prilikom mjerenja. Provođenje ovih mjerenja daje uvid u performanse mreže koju je postavio operater te usporedbu s performansama mreže konkurentnog operatera. Parametri koji se mjere sofisticiranijim mjernim uređajima su: indikator snage zaprimljenog signala (eng. RSSI – *Received Signal Strength Indicator*), odnos signal-šum, zaprimljena snaga referentnog signala (eng. RSRP – *Reference Signal Received Strength*), zaprimljena kvaliteta referentnog signala (eng. RSRQ – *Reference Signal Received Quality*), snaga odašiljanja između BS i UE u silaznoj i uzlaznoj vezi te propusnost između BS i UE u silaznoj i uzlaznoj vezi u svrhu testiranja performansi MIMO antena. Zbog ograničenja mjernog uređaja korištenog u diplomskom radu, izmjereni su samo neki od navedenih parametara.

6. LITERATURA

- [1] Third Generation Partnership Project (3GPP), dostupno na poveznici: <http://http.3gpp.org> [pristupljeno: 12.04.2021.]
- [2] C. Cox, "An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and Mobile Communications", John Wiley and Sons Ltd., 2012.
- [3] S. Sesia, I. Toufik, M. Baker, „LTE – The UMTS Long Term Evolution“, John Wiley and Sons Ltd., 2011.
- [4] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, „4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband“, Academic Press, 2014.
- [5] S. Wandre, „EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution“, Illinois Institute of Technology, 2000.
- [6] M. Qadeer, M. Humran Khan, „Aspen Analysis for Beyond 3G Wireless Networks“, Blekinge Institute of Technology, lipanj 2009.
- [7] B. Walke, R. Seidenberg, M. P. Althoff, „UMTS: The Fundamentals“, John Wiley and Sons Ltd., 2003.
- [8] T. Blajić, „LTE- nova tehnologija za mobilni širokopojasni pristup“, Ericsson Nikola Tesla d.d., Zagreb, Hrvatska, 2010.
- [9] Ericsson d.d., „Global mobile traffic, voice and data“, dostupno na <https://news.cision.com/ericsson/i/figure-15--global-mobile-traffic--voice-and-data-2010-2017,c7900636> [pristupljeno: 17.05.2021.]
- [10] Tutorialspoint, „LTE Network Architecture“, dostupno na https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm [pristupljeno: 07.05.2021.]
- [11] CableFree, Wireless Technology, „4G LTE, LTE UE Category Class Definitions“, dostupno na: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-ue-category-class-definitions/> [pristupljeno: 07.05.2021.]
- [12] A. Gnosh, J. Zhang, J.G. Andrews, R. Muhamed, „Fundamentals of LTE“, Prentice Hall, Pearson Education Inc., 2010.
- [13] R. Gallager, „Course materials for 6.450 Principles of Digital Communications 1“, Massachusetts Institute of Technology, MIT OpenCourseWare, 2006., dostupno na: <http://ocw.mit.edu/> [pristupljeno: 18.06.2021.]
- [14] M. Lopes Ferreira, A. Barahimi, J. Canas Ferreira, „Dynamically Reconfigurable LTE-compliant OFDM Modulator for Downlink Transmission“, 2016 Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), 2016., pp. 1-6, doi: 10.1109/DCIS.2016.7845359

- [15] Tulsiramji Gaikwad Patil College of Engineering and Technology, Nagpur, Department of Electronics and Communication Engineering, Mobile Communications, dostupno na: <http://www.tgpct.com/ECE-NOTES/8/MOBILE%20COMMUNICATION.pdf>
[pristupljeno: 18.06.2021.]
- [16] T. Girici, C. Zhu, J.R. Agre, A. Ephremides, „Proportional Fair Scheduling Algorithm in OFDMA-Based Wireless Systems with QoS Constraints“, Journal of Communications and Networks, pp. 30-42, Vol.12, veljača 2010., dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/252063676_Proportional_Fair_Scheduling_Algorithm_in_OFDMA-Based_Wireless_Systems_with_QoS_Constraints [pristupljeno: 18.06.2021.]
- [17] D. Petrec, „Unaprjeđenje modulacijskih postupaka i prijenosa signala za povećanje brzine mobilnih mreža 4. generacije“, Završni rad, Fakultet prometnih znanosti, Sveučilište u Zagrebu, 2017., dostupno na: <https://repositorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz:1029>
[pristupljeno: 04.07.2021.]
- [18] Telesystem Innovations Inc., „LTE In a Nutshell: The Physical Layer“, 2010., dostupno na: <https://frankrayal.com/wp-content/uploads/2017/02/LTE-in-a-Nutshell-Physical-Layer.pdf> [pristupljeno: 14.07.2021.]
- [19] Agilent Technologies, M. Rumney, „LTE and the Evolution to 4G Wireless“, Prvo izdanje, John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [20] J.S. Roy, „Multiple-Antenna Techniques in Wireless Communication-Technical Aspects“, International Journal Of Engineering Research And Technology (IJERT) ICIDB – 2015. (Volume 4 – Issue 01), dostupno na: <https://www.ijert.org/multiple-antenna-techniques-in-wireless-communication-technical-aspects> [pristupljeno: 11.08.2021.]
- [21] Wireless Innovation Forum, „What is Software Defined Radio“, dostupno na: <https://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.pdf>
[pristupljeno: 03.09.2021.]
- [22] RTL-SDR, „About RTL-SDR“, dostupno na: <https://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>
[pristupljeno: 03.09.2021.]
- [23] European Communications Office (ECO), „The Licensing of Mobile Bands in CEPT“, ECO Report 03, 27.04.2021., dostupno na: <https://docdb.cept.org/download/1903>
[pristupljeno: 11.09.2021.]
- [24] Halberd Bastion RF Consultancy, HB Radiofrequency, B20 (800 MHz), dostupno na: <https://halberdbastion.com/technology/cellular/4g-lte/lte-frequency-bands/b20-800-mhz>
[pristupljeno 11.09.2021.]

- [25] LTE-Cell-Scanner, J. Xianjun, dostupno na: <https://github.com/JiaoXianjun/LTE-Cell-Scanner> [pristupljeno 02.05.2021.]
- [26] Ubuntu operacijski sustav, dostupno na: <https://ubuntu.com/download> [pristupljeno: 02.05.2021.]
- [27] M.R. Sriharsha, S. Dama, K. Kuchi, „A complete cell search and synchronization in LTE“, EURASIP Journal On Wireless Communications and Networking, 101 (2017), 2017., dostupno na: <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13638-017-0886-3> [pristupljeno: 18.09.2021.]
- [28] Open Street Map, dostupno na: <https://www.openstreetmap.org> [pristupljeno:17.08.2021.]
- [29] Digi, Understanding LTE Signal Strength Values, Support, Knowledge Base, dostupno na: <https://www.digi.com/support/knowledge-base/understanding-lte-signal-strength-values> [pristupljeno: 18.09.2021.]

SAŽETAK

Najrašireniji 4G standard, znan kao LTE, zadovoljio je rastuće korisničke potrebe i zahtjeve. Ovaj rad se bavi pregledom prethodnih generacija mobilnih mreža, arhitekturom LTE mreže, zračnim sučeljem, tehnikama višestrukog pristupa i programski definiranim radijem. Opisane su tehnologije koje omogućavaju veliku brzinu prijenosa podataka, OFDMA, SC-FDMA, višestruki MIMO antenski sustavi, ponovno korištenje frekvencija, estimacija kanala itd. Praktični dio rada bavi se mjerenjem LTE signala u silaznoj vezi za LTE800 sustav primjenom LTE skenera izrađenim u programski definiranom radio uređaju.

Ključne riječi: 4G, LTE, mobilna mreža, programski definiran radio, RTL-SDR, OFDMA, SC-FDMA, MIMO.

LTE SCANNER BASED ON SOFTWARE DEFINED RADIO

ABSTRACT

The most widespread 4G standard, known as LTE, has met the growing user needs and requirements. This paper deals with an overview of previous generations of mobile networks, LTE network architecture, air interface, multiple access techniques and software defined radio. Technologies that enable high speed data transfer, OFDMA, SC-FDMA, multiple MIMO antenna systems, frequency reuse, channel estimation, etc. are described. The practical part of the paper deals with the measurement of LTE signals in downlink for the LTE800 system using LTE scanner made in a software defined radio device.

Keywords: 4G, LTE, mobile network, software defined radio, RTL-SDR, OFDMA, SC-FDMA, MIMO.

PRILOZI

scan.sh

```
#!/bin/bash
timestamp() {
    date +"%Y-%m-%dT%H:%M:%SZ"
}
c++ filter.cpp -o filter
> data
while true; do
    echo "Počinjem mjerenje."
    timestamp >> data
    CellSearch --freq-start 813500000 -g 28.0 > data.tmp
    ./filter data.tmp >> data
    timestamp >> data
    echo "done" >> data
    echo "Mjerenje završeno"
done
```

filter.cpp

```
#include <fstream>
#include <iostream>
#include <string>
#include <sstream>
using namespace std;

string read_n(string line, int n)
{
    istringstream iss(line);
    string out;
    for (int i = 0; i < n; ++i)
        iss >> out;
    return out;
}

int main(int argc, char** argv)
{
    if (argc != 2)
        return EXIT_FAILURE;
    ifstream file(argv[1]);
    if (!file)
        return EXIT_FAILURE;
    string line;
    while (getline(file, line), file)
    {
        if (line.find("Detected a FDD cell!") != line.npos)
        {
            getline(file, line);
            cout << read_n(line, 3) << ' ';
            getline(file, line);
            getline(file, line);
            cout << read_n(line, 4) << '\n';
        }
    }
    file.close();
    return EXIT_SUCCESS;
}
```

common.py

```
from collections import defaultdict
from bs4 import BeautifulSoup
import time

def parse_time(ts, shift=0):
    tm = time.strptime(ts, '%Y-%m-%dT%H:%M:%SZ')
    utm = time.mktime(tm)
    return int(utm) + shift

def read_snr(filename):
    with open(filename, 'r') as f:
        data = f.read()
    cd = data.split('Cell')
    snrd = defaultdict(defaultdict)
    for s in cd[1:]:
        lst = s.split()
        cellid = int(lst[0])
        timestamp = int(lst[1])
        snrd[cellid][timestamp] = lst[2:]
    return snrd

# citanje gps podataka
def read_points(filename):
    with open(filename, 'r') as f:
        data = f.read()

    pos = {}
    Bs_data = BeautifulSoup(data, "xml")
    for tag in Bs_data.find_all('trkpt'):
        utm = parse_time(tag.find('time').string, 60*60*2) # pomakni za dva
sata
        lat = float(tag.get('lat'))
        lon = float(tag.get('lon'))
        pos[utm] = (lat, lon)
    return pos
```

plot.py

```
import numpy
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import sys
from collections import defaultdict
from common import parse_time, read_snr, read_points

# ucitanje mjerenja
def read_data(filename):
    with open(filename, 'r') as f:
        data = f.read().split('done')
        data = [k.split() for k in data]
    return data

# crtanje mjernog podrucja
def plot(data, cellid):
    BBox = (18.75639, 18.78327,
            45.28316, 45.29614)
```

```

lat, lon, pwr = [], [], []
for lt, ln, pw in data:
    lat.append(lt)
    lon.append(ln)
    pwr.append(pw)

ruh_m = plt.imread('map.png')
fig, ax = plt.subplots()
cm = plt.cm.get_cmap('RdYlBu')
sct = ax.scatter(lon, lat, zorder=1, alpha= 1, c=pwr, s=20, cmap=cm,
vmin=0, vmax=-50, edgecolors='black', linewidths=.4)
cbar = fig.colorbar(sct, ax=ax)
cbar.ax.set_ylabel('"RX power\nlevel" u dB', rotation=0)
ax.set_title(f'Cell ID: {cellid}')

plt.xlabel('Geografska duÅ¾ina')
plt.ylabel('Geografska Å¡irina')

# prikazano podrucje
ax.set_xlim(BBox[0],BBox[1])
ax.set_ylim(BBox[2],BBox[3])
ax.imshow(ruh_m, zorder=0, extent = BBox, aspect= 'auto')
plt.savefig(f'output{cellid}.png', dpi = 1000)

if __name__ == "__main__":
    if len(sys.argv) != 3:
        print("bad args")
        sys.exit(1)

    # citanje gps i data podataka
    pos = read_points(sys.argv[1])
    data = read_data(sys.argv[2])

    # prosjecna gps pozicija od mjerenja
    sdata = []
    data = [k for k in data if len(k)>= 2]
    celije = set()
    for begt, *stat, endt in data:
        bt = parse_time(begt)
        et = parse_time(endt)
        alat, alon, np = 0, 0, 0
        for t in range(bt, et + 1):
            if t in pos:
                alat += pos[t][0]
                alon += pos[t][1]
                np += 1

        if np > 0:
            alat /= np
            alon /= np
            sdata.append((alat, alon, stat))

    # mjerenja rasporedim po celijama
    cdata = defaultdict(list)
    for lat, lon, dat in sdata:
        for i in range(0, len(dat), 2):
            celija = int(dat[i])
            level = float(dat[i+1])
            cdata[celija].append((lat, lon, level))
            celije.add(celija)

```

```

for s in celije:
    plot(cdata[s], s)
    print(s)

```

plotsnr.py

```

import sys
import matplotlib.pyplot as plt
from collections import defaultdict
from common import parse_time, read_snr, read_points

# crtanje mjernog podrucja
def plot(data, cellid):
    # odabrano mjerno podrucje
    BBox = (18.75639, 18.78327,
            45.28316, 45.29614)

    lat, lon, pwr = ([],[]), ([],[]), ([],[])
    for (lt, ln), pw in data:
        if pw == []:
            continue

        for i in range(len(pw)):
            if pw[i] == 'P0':
                lat[0].append(lt)
                lon[0].append(ln)
                pwr[0].append(float(pw[i+1]))
            if pw[i] == 'P1':
                lat[1].append(lt)
                lon[1].append(ln)
                pwr[1].append(float(pw[i+1]))

    for i in range(2):
        ruh_m = plt.imread('map.png')
        fig, ax = plt.subplots()
        plt.xlabel('Geografska duÅ¾ina')
        plt.ylabel('Geografska Å¡irina')
        cm = plt.cm.get_cmap('RdYlBu')
        sct = ax.scatter(lon[i], lat[i], zorder=1, alpha= 1, c=pwr[i], s=10,
cmap=cm, vmin=-10, vmax=20)
        cbar = fig.colorbar(sct, ax=ax)
        cbar.ax.set_ylabel(f'SNR\nvrijednost\nP{i} u dB', rotation=0)
        ax.set_title(f'Cell ID: {cellid}')
        # prikazano podrucje
        ax.set_xlim(BBox[0],BBox[1])
        ax.set_ylim(BBox[2],BBox[3])
        ax.imshow(ruh_m, zorder=0, extent = BBox, aspect= 'auto')
        plt.savefig(f'snr_output{cellid}P{i}.png', dpi = 1000)

if __name__ == "__main__":
    if len(sys.argv) != 3:
        print("bad args")
        sys.exit(1)

    # citanje gps podataka i SNR mjerenja
    pos = read_points(sys.argv[1])
    snr = read_snr(sys.argv[2])

    # vezanje gps podataka sa SNR podatcima
    gsnr = defaultdict(list)
    for cellid, v in snr.items():

```

```
for timestamp, val in v.items():
    if timestamp in pos:
        gsnr[cellid].append((pos[timestamp], val))

for cellid, v in gsnr.items():
    plot(v, cellid)
```


ŽIVOTOPIS

Ante Maričić rođen je u Vinkovcima 18. studenog 1996. godine. Pohađao je osnovnu školu „Bartol Kašić“ u Vinkovcima. Upisuje prirodoslovno-matematički smjer u „Gimnaziji Matije Antuna Reljkovića“ u Vinkovcima 2011. godine. Uz školske obaveze aktivno se bavi rukometom. Nakon završetka srednje škole upisuje preddiplomski smjer elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku 2015. godine kojeg završava 2019. godine i time stječe status prvostupnika inženjera elektrotehnike. Iste godine upisuje sveučilišni diplomski studij elektrotehnike, smjer komunikacije i informatika.