

Simulacija LTE mreže na području Borongaja

Franičević, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:825275>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-11**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Ivan Franičević

SIMULACIJA LTE MREŽE NA PODRUČJU BORONGAJA

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT

Zagreb, 24. travnja 2017.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Planiranje telekomunikacijskih mreža**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 4134

Pristupnik: **Ivan Franičević (0135222227)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Simulacija LTE mreže na području Borongaja**

Opis zadatka:

Primjenom programske podrške Cellular expert analizirati postojeće stanje pokrivenosti LTE mreže na području Borongaja, te istražiti parametre pokrivenosti područja uporabom femtoćelija.

Zadatak uručen pristupniku: 28. travnja 2017.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

prof. dr. sc. Zvonko Kavran

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

SIMULACIJA LTE MREŽE NA PODRUČJU BORONGAJA

SIMULATION OF LTE NETWORK AT AREA OF BORONGAJ

Mentor: prof. dr. sc. Zvonko Kavran

Student: Ivan Franičević

JMBAG: 0135222227

Zagreb, rujan 2017.

SIMULACIJA LTE MREŽE NA PODRUČJU BORONGAJA

SAŽETAK

Cilj rada je provesti istraživanje i analizu LTE mreže na području Borongaja koristeći se programskim alatom za planiranje radijskog dijela mreže WiMAP-4G. Prvo se analizira trenutno stanje pokrivenosti LTE mreže korištenjem mikro ćelija, a zatim se simulira stanje mreže na istom području korištenjem femto ćelija. Usporedbom ovih simulacija analiziraju se glavni parametri planiranja mobilnih mreža. Svrha istraživanja je usporediti razlike između navedenih vrsta ćelija kako bi se što bolje prikazale njihove karakteristike za sub urbano područje kao što je Borongaj.

KLJUČNE RIJEČI: LTE mreža; planiranje pokrivenosti; planiranje kapaciteta; femto ćelije

SIMULATION OF LTE NETWORK AREA OF BORONGAJ

SUMMARY

The purpose of this paper is to do research and analysis of LTE networks of area of Borongaj using software tool for radio network planning WiMAP-4G. Firstly there is analysis of current state of LTE network using micro cells, afterwards there is simulation of LTE network on same area using femto cells. Analysis of the key parameters is done for better comparing those two simulations. The main goal of this paper is to compare differences of those two types of cells for better understanding of their characteristics for suburban area like Borongaj.

KEY WORDS: LTE network; coverage planning; capacity planning; femto cells

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ARHITEKTURA LTE MREŽE	3
2.1. EPC Arhitektura	5
2.1.1. Integracija GERAN-a I UTRAN-a	7
2.1.2. EPS sučelja.....	8
2.2. Arhitektura E-UTRAN-a	10
2.2.1. eNB funkcionalnosti.....	10
2.2.2. LTE radijsko sučelje	12
2.2.3. OFDMA/SC-FDMA frekvencijska domena	14
2.2.4. OFDMA/SC-FDMA vremenska domena.....	15
2.2.5. Brzine Downlinka i Uplinka	16
2.2.6. Adaptivna modulacija	17
2.2.7. MIMO (<i>Multiple Input Multiple Output</i>).....	19
2.2.8. LTE frekvencijski pojasevi	20
3. PLANIRANJE LTE MREŽE	23
3.1. Nominalno planiranje LTE radijske mreže	24
3.2. Planiranje pokrivenosti	25
3.2.1. Proračun radijskog linka.....	26
3.2.2. Proračun gubitaka na putu	28
3.2.3. Proračun radijusa baznih stanica	32
3.3. Planiranje kapaciteta	33
3.3.1. SINR planiranje kapaciteta	34
3.3.2. Planiranje kapaciteta metodom analize prometa	36
4. INTERFERENCIJA I REUPORABA FREKVENCIJE	39
4.1. Konvencionalna reuporaba frekvencije	42
4.2. Frakcionalna reuporaba frekvencije	43
5. VRSTE ČELIJA	45
5.1. Arhitektura femto ćelija.....	46
5.2. Zahtjevi femto ćelija.....	47
6. SIMULACIJA LTE MREŽE	48

6.1. Priprema okoline	49
6.2. Odabir propagacijskog modela	51
6.3. Građevine.....	52
6.4. Odabir tehnologije.....	53
6.5. Odabir sklopovlja	55
6.6. Simulacija korištenjem mikro ćelija	57
6.7. Simulacija korištenjem femto ćelija	59
6.8. Analiza rezultata simulacija	61
7. ZAKLJUČAK.....	62
LITERATURA	64
POPIS KRATICA.....	66
POPIS ILUSTRACIJA.....	68
Popis slika.....	68
Popis tablica	69

1. UVOD

Long Term Evolution (LTE) je mobilna tehnologija namijenjena da uvelike poveća brzinu i kapacitet u odnosu na do tada dostupne mobilne tehnologije. Glavni cilj planiranja LTE mreže je osiguravanje većih brzina podataka, manjih kašnjenja i paketski optimiziranog radijskog pristupa s fleksibilnom implementacijom širine frekvencijskog područja. LTE koristi širok spektar oko 20 MHz, što mu omogućuje kompatibilnost s već postojećim tehnologijama poput UMTS-a (*eng. Universal Mobile Telecommunications System*) i HSPA (*eng. High Speed Packet Access*). Zahvaljujući svom širokom spektru LTE mreža ima i veći kapacitet sustava u odnosu na druge dvije već navedene tehnologije.

Glavni preduvjeti za učinkovit rad mobilnih mreža je dobra pokrivenost i precizno isplaniran kapacitet mreže. Kako bi se ti preduvjeti ispunili, pravilno planiranje mreže je od esencijalne važnosti. Planiranje LTE mreže je dinamičan proces zbog svakodnevnog rasta broja korisnika i urbanizacije gradova. Rješenje ovog problema je optimizacija već postojećih mreža kako bi im se povećala iskoristivost. Jedan od načina optimizacije korištenje femto ćelija. Femto ćelije su ćelije male pokrivenosti i male snage. U ovom radu će se ispitati učinkovitost femto ćelija u suburbanom području na Borongaju u Zagrebu.

Rad se sastoji od sljedećih poglavlja:

1. Uvod
2. Arhitektura LTE mreže
3. Planiranje LTE mreže
4. Vrste ćelija
5. Simulacija LTE mreže
6. Analiza rezultata
7. Zaključak

U drugom poglavlju opisana je arhitektura LTE mreže. Arhitektura LTE mreže je podijeljena na jezgrenu (EPC) i pristupnu (E-UTRAN) mrežu. Navedeni su glavni

elementi LTE jezgrene mreže i njihove funkcionalnosti. U poglavlju 2.2. Arhitektura E-UTRAN-A navedene su glavne funkcionalnosti LTE baznih stanica, te je detaljno objašnjeno LTE radijsko sučelje između korisnika i bazne stanice. U poglavlju 2.2.2. LTE radijsko sučelje opisane su pristupne tehnike *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM) za zračno sučelje u *Downlinku* (od eNodeB-a do UE-a) i *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) za *Uplink* (od UE-a do eNodeB-a). U ovom poglavlju također su opisan MIMO (*eng. Multiple Input Multiple Output*) koncept zajedno sa LTE frekvencijskim pojasevima i pripadajućim brzinama prijenosa podataka.

U trećem poglavlju opisano je Planiranje LTE mreže. Planiranje pokrivenosti se sastoji od evaluacije proračuna *Downlink* i *Uplink* radijskih linkova, te se izvodi pomoću proračuna razine veze i propagacijskog modela. Planiranje kapaciteta je opisano kroz dvije metode: korištenjem prometne analize (procjenom SINR-a) i procjenom prosječnog broja mobilnih pretplatnika koji mogu biti posluženi u ćeliji.

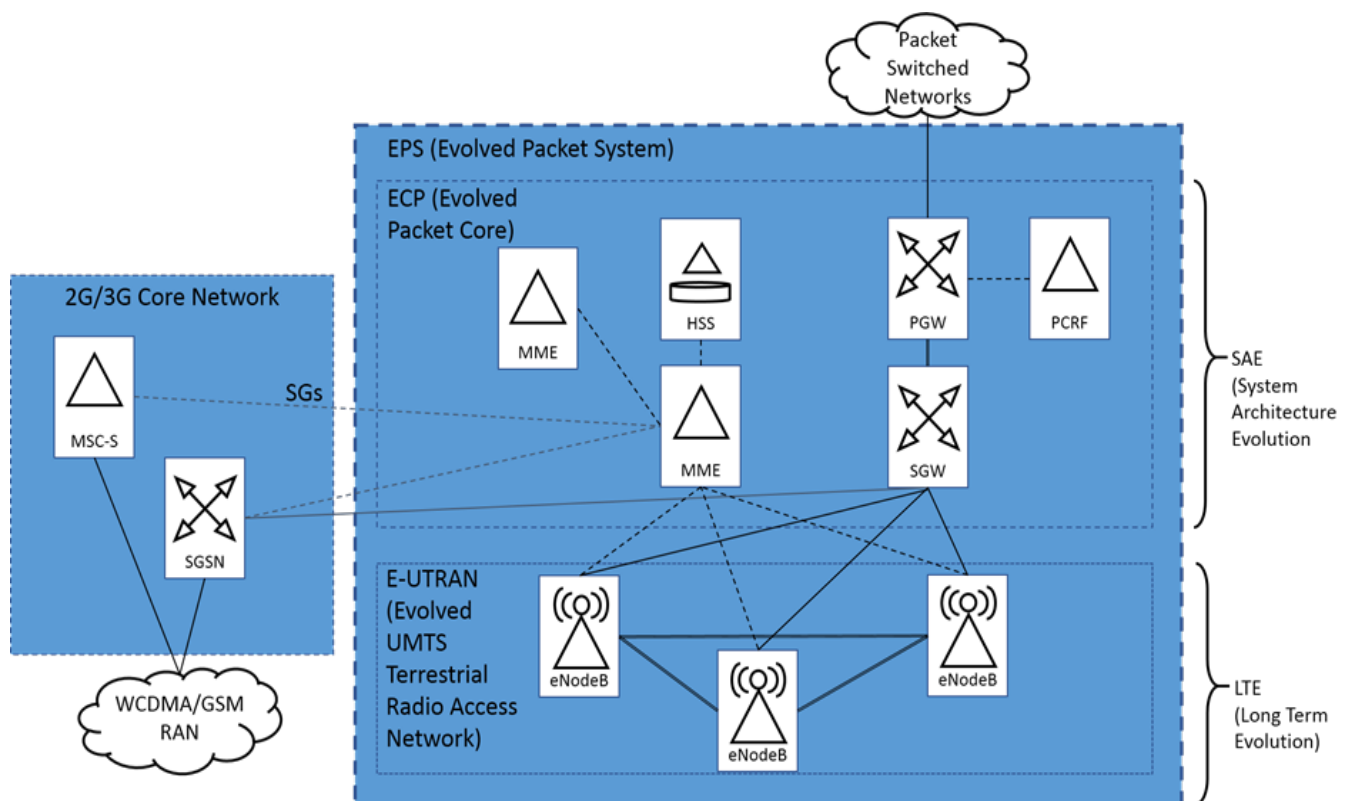
U četvrtom poglavlju opisane su metode reuporabe frekvencije poput: ICIC-a (*eng. Inter-Cell Interference Coordination*) i *Enhanced* ICIC-a, te njihove prednosti i nedostaci. U ovom poglavlju također je opisana konvencionalna reuporaba frekvencije i frakcionalna reuporaba frekvencije.

Peto poglavlje opisuje vrste ćelija koje se koriste u LTE mrežama. Opisane su glavne karakteristike pojedinih vrsta mobilnih ćelija, te su detaljno opisane femto ćelije i njihova arhitektura. Također su opisani neki od glavnih zahtjeva koje femto ćelije trebaju ispunjati.

U pretposljednem, šestom poglavlju opisana je simulacija LTE mreža na području Borongaja u Zagrebu. Program u kojemu se izvode simulacije se naziva WiMAP-4G. U uvodnom dijelu ovog poglavlja opisani su glavni postupci za pripremu okoline za izvođenje simulacija. Nakon pripremne faze slijedi simulacija LTE mreže na području Borongaja korištenjem femto ćelija i korištenjem mikro ćelija.

2. ARHITEKTURA LTE MREŽE

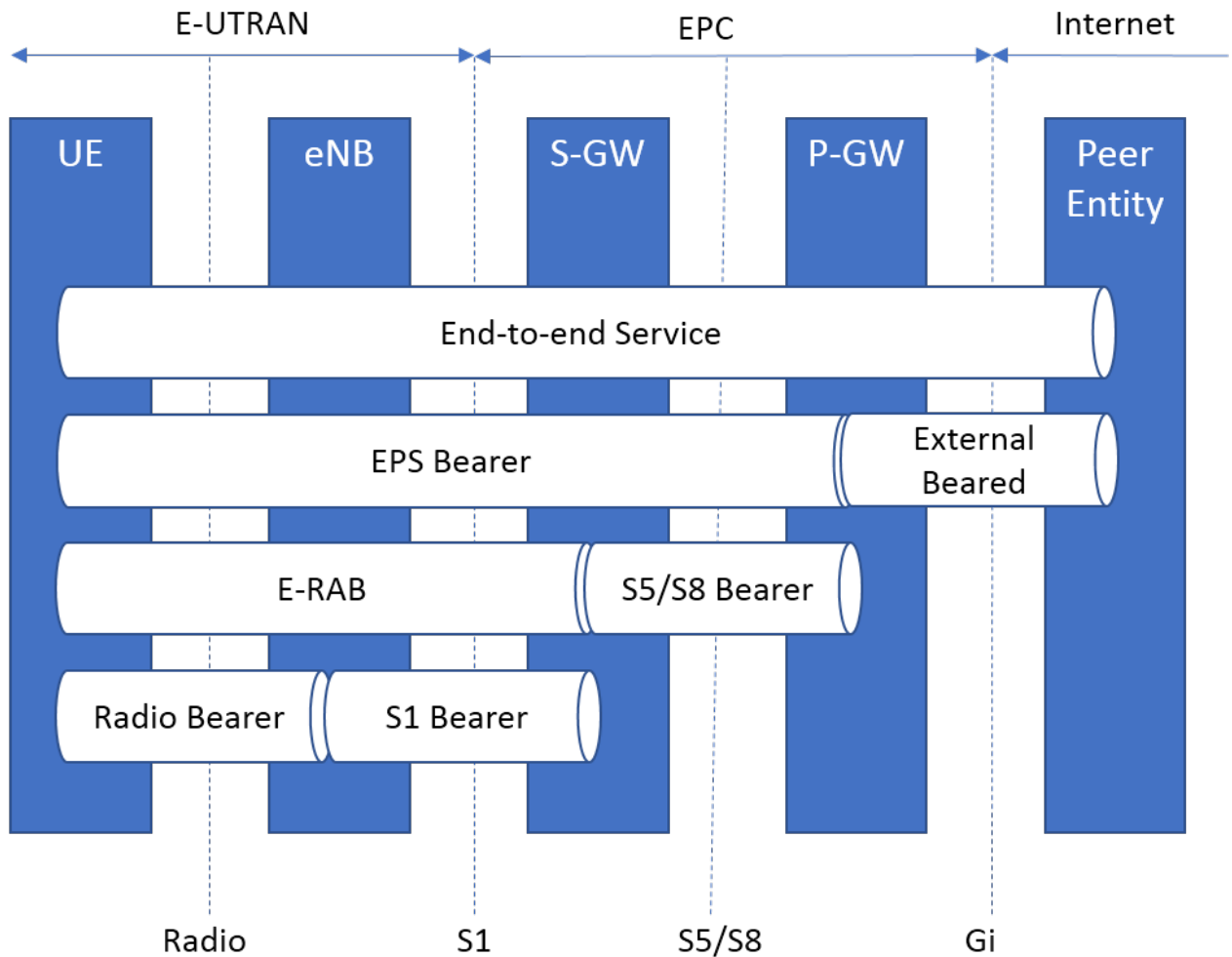
Glavni dio u arhitekturi LTE mreže je EPS (*eng. Evolved Packet System*) koji se sastoji od EPC-a (*eng. Evolved Packet Core*) i E-UTRAN-a (*eng. Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) kako je prikazano na slici 1. Jezgrena mreža, odnosno EPC je zadužena da omogućuje pristup vanjskim podatkovnim mrežama (Internet, Intranet) i operatorskim servisima (MMS, MBMS). EPC također ima funkcije vezane za sigurnost (autentifikacija), informacije o pretplatniku, naplata i interni pristup (GERAN, UTRAN, E-UTRAN, I-WLAN, CDMA2000). Jezgrena mreža također prati mobilnost inaktivnih terminalnih uređaja. [1]



Slika 1. Prikaz EPS arhitekture. Preuzeto od [1].

E-UTRAN je zadužen za sve funkcionalnosti vezane za radijski pristup terminalnim uređajima. Između EPC-a i E-UTRAN-a nalazi se S1 sučelje, a između eNB-ova nalazi se sučelje X2. Slično kao i kod UMTS mobilne mreže, EPS podržava koncept noseće usluge (*eng. Bearer services*) za pružanje podatkovnih usluga krajnjom korisniku (slika 2). EPS nosioc je definiran između korisničke opreme (*eng. User Equipment - UE*) i P-GW (*PDN Gateway*) u EPC-u. Na dalje, EPS nosioc u se dijeli na E-UTRAN (E-RAB) preko radijskog sučelja i na S1 sučelje između korisničke opreme i S-GW-a (*Serving Gateway*). S5/S8 nosioc je podijeljen između S-GW-a i P-

GW-a (S8 kada S-GW i P-GW pripadaju različitim operatorima). Usluge s kraja na kraj (IP usluge) kombiniraju više različitih EPS nosioca. [1]

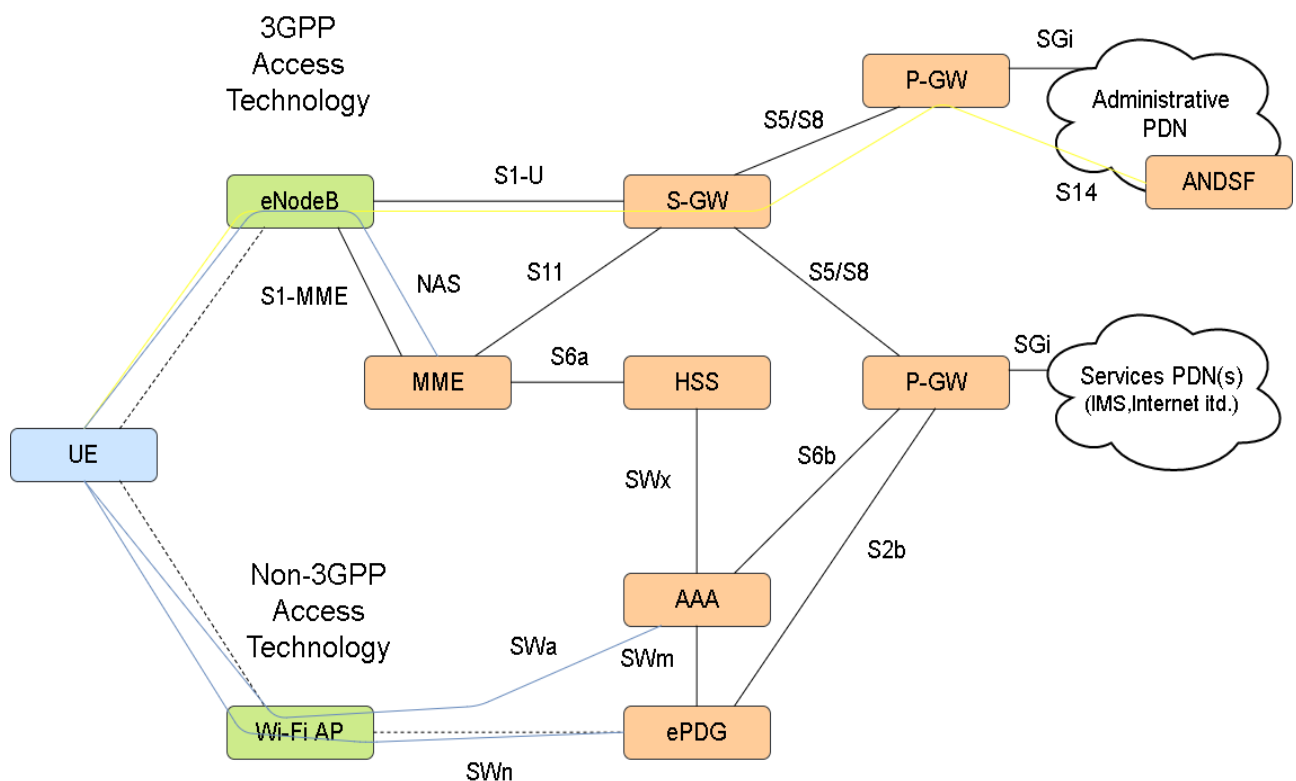


Slika 2. Koncept EPS nosioca. Preuzeto od [1].

Kod korisničke opreme TFT (*eng. Traffic Flow Template*) povezuje se SDF (*eng. Service Data Flow*) s EPS nosiocem u uzlaznom, odnosno silaznom smjeru. Više SDF-ova se može koristiti na istom EPS nosiocu koristeći se paketskim filtrima za uzlaznu i silaznu vezu. Funkcija E-RAB (*eng. EPS Radio Access Bearer*) omogućuje slanje paketa EPS nosioca između korisničke opreme i EPC-a. Radijska nosiva usluga je zadužena za slanje paketa EPS nosioca između korisničke opreme i eNB-a. Nosioč S1 sučelja šalje pakete E-RAB-a između eNB-a i *Gateway*-a koji trenutno posluhuje. S5/S8 nosioč je zadužen za slanje paketa EPS nosioca između poslužiteljskog *Gateway*-a i PDN GW-a. Korisnička oprema sprema podatke o konekciji između paketskih filtera na uzlaznoj vezi i radijskog nosioca kako bi se ostvarila veza između SDF-a i radijskog nosioca na uzlaznoj vezi. [1]

2.1. EPC Arhitektura

Na slici 3 prikazana je EPC arhitektura, odnosno arhitektura LTE jezgre mreže. EPC se sastoji od MME-a (*eng. Mobility Management Entity*), HSS-a (*eng. Home Subscriber Server*), PCRF-a (*eng. Policy and Charging Rules Function*), SGW-a (*eng. Serving Gateway*) i PGW-a (*eng. Packet Data Network Gateway*). Osnovne zadatke koje HSS obavlja su upravljanje registracijom korisnika, pohranjivanje sigurnosnih parametara o korisničkoj opremi i opskrbljivanje informacijama o korištenom PGW-u. Zadatci PGW-a su primjena i kontrola QoS-a, filtriranje paketa i funkcionalnosti vezane za naplatu. MME je zadužen za upravljanjem spajanja/odspajanja korisničke opreme, funkcionalnosti NAS sigurnosti, upravljanje mobilnosti za korisničku opremu koja se nalazi u stanju mirovanja i odabir GW-a. PCRF je zadužen za obavljanje posebnih poslovnih pravila definiranih od strane operatora, dok SGW obavlja zadaće vezane za mobilnost, dostavlja informacije o rutiranju u mreži, naplatu za korisnike u roamingu i sl. [2]



Slika 3. Prikaz EPC arhitekture. Preuzeto od [1].

Mobility Management Entity (MME) je jedinica koja upravlja mobilnošću u mreži. Glavni zadatak MME-a je upravljanje prekapčanjem odnosno otkapčanjem korisničke opreme (UE) na mreži, što omogućuje korisničkoj opremi registraciju na mrežu. MME također obavlja funkcije vezane za sigurnost. Zadužen je za implementaciju funkcija

autentifikacije i autorizacije kako bi se verificirali korisnici, odnosno omogućio pristup mreži i praćenje korisničkih aktivnosti. Uz navedene funkcionalnosti vezane za sigurnost, MME je zadužen za zaštitu NAS (*eng. Non-access stratum*) poruka za signalizaciju. MME upravlja postavljanjem i modifikacijom EPS nosilaca. Pretpostavlja se da će korisnička oprema u E-UTRAN-u uvijek imati unaprijed zadani EPS nosioc uspostavljen za vrijeme spajanja na mrežu. MME također upravlja mobilnošću kada se korisničke opreme kada se nalazi u stanju mirovanja. [2]

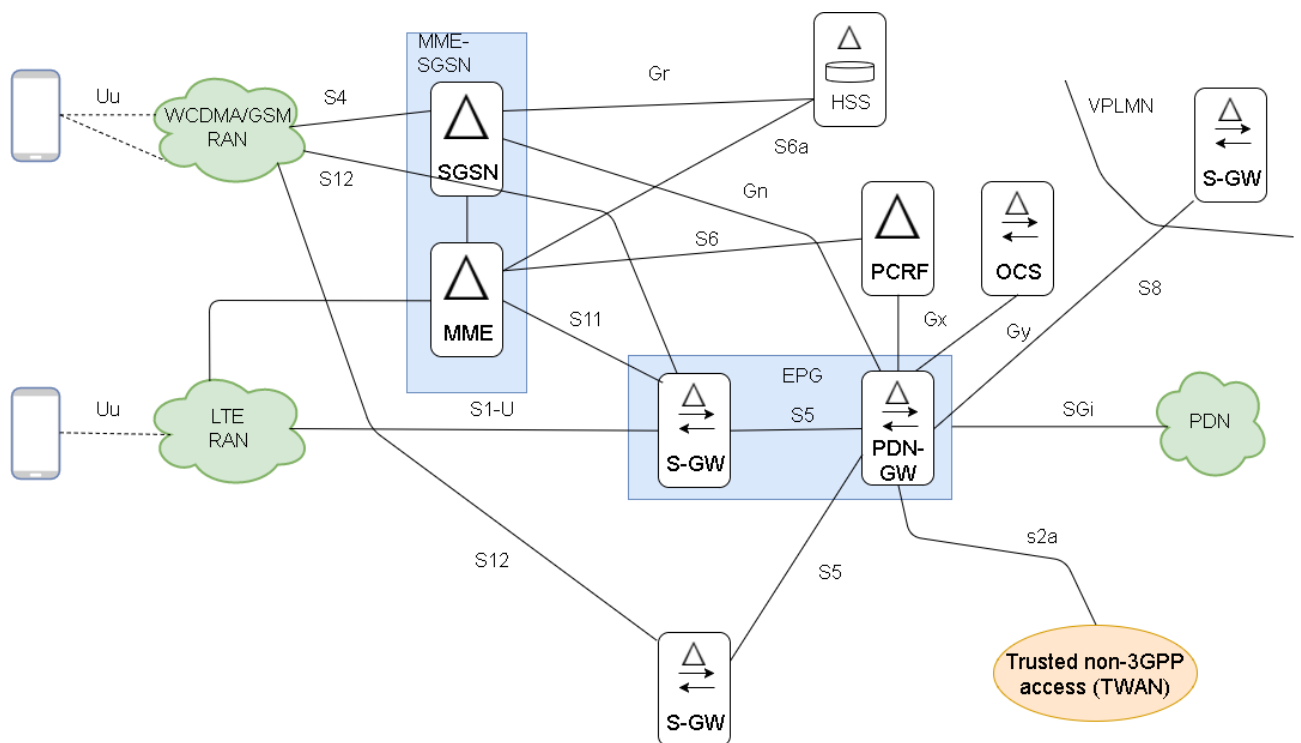
Policy and Charging Rules Function (PCRF) je server koji donosi skup poslovnih pravila koje operator postavlja. Ta pravila definiraju na koji bi se način mrežni resursi alocirali pretplatnicima i aplikacijama, te pod kojim uvjetima. PCRF komunicira s PGW-om preko Gx sučelja kako bi upravljao pretplatnicima i mrežnim informacijama prema postavljenim pravilima. *Home Subscriber Server* (HSS) je baza podataka koja sadrži informacije o korisničkoj opremi koja se preplaćena na EPS mrežu. HSS sprema lokaciju korisničke opreme i autentifikacijske parametre. HSS je evoluirani HLR (*eng. Home Location Register*) s AuC (*eng. Authentication Center*) funkcionalnostima. [2]

Serving Gateway (SGW) usmjerava komunikacije od strane korisnika, odnosno korisničke opreme prema PGW-u. Korisnička oprema je spojena na isti SGW tijekom cijele sesije. SGW se ponaša kao lokalno sidro koje podržava mobilnost korisničke opreme između eNode baznih stanica s SGW područjem posluživanja. SGW je također odgovoran za naplaćivanje usluge korisnika koji se nalaze u *roamingu*. Korisniku se naplaćuje prema tarifi posebno za svaku uslugu i preplatu. SGW se mijenja samo ako se korisnička oprema premjesti u područje za koje je zadužen novi SGW, dok se PGW ostaje isti sve dok je korisnička oprema spojena na mrežu. [1]

Packet Data Network Gateway (PGW) je *gateway* između unutarnjih EPS mreža i vanjskih IP mreža (Internet, LAN...). Korisnička oprema može biti spojena na više PGW-ova istovremeno kako bi se pristupilo više mreža s komutacijom paketa. PGW povećava kontrolu operatora nad mrežnim resursima i limitira potencijalnu zlouporabu od strane korisnika. Kontrolne funkcije udružuju korisničke tokove prometa s prikladnim QoS klasama. Promet na *Downlinku* se kontrolira od strane PGW-a, dok se promet na *Uplinku* upravlja u samom eNodeB-u. PGW također omogućuje filtriranje IP paketa od strane vanjskih IP mreža. [1]

2.1.1. Integracija GERAN-a i UTRAN-a

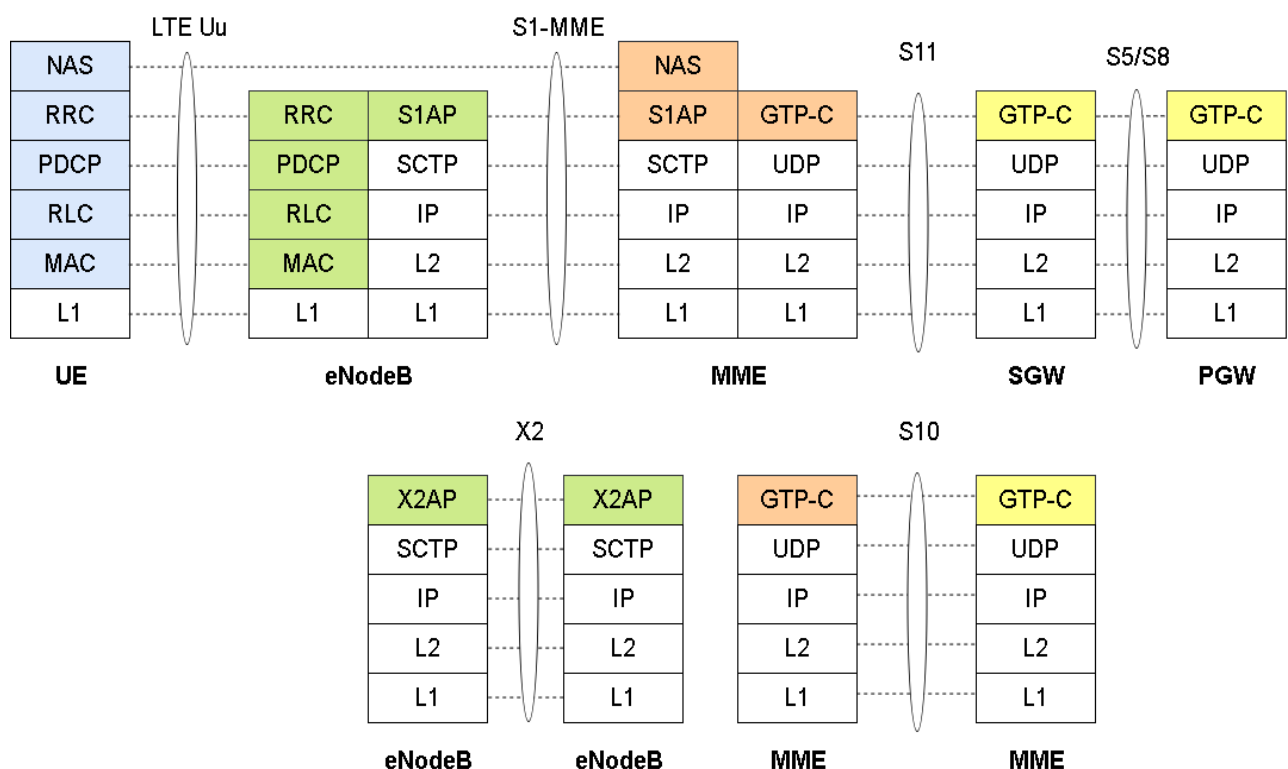
Na slici 4 prikazana je implementacija GERAN-a (*eng. GSM EDGE Radio Access Network*), UTRAN-a (*eng. Universal Terrestrial Radio Access Network*) i E-UTRAN-a (*eng. Evolved Terrestrial Radio Access Network*) integriranih u SAE (*eng. System Architecture Evolution*) jezgrena mrežu. Kao što je vidljivo na slici SGSN i MME dijele mnogo zajedničkih funkcionalnosti. Također bitno je napomenuti da su protokoli jezgrene mreže, *Session Management (SM)*, *Mobility Management (MM)* korišteni u 2G/3G kompatibilni s protokolima koji se koriste u EPS-u, razlog tome je to što SGSN i MME dijele zajednički evolucijski put u 3GPP standardu. Moguća je implementacija MME-a i SGSN-a tako da su spojeni u jedan čvor. S takvom implementacijom omogućena je olakšana unutarnju podrška SGSN/MME i P/S-GW/GGSN mobilnost čvorova. [2]



Slika 4. Prikaz implementacije GERAN-a i UTRAN-a. Preuzeto od [1].

2.1.2. EPS sučelja

Sučelja koja se koriste u LTE mreži prikazana su na slici 5. Uu sučelje je sučelje koje se nalazi između korisničke opreme i eNodeB-a. Dio kontrolne signalizacije je pokriven od strane RRC (*eng. Radio Resource Management*) protokola. RRC također može prenositi NAS poruke (signalizacijske poruke između korisničke opreme i MME-a). RRC je podržan od strane PDCP (*eng. Packet Data Convergence Protocol*), RLC (*eng. Radio Link Control*) i MAC (*eng. Medium Access Control*) protokola. [5]



Slika 5. Prikaz LTE sučelja s pripadajućim protokolima. Preuzeto od [5].

S1 sučelje se nalazi između eNB-ova i MME-a i S-GW-a. Ovo sučelje se bazira na *GTP User Data Tunneling-u* (GTP-U). S1 sučelje je dosta slično *Radio Access Network Application Part-u* (RANAP) uz neka pojednostavljena i promjene vezane za mobilnost unutar EPS-a. S1 sučelje se može podijeliti na S1-CP (kontrolni podatci) i S1-UP (korisnički podatci) dio. Signalizacija na S1-CP dijelu se bazira na SCTP-u (*eng. Streaming Control Transmission Protocol*). Signalizacijski protokol na razini S1 sučelja se naziva S1-AP (*eng. Application Protocol*) protokol. S1-AP protokol ima sljedeće funkcionalnosti, prema [5]:

- Funkcionalnosti vezane za upravljanje EPS nosiocem: Cjelokupne funkcionalnosti vezani za postavljanje, modifikaciju i otpuštanje EPS nosioca koji se aktiviraju od strane MME-a ili eNB-a.
- Inicijalna funkcija prijenosa konteksta: Ova funkcionalnost se koristi kako bi se postavio S1 UE kontekst u eNB-u, standardno IP povezivanje, postavljanje jedan ili više SAE nosioca ako su zatraženi od strane MME-a i prijenos informacija vezanih za NAS signalizaciju.
- Mobilne funkcionalnosti korisničke opreme u LTE aktivnom načinu rada: promjena eNB-ova unutar SAE/LTE-a (Inter MME/S-GW prekapčanja) preko S1 sučelja. Promjena RAN nodova između različitih RAT-ova (*eng. Radio Access Technology*) – Inter-3GPP-RAT prekapčanja preko S1 sučelja.

Funkcionalnosti upravljanja S1 sučelja su, prema [5]:

- Funkcija restarta kako bi se omogućila dobro definirana inicijalizacija na S1 sučelju.
- Funkcija detekcije pogrešaka koja omogućuje izvještaj i podršku gdje je to potrebno.
- Funkcionalnost mjerenja preopterećenja koja ukazuje na situaciju s opterećenjem u kontrolom dijelu S1 sučelja.

Funkcionalnosti prijenosa NAS signalizacije između UE-a i MME-a su, prema [5]:

- Prijenos informacija vezanih za NAS signalizaciju kako bi se omogućio S1 UE kontekst u eNB-u.
- Prijenos informacija vezanih za NAS signalizaciju kada je S1 UE kontekst kod eNB-a već uspostavljen.

X2 sučelje se nalazi između samih eNB-ova. X2 sučelje se većinom koristi kako bi se podržala mobilnost UE-a (prosljeđivanje paketa) u LTE aktivnom modu. Ovo sučelje se može koristiti i u funkcionalnostima vezanim za više ćelijski RRM (*eng. Radio Resource Management*). X2-CP sučelje se sastoji od signalizacijskog protokola X2-AP koji radi nad SCTP-om. X2-UP sučelje je bazirano na GTP-U-u i daje podršku mobilnosti bez gubitaka. X2-AP protokol pruža sljedeće funkcionalnosti, prema [5]:

- Upravljanje mobilnošću: Ova funkcionalnost omogućuje eNB-u promjenu odgovornosti vezane za određen UE drugom eNB-u.
- Upravljanje opterećenjem: Ova funkcionalnost omogućuje eNB-ovima mogućnost indikacije opterećenja prometa.
- Informacije o pogreškama: Funkcionalnosti koje omogućuju izvještavanje o pogreškama.

2.2. Arhitektura E-UTRAN-a

LTE radijsko sučelje je razvijeno prema zahtjevima spektralne fleksibilnosti, spektralne efikasnosti i isplativosti. Spektralna efikasnost uključuje mogućnost korištenja uparenog i ne uparenog spektra, što znači da LTE podržava i FDD i TDD bazirane tehnike. LTE također podržava rad na šest različitih širina frekvencijskih pojaseva (1.4, 3, 5, 10, 15 i 20 MHz) što ima veliku ulogu u fleksibilnosti spektra i standardizaciji radijskog sučelja. Točnije LTE implementacija radijskog sučelja podržava sve frekvencijske pojaseve između 1.4 i 20 MHz raspodijeljenih u resursne blokove, koji predstavljaju 12 nosilaca ili 180 kHz. Visoka efikasnost spektra se ostvaruje korištenjem modulacijskih shema višeg reda, kao što su 16-QAM, 64-QAM i 256-QAM i korištenjem naprednih antenskih rješenja, uključujući diverziju kod slanja i primanja, prostorno filtriranje i prostorni multipleksing (MIMO). Inter-symbol Interference (ISI) je smanjen tako da se kod *Downlink-a* koristi OFDM-a, a kod *Uplink-a* SC-FDMA metoda. Obe metode rezultiraju većim duljinama simbola tako da se ISI smanjuje, što povećava performanse u radijskim okruženjima koji jako ovise o vremenskim disperzijama. *Uplink* i *Downlink* imaju sličnu strukturu vremenske domene. [2]

2.2.1. eNB funkcionalnosti

E-UTRAN se sastoji jedino od evoluiranih Nodova B (eNB) koji su zaduženi za sve funkcionalnosti radijskog sučelja. ENB je RAN nod u EPS arhitekturi koji je zaduženi za radio transmisiju i prijam od strane korisničke opreme u jednoj ili više ćelija. ENB je spojen na EPC nodove preko S1 sučelja, a na susjedne eNB-ove preko X2 sučelja. Funkcije koje obavlja eNB su, prema [2]:

- Kontrola ćelija i podrška MME-u; eNB posjeduje i kontrolira radijske resurse svojih vlastitih ćelija. Ćelijski se resursi na zahtjev MME-a njima i dodjeljuju.
- Kontrola mobilnosti; eNB je odgovoran za kontrolu mobilnosti korisničke opreme u aktivnom stanju. Ova funkcionalnost se izvršava tako da se eNB zahtjeva od korisničke opreme određena mjerenja i prema njima obavlja prekapćanje kada je potrebno.
- Kontrola sigurnosti; kodiranje korisničkih podataka preko radijskog sučelja se obavlja u eNB-u. Također kodiranje i zaštita integriteta RRC signala se obavlja u eNB-u.
- Upravljanje dijeljenim kanalom; S obzirom na to da eNB posjeduje ćelijske resurse, eNB također upravlja dijeljenim kanalom koji se koristi za signalizaciju i inicijalni pristup.
- Segmentacija; *Radio Link Control (RLC) Service Data Units (SDUs)* primljeni od strane *Packet Data Convergence Protocol-a (PDCP)* se sastoje od IP paketa i mogu biti veći od dopuštene veličine za transport omogućene od

strane fizičkog sloja. RLC sloj mora podržavati segmentaciju ako bi se paketi prilagodili dopuštenoj veličini.

- HARQ; *Medium Access Control (MAC) Hybrid Automatic Repeat reQuest* (HARQ) sloj s brзом povratnom informacijom omogućuje sredstva za brzu korekciju većine grešaka radijskog kanala. Za ostvarivanje niskih vremena kašnjenja i visoke efikasnosti radijskih resursa HARQ radi s učestalosti grešaka niskom kao kod VoIP-a. Niže učestalosti pojavljivanja grešaka se ostvaruju tako da se *Automatic Repeat reQuest* (ARQ) sloj brine za eNB HARQ greške.
- Multipleksiranje i mapiranje; eNB obavlja mapiranje logičkih kanala na transportnom kanalu.
- Funkcionalnosti fizičkog sloja; eNB obavlja funkcionalnosti fizičkog sloja kao što su: Tx diverzija, OFDM modulacija i *scrambling*. ENB također obavlja funkcionalnosti kao što su adaptacija linka i kontrola snage.
- Mjerenja i izvještavanje; eNB nudi mogućnosti za konfiguraciju mjerenja nad radijskim okruženjima i eNB-ovim internim varijablama i stanjima. Prikupljeni podatci se koriste za RRM ili više ćelijski RRM.

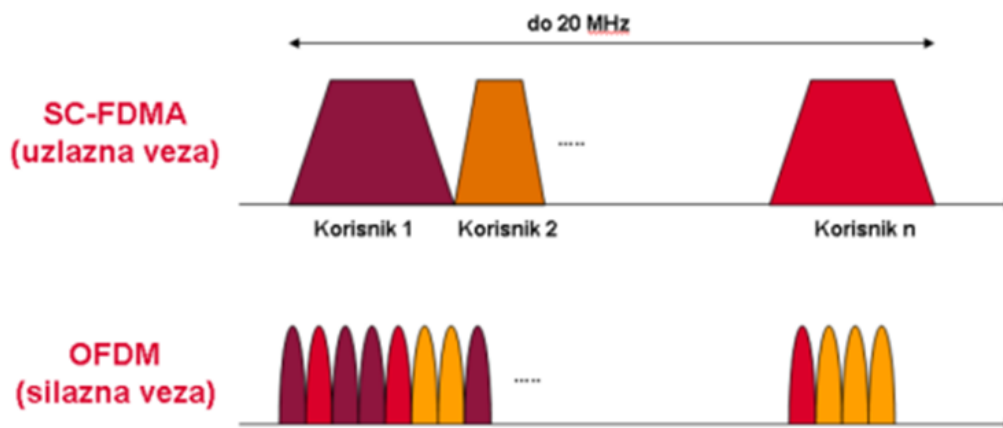
2.2.2. LTE radijsko sučelje

LTE radijsko sučelje se zasniva OFDMA-u (*eng. Orthogonal Frequency Division Multiplex Access*) pristupnoj tehnici u *Downlinku* i SC-FDMA pristupnoj tehnici (*eng. Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) u *Uplinku* (slika 6). Ove tehnike se dobro prilagođavaju funkcijama s fleksibilnom pojasnom širinom. Ovaj čimbenik omogućuje operatorima da razvijaju LTE mreže u različitim regijama s različitim dostupnim širinama frekvencijskog pojasa. OFDM pokazuje jako dobre performanse kod visoko disperzivnih radijskih okruženja zbog tog što se tokovi podataka distribuiraju preko više pretplatnika. SC-FDMA kod *Uplinka* se realizira slično kao i kod *Downlinka* (OFDMA), te se još naziva DFTS-OFDM (*eng. Discrete Fourier Transform Spread – OFDMA*). Struktura vremenske domene je također slična kod uplinka i downlinka. SC-FDMA ima puno manji PARP (*eng. Peak to Average Power Ratio*) od OFDM tehnike pristupa. To je jedan od razloga odabira SC-FDMA za uplink vezu jer pojačalo snage kod korisničke opreme (UE) tada može biti izvedeno u jeftinijoj varijanti. [2]

Kao dodatak tome, obje FDD (*eng. Frequency Division Duplex*) i TDD (*eng. Time Division Duplex*) tehnike su podržane, što omogućava korištenje uparenog i neuparenog spektra. Kod FDD-a različiti frekvencijski pojasevi se koriste za *Uplink* i *Downlink*. Kod TDD-a transmisija je odvojena vremenski. Objе metode imaju svoje prednosti i mane. TDD ima nešto dulji *overhead* i veće kašnjenje zbog učestalog mijenjanja vremena između korisnika. U drugu ruku, TDD mod omogućuje uzajamnost radijskog kanala, što znači da se mjerenja u *Uplinku* mogu koristiti za transmisiju na *Downlinku* i obratno. TDD mod je također jednostavniji za omogućiti u područjima s limitiranim dostupnim frekvencijskim spektrom, jer može iskoristiti neupareni frekvencijski pojas. [2]

Polu-duplex FDD mod (HD-FDD) također je definiran kada korisnička oprema ne treba obavljati transmisiju u trenutku kad prima podatke. Ovo znači da se može proizvoditi korisnička oprema koja je više cjenovno efektivnija zbog izostavljanja dupleks filtera. Radio resursi su definirani u vremenskim i frekvencijskim domenama, te su podijeljene u tzv. resursne blokove. Dinamično ovisno planiranje kanala alokira određenu količinu vremenskih i frekvencijskih resursa različitim korisnicima u različitim vremenima. Adaptacija linka adaptira modulacijsku shemu i brzinu prijenosa s varijabilnim uvjetima u kojima se kanal nalazi u tom trenutku. HARQ (*eng. Hybrid Automatic Repeat and Request*) omogućuje vrlo brze retransmisijske funkcionalnosti na drugom sloju. Obični ARQ (*eng. Automatic Repeat and Request*) je implementiran kod RLC sloja. LTE radio transmisija se osniva na vrlo kratkom TTI-u (*eng. Transmission Time Interval*) od 1ms, što ubrzava operacije svih gore navedenih funkcija. Kratki TTI također smanjuje kašnjenje radijskog sučelja. [2]

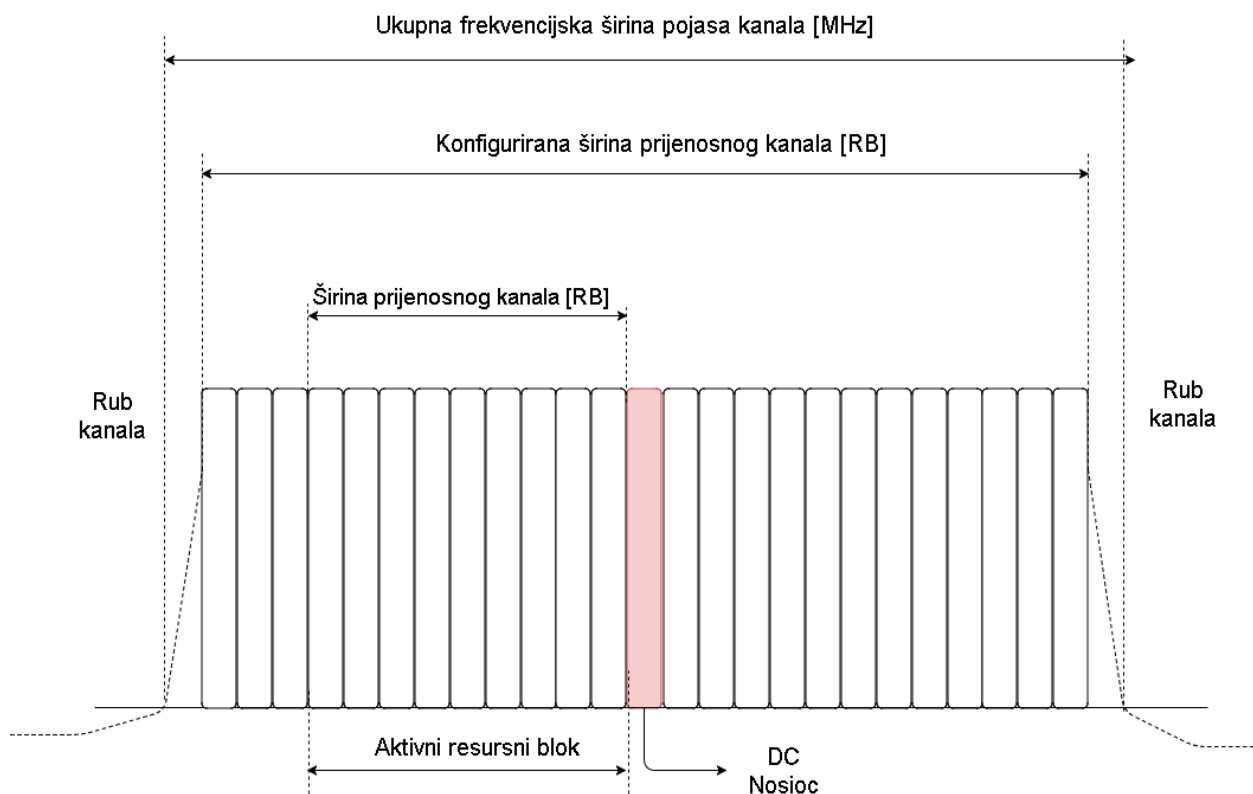
Za razliku od WCDMA mreže transmisija *Uplinka* kod LTE mreže je dobro raspodijeljena unutar ćelije (intra ćelijska ortogonalnost) zahvaljujući SC-FDMA rješenju. Ovaj čimbenik pomaže dosta u rješavanju funkcionalnosti vezanih za kontrolu snage. Kako bi se povećala efikasnost spektra, kapacitet i brzine prijenosa koriste se sustavi višestrukih antena odnosno MIMO (eng. *Multiple Input Multiple Output*) sustavi. Koristeći se višestrukim antenama i naprednim procesiranjem signala kao što je prostorni multipleks, radijski se kanal može podijeliti u nekoliko slojeva. Čak do četiri sloja se mogu iskoristiti što omogućuje četiri puta veće brzine prijenosa za isti frekvencijski pojas. [2]



Slika 6. Prikaz SC-FDMA i OFDM pristupnih tehnika. Preuzeto od [13].

2.2.3. OFDMA/SC-FDMA frekvencijska domena

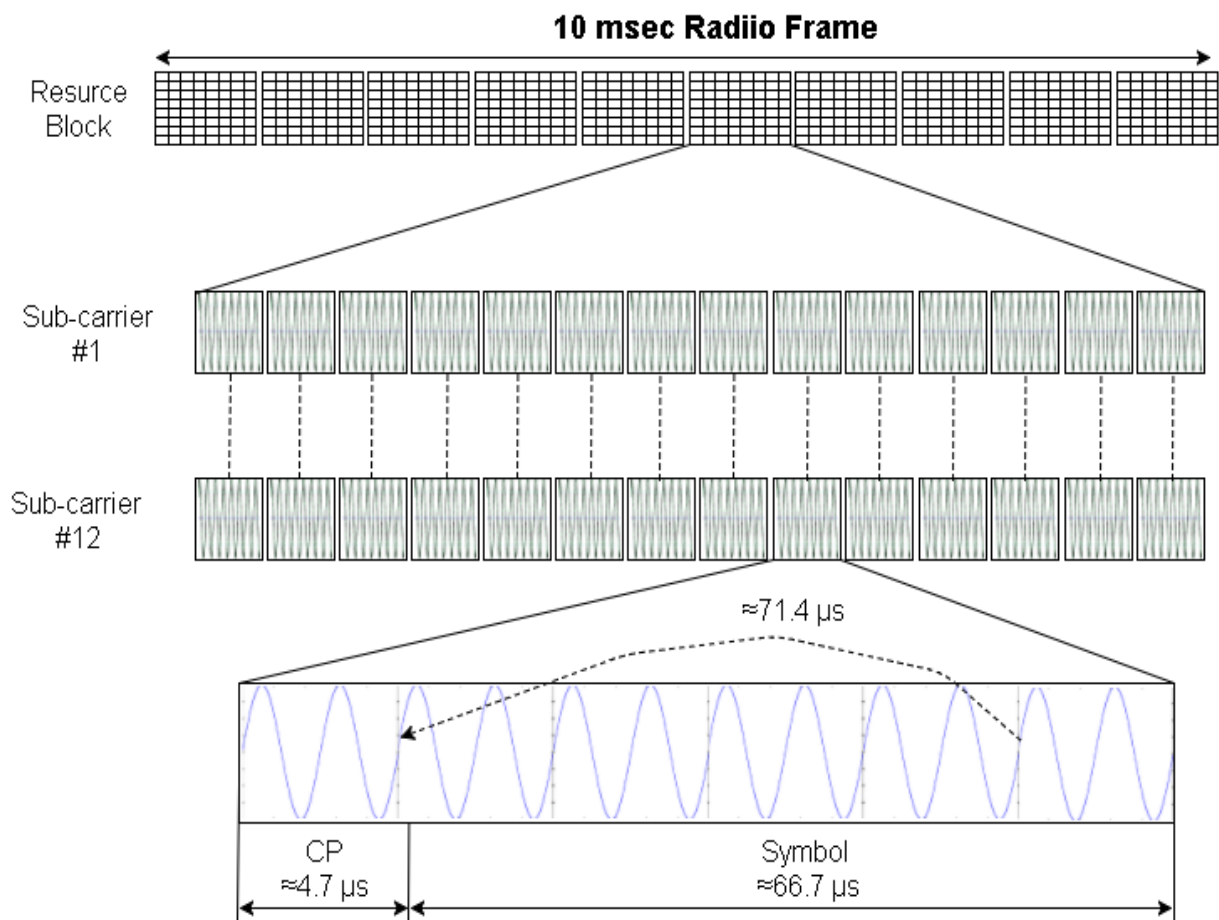
Kao i kod svih podatkovnih komunikacija brzina prijenosa je proporcionalna širini frekvencijskog pojasa i odnosa signala i šuma (S/N). Za stalne širine frekvencijskog pojasa veći odnos S/N rezultira većoj mogućoj propusnosti. Odnos S/N u radio frekvencijskom spektru ovisi o korisničkoj opremi. OFDMA i SC-FDMA radijski spektar dijeli na podnosiocne veličine 15 kHz. Podnosioci se alociraju korisničkoj opremi u grupama po 12 čineći tzv. resursne blokove (RBs). Kao što je prikazano na slici 7 ukupan broj RBs-ova je od 6 do 100 zbog nosioca koji se ne koriste. Nosioci koji se ne koriste se nalaze sredini frekvencijskog pojasa DC (*eng. Direct Current*), te na samom rubu kanala. Najbolja iskoristivost LTE mreže se postiže sa dostupnih 100 RBs-ova na 20 MHz kanalnoj frekvenciji. Činjenica da LTE podržava više frekvencijski pojaseva uvelike olakšava integraciju LTE-a u područjima s ograničenim radijsko frekvencijskim spektrom. [1]



Slika 7. LTE širina frekvencijskog kanala. Preuzeto od [1].

2.2.4. OFDMA/SC-FDMA vremenska domena

Kada govorimo o radijskim transmisijama često nailazimo na pojmove poput višestrukog ogiba, refleksije, difrakcije i raznih slabljenja signala zbog nailaženja na razne objekte u prostoru. Energija jednog simbola ili bita se dijeli kroz različite puteve, te stiže na prijamnu stranu u različitim vremenskim intervalima. Kašnjenje između tih vremenskih intervala različitih dolazaka signala se naziva kašnjenje širenja (*eng. Delay Spread*). Kašnjenje širenja signala iznosi između 1 i 2 μs u urbanim i sub-urbanim područjima i do 20 μs u brdskim područjima. Ako je trajanje simbola manje od kašnjenja širenja signala, kašnjenje dolazaka prethodnih signala uzrokuje tzv. *Inter Symbol Interference* (ISI). Kod WCDMA i GSM mreža ovaj problem se rješava tako da se koriste sofisticirane tehnike prijema kao RAKE prijemnik i usklađivač. Kako bi se zadržala niska cijena LTE terminala odlučeno je da se koristi tehnika u kojoj je trajanje simbola duže od kašnjenja širenja uključujući *Cyclic Prefix* (CP) metodu. LTE koristi također 10 msec trajanje radijskog okvira kao i WCDMA pod-podijeljeno na deset 1 msec pod-okvira dalje podijeljenih na 14 simbola kao što je prikazano na slici 8. [1]



Slika 8. OFDMA/SC-FDMA vremenska domena. Preuzeto od [1].

Svaki simbol ima približno trajanje 71.4 μ s, odnosno sam simbol ima trajanje 66.7 μ s što je još uvijek puno više od najvećeg kašnjenja širenja očekivanog kod LTE-a. *Cyclic Prefix* (CP) ima trajanje približno 4.7 μ s. Ako je CP duži od kašnjenja širenja ISI će se potpuno ukloniti jer svaka refleksija dolazi na prijammik kao isti simbol. Normalni CP od 4.7 μ s kompletno uklanja ISI u urbanim i suburbanim okruženjima. Također postoje i produljeni CP-ovi od 16.7 μ s i 33.3 μ s specificiran od strane 3GPP-a koji se koriste za okruženja s većim kašnjenjima širenja signala. [1]

2.2.5. Brzine Downlinka i Uplinka

S obzirom na to da se u koristi 12 podnosilaca po resursnom bloku (RB) i 14 simbola po podokviru Downlink može prenijeti 168 (12x14) simbola svake milisekunde za svaki resursni blok u sustavu. Broj dostupnih resursnih blokova ovisi o frekvencijskom pojasu sustava. Npr. 6 resursnih blokova na frekvenciji 1.4 MHz do 100 resursnih blokova na frekvenciji 20 MHz. Najveća brzina je ostvarena koristeći 20 MHz frekvencijski pojas sa 64 QAM modulacijom i MIMO prostorni multipleksing. Ovakva konfiguracija postiže maksimalnu brzinu od 201.6 Mbps-a, ali je u praksi manja zbog signalizacijskih zaglavlja i zaglavlja adaptivnog kodiranja. Kod prvih release-ova LTE-a korisnička oprema nije podržavala 64 QAM modulaciju i MIMO transmisiju u *Uplinku* pa su najveće brzine iznosile oko 67.2 Mbps-a. [1]

Agregacija nosioca je predstavljena u 3GPP rel10 kako bi povećala širinu frekvencijskog pojasa, odnosno brzinu i kapacitet. Agregacija nosioca se može koristiti i kod FDD-a i TDD-a. Svaki nosioc koji se agregira je referenciran kao komponentni nosioc CC i može imati pojasnu širinu od 1.4, 3, 5, 10, 15 ili 20 MHz. Moguće je maksimalno agregirati pet komponentnih nosioca ostvarujući maksimalnu frekvencijsku širinu od 100 MHz. Na *Uplinku* maksimalna podržana agregacija nosioca je 40 MHz. [1]

2.2.6. Adaptivna modulacija

Vrsta modulacije koja se koristi u LTE-u ovisi o radijskom okruženju. Korisnička oprema određuje kvalitetu u downlinku i signalizira te podatke eNodeB-u kroz *Channel Quality Indicator* (CQI). Uplink referentni signali koji se nalaze u sklopu uplink transmisije, koriste se od strane eNodeB-a za određivanje kvalitete signala u uplinku. EnodeB odlučuje koja će se modulatorska tehnika koristiti ovisno o kvaliteti na *Downlink* i *Uplink* radijskog okruženja. LTE podržava sljedeće modulatorske tehnike u downlinku i uplinku (slika 8), prema [1]:

- 256 *Quadrature Amplitude Modulation* (256 QAM) koja koristi 256 različitih kvadraturnih i amplitudnih kombinacija za prijenos 8 bitova po simbolu (samo za Downlink).
- 64 *Quadrature Amplitude Modulation* (64 QAM) koja koristi 64 različite kvadraturne i amplitudne kombinacije za transport 6 bitova po simbolu.
- 16 *Quadrature Amplitude Modulation* (16 QAM) koja koristi 16 različitih kvadraturnih i amplitudnih kombinacija za transport 4 bita po simbolu.
- *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) koji koristi 4 različite kvadraturne kombinacije za transport 2 bita po simbolu.

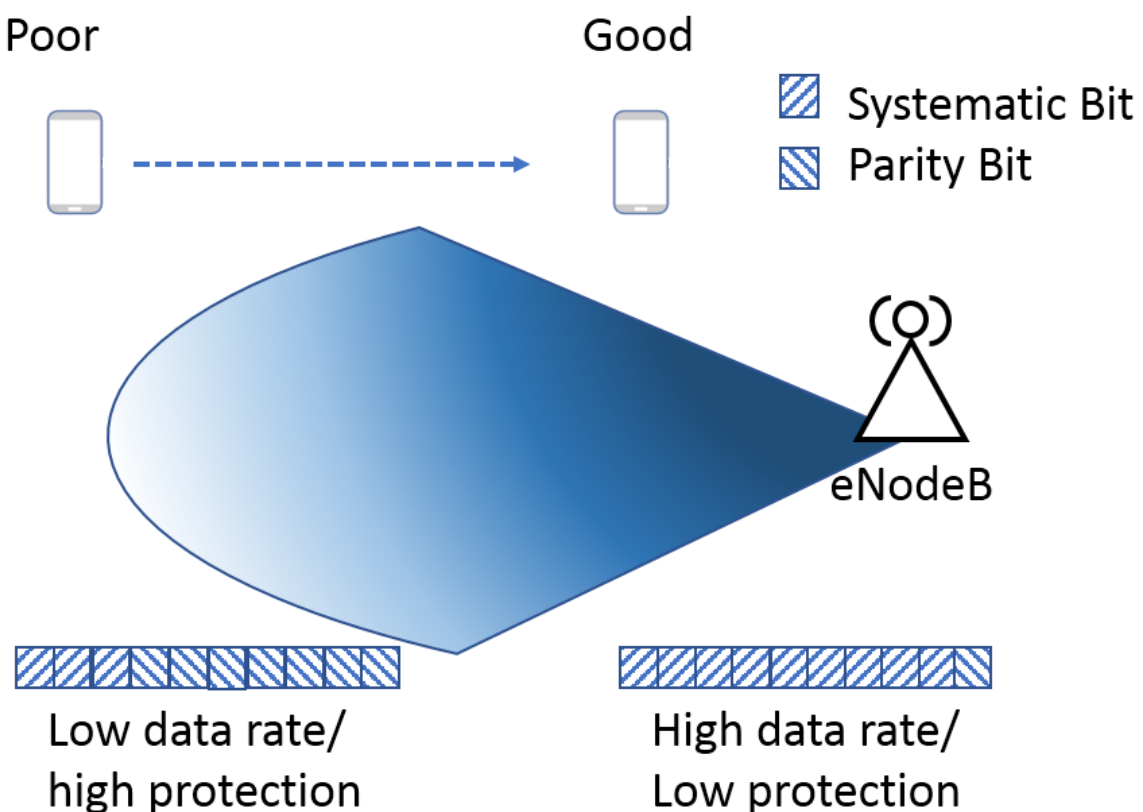


Slika 9. Vrste modulatorskih tehnika podržanih od strane LTE-a. Preuzeto od [13].

Adaptivna modulacija iznad QPSK modulacije se koristi u slučaju loših radijskih uvjeta sa smanjenom propusnosti (slika 10). Kako se radijski uvjeti poboljšavaju 16 i 64 QAM se koriste povećavajući propusnost, te na kraju u dobrim radijskim uvjetima koristi se 256 QAM rezultirajući najvećom propusnosti. [13]

Za provjeru dali su podatci primljeni ispravno, odašiljač dodaje 24-bitni CRC svakom bloku korisničkih podataka prije nego što se kodira. Koder dodaje ekstra paritetne bitove kako bi se omogućilo prijemu ispravak grešaka nastalih u zračnom sučelju. Više poslanih paritetnih bitova znači veću zaštitu od grešaka, ali na trošak smanjenja prijenosa korisničkih podataka. Ovisno o kvaliteti radijskog okruženja paritetni bitovi se mogu maknuti smanjujući zaštitu od pogreške, ali povećavajući brzinu prijenosa korisničkih podataka. ENodeB prilagođava brzinu kodiranja ovisno o kvaliteti radijskog okruženja. U lošim radijskim uvjetima brzina kodiranja će biti sporija što rezultira više s paritetnih bitove od sistematskih bitova, te omogućuje veću zaštitu od grešaka. Kod dobrih radijskih uvjeta brzina kodiranja će biti veća, odnosno više će biti sistematskih bitova od paritetnih omogućujući veće brzine, ali manju razinu zaštite od pogrešaka. ENodeB će prilagoditi modulaciju i kodiranje kako bi omogućio korisničkoj opremi najbolje brzine u raznim radijskim uvjetima zadržavajući prihvatljivi *Bit Error Rate* (BER). [13]

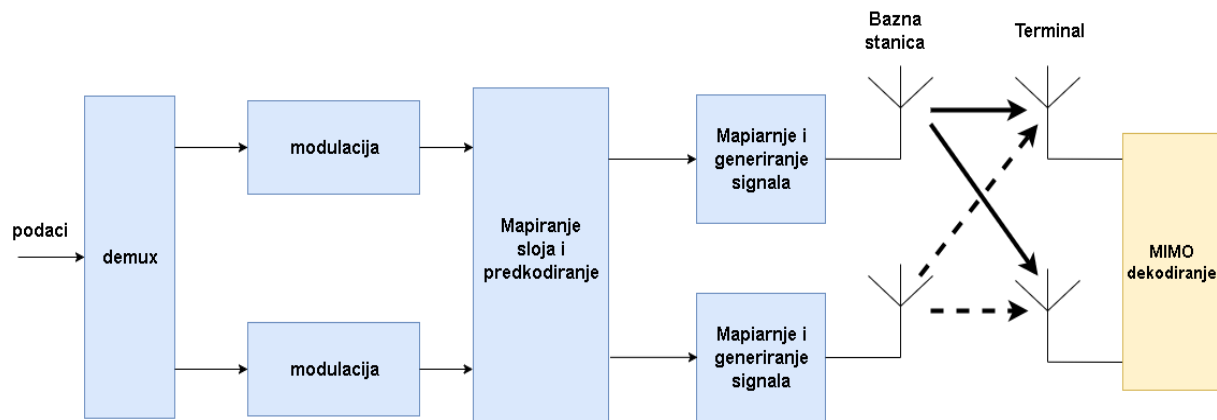
Radio Environment:



Slika 10. Adaptivno kodiranje. Preuzeto od [1].

2.2.7. MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)

LTE specifikacija podržava korištenje *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) tehnike korištenjem više antena na eNodeB-u i UE-u. U prvim LTE izdanjima eNodeB je bio opremljen s dvije transmisijske antene kao i UE s dvije prijemne antene. U lošim radijskim uvjetima obje antene na eNodeB-u se mogu koristiti za slanje istih podataka kako bi se poboljšao prijem na UE-u. Ovakva MIMO tehnika se naziva višestruki prijenos (*Transmit Diversity*). U dobrim radijskim uvjetima svaka transmisijska antena na eNodeB-u se može koristiti za prijenos različitih tokova podataka UE-u. U ovom slučaju MIMO koristi tehniku prostornog multipleksiranja (*Spatial Multiplexing*) koja povećava propusnost. U teoriji MIMO tehnika omogućuje brzine multiplicirane za broj MIMO slojeva koji se koriste (2x2, 4x4). S obzirom na to da korisnička oprema ima samo jednu transmisijsku antenu MIMO tehnika se ne koristi na *Uplinku*. [13]



Slika 11. MIMO koncept. Preuzeto od [13].

Osnovno MIMO načelo prikazano je na slici 11 gdje se 2 različita modulirana toka podataka dovode na sklop za predkodiranje, a zatim na sklop koji obavlja mapiranje i generiranje OFDM signala. Referentni simboli omogućuju prijemu da razdvoji ta 2 toka podataka. No potrebno je onemogućiti slučaj u kojem bi odašiljanje signala s druge antene moglo ometi ispravnu procjenu kvalitete signala, a koja je potrebna za razdvajanje tokova podataka. Zbog toga je potrebno da pojedini referentni signal koristi samo jedna odašiljačka antena. Način na koji se to rješava je da se referentni signali i oni neiskorišteni naizmjenično dodjeljuju dvjema antenama. Načelo se može proširiti i na više od dvije antene, a u prvoj verziji LTE sustava podržano je korištenje do 4 antene. S porastom broja antena, zahtijevani SNR povećava i kompleksnost odašiljačko-prijemnih sklopova te povećava duljinu referentnih simbola. [13]

2.2.8. LTE frekvencijski pojasevi

Navedene kalkulacije brzine sve su bazirane na *Frequency Division Duplex-u* (FDD) gdje se nalaze dva odvojena resursna bloka od 20 MHz radijsko frekvencijskog spektra za downlink i uplink kao što je prikazano na sljedećim tablicama. [1]

Tablica 1. LTE frekvencijski pojasevi (1/2). Preuzeto od [1].

Pojas	ID	UL[MHz]	DL [MHz]	1.4	3	5	10	15	20	Duplex
0	900P	890-915	935-960			\	\	\	\	45
1	IMT Core Band	1920-1980	2110-2170			\	\	\	\	190
2	PCS 1900	1850-1910	1930-1990	\	\	\	\	\	\	80
3	GSM 1800	1710-1785	1805-1880	\	\	\	\	\	\	95
4	AWS (US i ostali)	1710-1755	2110-2155	\	\	\	\	\	\	400
5	850	824-849	869-894	\	\	\	\			45
6	850 (Japan #1)	830-840	875-885			\	\			45
7	IMT Extenzija	2500-2570	2620-2690			\	\	\	\	120
8	GSM 900	880-915	925-960	\	\	\				45
9	1700 (Japan)	1750-1785	1845-1880			\	\	\	\	95
10	3G Americas	1710-1770	2110-2170			\	\	\	\	400
11	1500 (Japan)	1428-1453	1476-1501			\	\	\	\	48
12	US 700	698-716	728-746	\	\	\	\			30
13	US 700	777-787	746-756	\	\	\	\			-31
14	US 700	788-798	758-768	\	\	\	\			-30
15,16	Rezervirano	-	-							

Tablica 2. LTE frekvencijski pojasevi (2/2). Preuzeto od [1].

Pojas	ID	UL[MHz]	DL [MHz]	1.4	3	5	10	15	20	Duplex
17	US 700	704-716	734-746			•	•			30
18	IMT Core Band	815-830	860-875			•	•	•		45
19	PCS 1900	830-845	875-890			•	•	•		45
20	GSM 1800	832-862	791-821			•	•	•	•	-41
21	AWS (US i ostali)	1448-1463	1496-1511			•	•	•		48
22	850	3410-3490	3510-3590			•	•	•	•	100
23	850 (Japan #1)	2000-2020	2180-2200	•	•	•	•	•	•	180
24	IMT Extenzija	1627-1661	1525-1559			•	•			98.5
25	GSM 900	1850-1951	1930-1995	•	•	•	•	•	•	80
26	1700 (Japan)	814-849	859-894	•	•	•	•	•		45
27	3G Americas	807-824	852-869	•	•	•	•			45
28	1500 (Japan)	703-748	758-803		•	•	•	•	•	55
29	US 700	N/A	717-728		•	•	•			
30	US 700	2305-2315	2350-2360			•	•			45
31	US 700	426-476	463-468	•	•	•				10
32	Rezervirano	N/A	1452-1496			•	•	•	•	

U nekim slučajevima LTE je isporučen u frekvencijskom pojasu gdje ne postoje dva različita 20 MHz bloka radijsko frekvencijskog spektra za *Downlink* i *Uplink*. U takvim frekvencijskim pojasevima prikazanim u tablici 3, *Time Division Duplex* (TDD) kod izmjene *Downlink*-a i *Uplink*-a koristi isti radijsko frekvencijski spektar. [1]

Tablica 3. LTE TDD frekvencijski pojasevi. Preuzeto od [1].

Pojas	ID	Frekvencija [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
33	TDD 2000	1900-1920			•	•	•	•
34	TDD 2000	2010-2025			•	•	•	
35	TDD 1900	1850-1910	•	•	•	•	•	•
36	TDD 1900	1930-1990	•	•	•	•	•	•
37	PCS Center Gap	1910-1930			•	•	•	•
38	IMT Extension Center Gap	2570-2620			•	•	•	•
39	China TDD	1880-1920			•	•	•	•
40	2.3 TDD	2300-2400			•	•	•	•
41	US 2600	2496-2690			•	•	•	•
42	3500	3400-3600			•	•	•	•
43	3700	3600-3800			•	•	•	•
44	APT700 LTE	698-806		•	•	•	•	•

3. PLANIRANJE LTE MREŽE

Planiranje radijske mreže je jedan od najbitnijih koraka u planiranju mobilnih mreža. Glavni cilj planiranja radijske mreže je pružanje isplativog rješenja za razvoj radijske mreže u smislu pokrivenosti, kapaciteta mreže i kvalitete. Određivanje optimalnog broja baznih stanica i njihovih lokacija, odabir vrste antena i njihovih snaga, određivanje propagacijskih modela u odnosu na okruženje neki su od glavnih elemenata planiranja radijskog dijela LTE mreža. Proces planiranja radijske mreže varira ovisno o lokaciji i dominantnom faktoru (kapacitet ili pokrivenost). Planiranje radijskog dijela mreže je podijeljeno u više faze planiranja, ali većina literature ističe osnovna tri koraka. Ta tri glavna koraka planiranja radijskog dijela LTE mreže su, prema [3]:

- **Dimenzioniranje:** Proces faze dimenzioniranja se bavi određivanjem odgovarajućeg broja baznih stanica kako bi se ispunili svi zahtjevi QoS-a. Rezultat ove faze je približni broj potrebnih mrežnih elemenata i njihova konfiguracija koja omogućuje uslugu za određen broj korisnika na području s određenim QoS-om i u određenom vremenskom razdoblju. Određivanje kriterija planiranja i odabira parametara treba napraviti prije procesa određivanja pokrivenosti, kapaciteta i kvalitete usluge.
- **Detaljno planiranje:** Ova faza planiranja obično započinje s testiranjima na terenu gdje bi bazna stanica trebala biti postavljena. Ovakva testiranja bi trebala pomoći pri verificiranju ponašanja sustava u stvarnom okruženju. Pretpostavke o usmjerenosti antena, razini snage, nagibu antene samo su neki od faktora koji se mogu testirati u ovoj fazi planiranja. U ovoj fazi se koriste razna profesionalna softverska rješenja kojim se mogu simulirati isplanirani sustavi. Takva softverska rješenja zahtijevaju digitalnu kartu terena s obzirom na topologiju okruženja i odabir odgovarajućeg propagacijskog modela. Rezultat ove faze planiranja su točna pozicija bazne stanice i veličine svih parametara vezanih uz nju.
- **Optimizacija:** Ova faza planiranja uključuje analizu mrežnih performansi. Sukladno rezultatima te analize postavljaju se pojedini parametri kao što su snaga antene, visina na kojoj se nalazi i sl. Ovaj proces se ponavlja sve dok se ne postignu zadovoljavajući rezultati, odnosno performanse mreže dosegnu optimalnu razinu. Maksimalna pokrivenost, kvaliteta, kapaciteti i performanse mreže ovise o vendoru. Sukladno tome i broj potrebnih mrežnih nodova može varirati ovisno o vendoru. Također razne vrste usluga zahtijevaju različitu kvalitetu, te se i to treba uzeti u obzir u optimizaciji.

Nakon završetka navedenih faza planiranja LTE radijske mreže potrebno je obaviti nekoliko bitnih zadataka kako bi se osigurale optimalne performanse u smislu kvalitete, efikasnosti i kapaciteta. Najbitniji zadatak je dobro isplanirati i razlikovati faktore koji utječu na planiranje na direktan ili indirektan način. Proces planiranja uključuje dizajniranje mrežne strukture i njene konfiguracije kako bi se ispunila očekivanja pružatelja usluge, operatora ili samog korisnika. Najveći problem predstavlja optimizacija zahtjeva od sve tri navedene interesne skupine. [3]

Osnovni zahtjevi mobilnih mreža su usklađivanje triju glavnih parametara: pokrivenosti, kapaciteta i kvalitete usluge. O ovim zahtjevima ovisi kako će krajnji korisnik "doživjeti" mrežu. Analiza tržišta, ekonomskih i socijalnih ponašanja korisnika se trebaju proučavati kako bi se moglo što bolje isplanirati mreža. Područje gdje se planira mreža i ljudi koji će je koristiti trebaju biti precizno identificirani kako bi se moglo što bolje isplanirati pokrivenost, kapaciteti i vrste usluga. Samo ekonomsko stajalište zemlje i ljudi, te tehnološka razvijenost područja na kojem se planira može se uzeti u obzir. Prema tim podacima možemo pretpostaviti i u kojem smjeru razvijati mrežu u budućnosti. U suštini proces planiranja radijskog dijela mreže biti vođen razvojem kapaciteta ili razvojem pokrivenosti. [3]

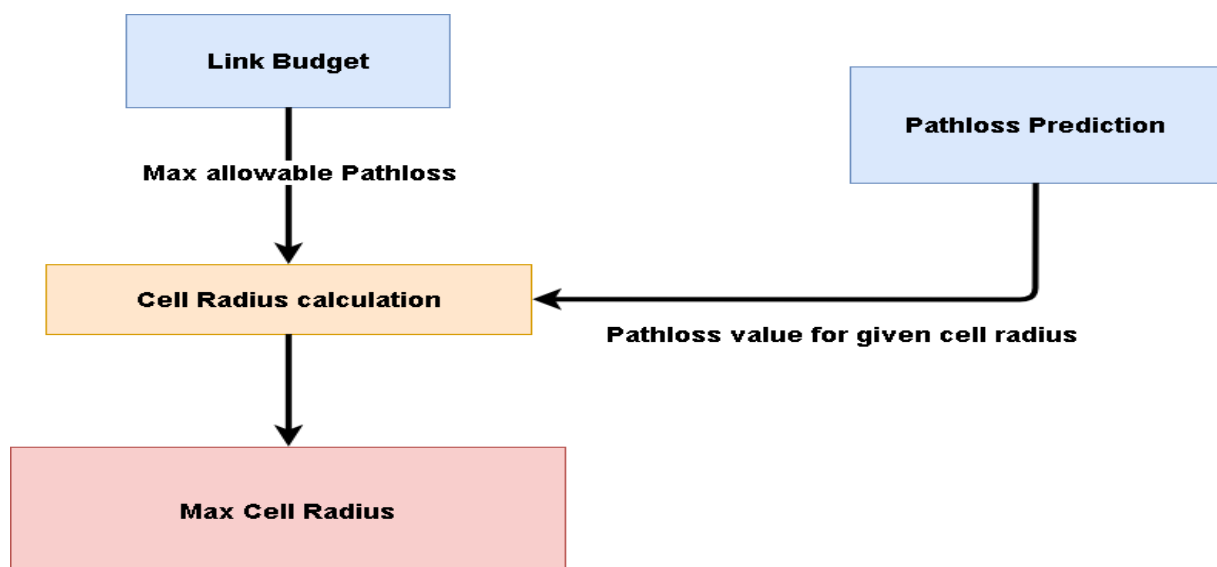
3.1.Nominalno planiranje LTE radijske mreže

Planiranje nominalne radijske mreže je jedan od najbitnijih koraka u planiranju i on uključuje analize pokrivenosti, predviđanja kapaciteta, planiranje frekvencija i proračun radijskog linka. Bilo da se radi o nadogradnji postojeće GSM, UMTS (*eng. Universal Mobile Telecommunications System*) mreže ili izgradnji potpuno nove mreže. Planiranje LTE mreže ostvaruje se putem kompjuterskih simulacija i širokom analizom algoritama uključenih u taj proces. Navedeni algoritmi izračunavaju karakteristike mreže koja se planira iz modela s stvarnim okruženjem i ponašanjima korisnika. S obzirom na to da o kvaliteti modeliranja ovisi aplikabilnost i konzistencija prikupljenih rezultata ona mora biti što preciznija. Dimenzioniranje radijske LTE mreže provodi se kroz dvije metode. U prvoj metodi promatra se maksimalno dopušteno opterećenje sustava, te je njime određuje gustoća rasporeda baznih stanica kroz proračun radijskog linka. Ova metoda se naziva ograničeno planiranje pokrivenosti. Proračun pokrivenosti se dobiva kroz kalkulaciju proračuna radijskog linka koji prinosi broju baznih stanica odnosno samom radijusu ćelija. Ovisno o prikupljenim podacima o radijusu ćelije dobiva se maksimalno dopušteno opterećenje koje je korisno u predviđanju broja korisnika koji mogu biti podržani. Druga metoda dimenzioniranja se naziva kapacitetno ograničeno planiranje. U ovoj metodi se koriste podatci o profilu krajnjeg korisnika kako bi se odredila gustoća rasprostranjenosti baznih stanica. Ova metoda zahtjeva specifikaciju profila prometa koji opterećuje mrežu, uključujući brzine prijenosa podataka i zahtjeve za određivanje pokrivenosti zajedno s maksimalnim opterećenjem sustava. Prometni profil svakog korisnika se koristi kako bi se odredilo dali se prekoračuje dopušteno opterećenje sustava. [3]

3.2. Planiranje pokrivenosti

Planiranje pokrivenosti je prvi korak u procesu dimenzioniranja LTE mreža. Planiranje pokrivenosti nam daje rezultate o resursima potrebnim za omogućavanje usluge sa zadanim sistemskim parametrima bez obzira na kapacitet. Planiranje pokrivenosti se sastoji od evaluacije proračuna *Downlink* i *Uplink* radijskih linkova. Kod LTE planiranja pokrivenosti, područje pokrivenosti se određuje iz predefiniраниh predviđanja gubitaka na putu (*path loss*). Ova tehnika ne uključuje vrstu distribucije prometa ali daje početnu procjenu generalno o pokrivenosti koja može biti postignuta s određenim kapacitetom. Cilj planiranja pokrivenosti je pronaći optimalne lokacije za postavljanje baznih stanica kako bi se omogućila stalna pokrivenost. Maksimalni gubitci na putu se izračunavaju ovisno o potrebnoj SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) razini na prijammniku, uzimajući u obzir interferenciju nastalu zbog prometa. [3]

Planiranje pokrivenosti se izvodi pomoću proračuna razine veze i proračuna gubitaka na putu (slika 12). S obzirom na to da je limitirajući faktor kod planiranja pokrivenosti *Uplink* smjer, potrebno je obaviti proračun te veze unaprijed kako bi se mogao izračunati maksimalni gubitak na putu. Taj proračun uključuje ukupnu interferenciju i sumu svih mogućih sustavnih gubitaka nastalih zbog okoline ili hardverskih parametara bazne stanice i korisničke opreme. Uzimajući u obzir *Uplink* opterećenje ćelije i maksimalne prikupljene dopuštene gubitke na putu, računaju se *Downlink* SNR (*eng. Signal to Noise Ratio*) i radijus ćelije ovisno o odabranom propagacijskom modelu. Odabir propagacijskog modela je obavlja tako da se razmatraju parametri planiranja kao što su frekvencija, makro/mikro okruženje ćelije, visina na kojoj se nalazi antena bazne stanice. Stvarni podatci iz okruženja, empirijski modeli gubitaka na putu i maksimalni dopušteni gubitci na putu dobiveni iz proračuna linka omogućuju procjenu radijusa ćelije. [3]



Slika 12. Koncept planiranja pokrivenosti. Preuzeto od [3].

3.2.1. Proračun radijskog linka

Proračun radijskog linka se računa kako bi se procijenili dopušteni gubitci na putu. U ovaj proračun uključeni su transmisijska snaga, dobitci antene, margine *fading*-a itd. Snaga transmisijske je maksimalna snaga bazne stanice (eNB) za makro ćelije reda veličine 43-46 dBm na anteni, a kod korisničke opreme (UE) maksimalne transmisijske snage 23 dBm. Dobitak antene u najvećoj mjeri ovisi o frekvenciji, veličini antene i vrsti mobilnog uređaja. Tipična antena na baznoj stanici ima dobitak oko 15-18 dBi-a. Dobitak antene kod korisničke opreme najviše ovisi o vrsti uređaja i varira između -5 dBi i 10 dBi. Pod gubitke spadaju gubitci na kablovima i gubitci na samim baznim stanicama odnosno korisničkoj opremi. Gubitci na kabelu su gubitci između antene i niskopojasnog pojačala koji ovise o duljini kabela, vrsti kabela i frekvencijskom pojasu. Vrijednost gubitaka na kabelu iznosi 1-6 dB za baznu stanicu i 0 dB kod korisničke opreme. [6]

Proračun radijskog linka govori koji preneseni signal slabi prije nego je primljen na stranu prijamnika. Rezultati vrijede za sve dobitke i gubitke kao što su propagacijski gubitci i dobitci antene na putu do prijamnika. Proračun radijskog linka daje gubitke na putu za *Uplink* i *Downlink* što daje mogućnost balansiranja prijenosa i prijama tokova podataka kako bi se poboljšao QoS. Jednadžba za proračun radijskog linka u LTE mreže je, prema [6]:

$$\begin{aligned} PathLoss_{dB} = & TxPower_{dB} + TxGains_{dB} - TxLosses_{dB} - RequiredSINR_{dB} \\ & + RxGains_{dB} - RxLosses_{dB} - RxNoisedB \end{aligned} \quad (1)$$

Gdje je:

- PathLoss = Ukupni gubitci na putu nastali na putu odašiljača do prijamnika (W)
- TxPower_{dB} = Snaga odašiljačke antene (dBm)
- TxGains_{dB} = Dobitak odašiljačke antene (dB)
- TxLosses_{dB} = Gubitci odašiljača (dB)
- RequiredSINR_{dB} = Minimalni potrebni SINR da bi signal mogao biti primljen s potrebnom razinom snage (dB)
- RxGains_{dB} = Dobitak prijemne antene (dB)
- RxLosses_{dB} = Gubitci prijamnika (dB)
- RXNoise_{dB} = Šum na prijamniku (dBm)

U LTE mrežama osnovni pokazatelj učinka je potrebni SINR. Maksimalni dopušteni gubitci na putu se računaju pomoću jednadžbe, prema [6]:

$$SNIR \geq RequiredSINR$$

$$SINR = \frac{AvgRxPower}{Interference+RxNoise} = \frac{AvgRxPower}{OwnCellInterference+OtherCellInterference+RxNoise} \quad (2)$$

Gdje je:

- SINR = *Signal to interference and noise ratio*
- AvgRxPower = Prosječna snaga na prijatelju (W)
- Interference = Snaga interferencije (W)
- OwnCellInterference = Snaga interferencije vlastite ćelije (W)
- OtherCellInterference = Snaga interferencije nastale zbog susjednih ćelija (W)

Kod *Downlink-a*, ako uzmemo u obzir da je maksimalna dopuštena snaga transmisije podijeljena jednako, prosječna snaga na prijatelju strani (AvgRxPowerDL) alocirana korisniku se računa prema [6]:

$$AvgRxPowerDL = \frac{AvgTxPower}{LinkLossDL} = \frac{MaxNodeBTxPower}{CellBandwidth} * \frac{AllocatedBandwidth}{LinkLossDL} \quad (3)$$

Gdje je:

- SINR = *Signal to interference and noise ratio*
- AvgTxPower = Prosječna snaga transmisije (W)
- LinkLossDL = Ukupni gubitci na putu na *Downlink-u* (W)
- MaxNodeBTxPower = Maksimalna snaga koju transmitira NodeB (W)
- CellBandwidth = Alocirana pojasna širina ćelije u LTE mreži (MHz)
- AllocatedBandwidth = Pojasna širina kanala preko kojeg se šalje signal (MHz)

MaxNodeBTxPower kod LTE mreža ovisi o pojasnoj širini ćelija koja se nalazi u području između 1.25 i 20 MHz. MaxNodeTxPower je 20 Watt-a (43 dBm) za

pojasnu širinu 5MHz i 40 Watt-a (46 dBm) kao maksimalna snaga transmisije bazne stanice. Kod *Uplink-a*, ako uzmemo pretpostavku da se ne koristi kontrola snage, prosječna snaga na prijammniku ($AvgRxPowerUL$) se računa prema [6]:

$$AvgRxPowerUL = \frac{MaxUETxPower}{LinkLossUL} \quad (4)$$

Gdje je:

- $MaxUETxPower$ = Maksimalna snaga transmisije korisničke opreme (W)
- $LinkLossUL$ = Ukupni gubitci na putu u *Uplink-u* (W)

3.2.2. Proračun gubitaka na putu

Proračun gubitaka na putu je jako bitan u početnoj fazi razvoja LTE radijske mreže i planiranja ćelija jer govori o tome na koji način se snaga prijemnog signala degradira u odnosu na prijeđenu udaljenost. Maksimalni dopušteni gubitci na putu između odašiljača i prijammnika se dobiva iz proračuna radijskog linka kako je navedeno u prethodnom poglavlju. Koraci koji slijede nakon proračuna gubitaka na putu su propagacijsko modeliranje i proračun radijusa ćelije. Kako bi se ispravno odabrao propagacijski model koriste se ulazni parametri kao što su geografske informacije i vrste ćelije (makro ćelije, mikro ćelije, piko ćelije). Postoje razni propagacijski modeli koji predviđaju gubitke na putu. [6]

Prema 3GPP specifikaciji, prihvatljivi modeli za LTE mreže su: Hata Model, Okumura Model, COST 231 Hata model i COST 231 Walfish-Ikegami (W-I). Svaki od ovih modela ima svoje prednosti i mane, odnosno ograničenja. Bitno je i razlikovati ulazne parametre i okruženje u kojem se radi planiranje kod odabira propagacijskog modela. Primjerice za gusto urbana područja najpogodniji propagacijski model je COST 231 Hata model, dok je za urbana i sub-urbana područja od ulaznih parametara potrebno samo znati frekvenciju i udaljenost između prijammnika i odašiljača. Propagacijski model COST 231 Walfish-Ikegami (W-I) je pogodan se urbana , sub-urbana i ruralna područja uz dodatak par drugih ulaznih parametara kao što su: visine zgrada u području, visine na kojim se nalaze odašiljači odnosno prijammnici i sl. [6]

Za LTE nominalno planiranje kod računanja gubitaka na putu najpogodniji je COST 231 Hata model jer ne zahtijeva nikakve geografske informacije područja na kojem se izvodi planiranje. COST 231 Walfish-Ikegami model se najčešće koristi za

frekvencijski pojas 900 – 2000 MHz. Ovaj model se može koristiti i za više frekvencije zbog pretpostavke da se gubitci na putu na višim frekvencijama nadoknađuju povećanjem dobitaka antene. Matematička jednadžba ovog modela je različita ako je veza u području optičke vidljivosti, odnosno ako veza nije u području optičke vidljivosti. [6]

Matematička jednadžba glasi, prema[6]:

- Veza u području optičke vidljivosti (LOS):

$$PL_{LOS} = 42.6 + 20 \log d + 20 \log f \quad (1)$$

- Veza izvan područja optičke vidljivosti (NLOS):

$$PL_{NLOS} = \begin{cases} L_{msd} + L_{fsl} + L_{rts} & \text{za urbana i sub - urbana područja} \\ L_{fs} & \text{if } L_{msd} + L_{rts} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Gdje je:

- L_{FSL} = Gubitci slobodnog prostora
- L_{rts} = Difrakcija od krovova
- L_{msd} = Gubitci višestrukog ogiba

Glavni ulazni parametri ovog modela su:

- Frekvencija *f* (između 800 i 2000 MHz)
- Visina na kojoj se nalazi odašiljač (1 - 50 m)
- Visina na kojoj se nalazi prijemnik (1 - 3 m)
- Udaljenost između odašiljača i prijemnika (200 – 5000m)

Gubitci zbog slobodnog prostora se dobivaju iz izračuna, prema [6]:

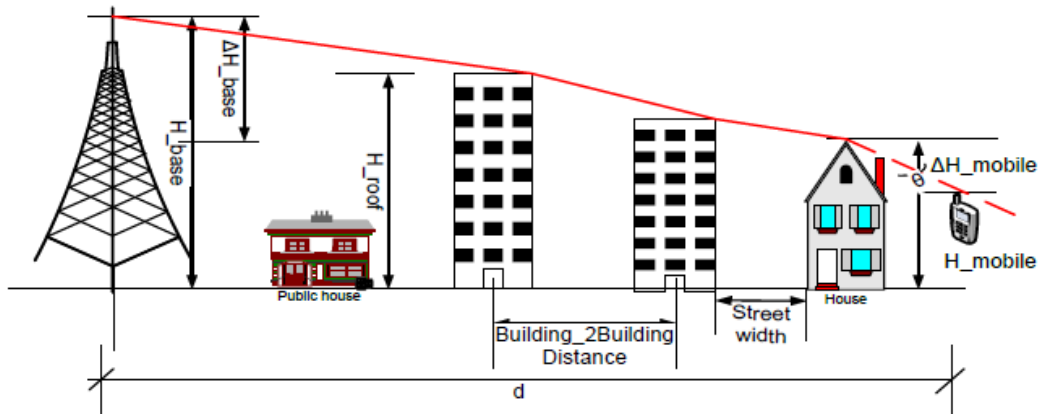
$$L_{FSL} = 32,4 + 20 \log_{10} d + 20 \log_{10} f \quad (3)$$

Gdje je:

- *d* = udaljenost između prijemnika i odašiljača (km)
- *f* = frekvencija (MHz)

Udaljenost između prijemnika i odašiljača se računa u kilometrima a sve ostale udaljenosti u ovom izračunu izražavaju se u metrima (m).

Gubitci zbog difrakcije u smjeru krova prema ulici se računaju uzimajući u obzir širinu ulice i kut upada u odnosu na direktni put radijskog signala (slika 13). [6]



Slika 13. Prikaz faktora koji utječu na proračun gubitaka na putu. Preuzeto od [6].

$$L_{rts} = \begin{cases} -16.9 - 10 \log(\text{širina ulice}) + 10 \log f + 20 \log \Delta H_{mobile} + L_{or} & (4) \\ 0 & h_{roof} > h_{mobile} \end{cases}$$

Gdje je,

$$L_{or} = \begin{cases} -10 + 0.35 \times \theta & \text{for } 0 \leq \theta \leq 35 \\ 2.5 + 0.07 \times (\theta - 35) & \text{for } 35 \leq \theta \leq 55 \\ 4 - 0.11 \times (\theta - 55) & \text{for } 55 \leq \theta \leq 90 \end{cases}$$

Gubitci kod višestrukog ogiba računaju se na sličan način uzimajući u obzir visinu građevine, visinu na kojoj se nalazi mobilna stanica i udaljenost između građevina.

$$L_{msd} = L_{beh} + K_a + (K_d * \log(R)) + (K_f + \log(f)) - (9 * \log(\text{udaljenost između zgrada})) \quad (5)$$

Gdje je:

$$L_{beh} = \begin{cases} -18 \times \log(1 + H_{base}) & H_{base} > H_{roof} \\ 0 & \end{cases} \quad (6)$$

$$Kf = \begin{cases} -4 + 00.7x \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{za urbana i suburbana područja} \\ -4 + 1.5 x \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \end{cases} \quad (7)$$

$$Kd = \begin{cases} 18 & h_{base} > h_{roof} \\ 18 - \left(15 * \frac{Hbase}{Hroof} \right) \end{cases} \quad (8)$$

$$Ka = \begin{cases} 54 & Hbase > Hroof \\ 54 - 0.8 * Hbase & R \geq 0.5 \text{ i } Hbase \leq Hroof \\ 54 - 0.8 * \left(\frac{Hbase}{0.5} \right) * R \end{cases} \quad (9)$$

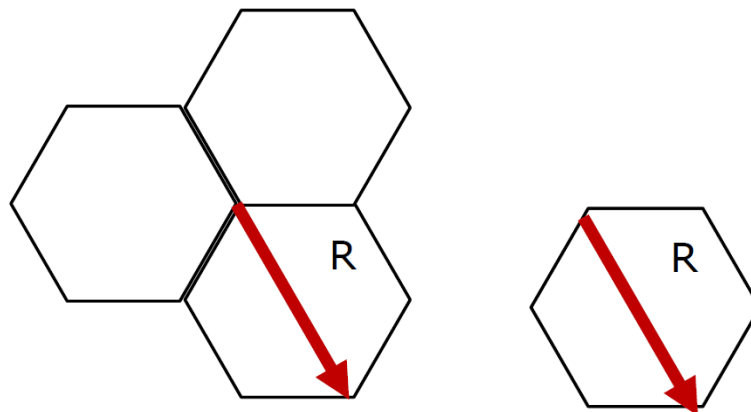
Koristeći se gore navedenim formulama, propagacijski gubitci se računaju od odašiljača prema prijarnika. Kako vidimo propagacijski gubitci ovise o parametrima poput: visine zgrade, udaljenosti između zgrada, širini ulice, visina na kojoj se nalazi odašiljač i prijernik, frekvencija transmisije i udaljenost između odašiljača i prijernika. [6]

3.2.3. Proračun radijusa baznih stanica

Maksimalni dopušteni gubitci na putu koji se prikupe kroz proračun radijskog linka mogu se koristiti kako bi se odredio radijus ćelije koristeći se propagacijskim modelom. Koristeći se propagacijskim modelom COST231 W-I može se odabrati specifični tlocrtni model područja za bolji proračun radijusa. Sljedeći korak je proces prilagođavanja krivulje kako bi se izračunao radijus ćelije. Ovaj proces se sastoji od konstrukcije krivulje, odnosno odabira matematičke funkcije koje se najbolje poklapa sa serijom točaka podataka. Matematički izraz za prilagođavanje diskretnom gubitku na putu je polinom drugog stupnja i glasi, prema [6]:

$$\text{Cellradius} = a(\text{pathloss})^2 + b(\text{pathloss}) + c \quad (1)$$

S izračunatim radijusom ćelije, pokrivenost ćelije se računa u odnosu na predviđenu strukturu i vrstu ćelije. Struktura ćelije može biti kružna ili heksagonalna. Obje strukture idealno reprezentiraju pokrivenost, razlika je u tome što kružna pruža jednostavniju analizu, a heksagonalna se bolje prilagođava prostoru ne ostavljajući nikakav prostor između ćelija. Postoji više vrsta ćelija, a najčešće se koriste Omni-usmjerena i tro-usmjerena vrste (slika 14). [6]



Slika 14. Prikaz Omni-usmjerenih i tro-usmjerenih ćelija. Preuzeto od [6].

Izračun za navedene vrste ćelija je sljedeći, prema [6]:

- Omni-usmjereni tip ćelije $area = \frac{9}{8} \sqrt{3} R^2$
- Tro-usmjereni tip ćelije $area = \frac{3}{2} \sqrt{3} R^2$

3.3. Planiranje kapaciteta

Kod LTE planiranja radijske mreže, osim planiranja pokrivenosti treba uzeti u obzir i faktore planiranja kapaciteta. Radijski resursi su potrebni da maksimalno podržavaju korisnike s određenom razinom QoS-a (*eng. Quality of Service*). Planiranje kapaciteta omogućuje procjenu potrebnih resursa za održavanje ponuđenog prometa uz određenu razinu kvalitete usluge. Teoretski kapacitet mreže je ograničen brojem eNodeB-ova u mreži. Na kapacitet ćelije kod LTE mreža utječu brojni faktori kao što su: razine interferencije, vrsta podržane modulacije, vrste kodiranja i sl. Proračun radijskog linka određuje maksimalne gubitke na putu i maksimalni radijus ćelije, dok planiranje pokrivenosti uzima u obzir interferenciju nudeći pogodne modele. Povećanje interferencije i šumova s rastom broja korisnika koji su spojeni na baznu stanicu smanjuje radijus ćelije, a samim time i pokrivenost ćelije. Zračno sučelje određuje radijske resurse koje svaka korisnička oprema može zaprimiti. Veća iskorištenost zračnih resursa rezultira manjom prosječnom propusnosti pojedine korisničke opreme zbog zakrčenosti zračnog sučelja. Kako bi odredili performanse ćelije potrebno je ispravno modelirati uzimajući u obzir sve navedene činjenice. Radi pojednostavljenja proces planiranja kapaciteta LTE mreža dijelimo na, prema [3]:

- Planiranje kapaciteta jednog eNodeB-a koristeći se prometnom analizom ili procjenom SNIR-a (*eng. Signal to Noise plus Interference Ratio*).
- Procjenom prosječnog broja mobilnih pretplatnika koji mogu biti posluženi u ćeliji.

Planiranje kapaciteta uzima u obzir interferenciju signala, a rezultati se predaju eNodeB-u zajedno s informacijama o očekivanom ponuđenom prometu i maksimalnoj propusnosti ćelije. Kako bi se došlo do navedenih rezultata, mogu se koristiti teoretske simulacije ili predviđanja prometa. [3]

LTE teoretske simulacije uzimaju u obzir glavni indikator kapaciteta, SINR distribuciju. Ova metoda planiranja kapaciteta ima cilj procijeniti propusnost ćelije koja odgovara postavkama i prosječnom prometnom opterećenju s prihvatljivom razinom kvalitete usluge. Prometno zahtjevno planiranje kapaciteta je realističnije i ovisi o prognoziranom korisniku i količini korištenja usluge u određenom periodu. Ključna stvar je određivanje potrebne brzine i predviđanje načina na koji će korisnik koristiti mrežu uključujući klasifikaciju korisnika sustava u različite kategorije. [3]

3.3.1. SINR planiranje kapaciteta

Ova metoda za planiranje kapaciteta i evaluaciju kapaciteta ćelije je teoretska, odnosno izvršava se pomoću simulacija. Na kapacitet ćelija u LTE mrežama utječe veliki niz faktora, a samo neki od njih su: interferencijska razina, vrsta modulacije, vrsta kodiranja itd. U proces planiranja kapaciteta treba uzeti u obzir i okoline s različitim propagacijama, odnosno propagacijskim modelima, različite modele kanala i konfiguracije antena. Sve simulacije se odrađuju uzimajući u obzir navedene faktore i SINR distribuciju. Ćelijska SINR distribucijska tablica iz koje su vidljive vjerojatnosti pojavljivanja zadane SINR veličine na rubu ćelije je direktno mapirana uz prosječnu propusnost. Iz odnosa navedene tablice i tablice koja prikazuje prosječni SINR dobivaju se propusnosti vezane za određeni SINR. Obe tablice se dobivaju iz simulacija na razini sustava, odnosno razini linka. Obe vrste simulacije zahtijevaju predefiniране parametre kao što su frekvencija transmisije, broj odašiljačkih i prijemnih antena, model kanala, propagacijski model itd. Vrlo je bitno kod simulacija na razini sustava uzeti u obzir i udaljenost između baznih stanica. [6]

Simulacije na razini linka su pogodne za konstruiranje odašiljačkih i prijemnih struktura, modulacijskih shema i shema za kodiranje. Simulacije na razini sustava reflektiraju utjecaj problematike planiranja ćelije i interferencije. Brzina bit-a po simbolu za *Uplnik* i *Downlnik* ovisit će o kvaliteti radijskog signala. Razine kvalitete radijskog signala je izražena kroz CQI (*eng. Channel Quality Indicator*) indeks. CQI indeks ima raspon od 1 do 15 s tim da 1 označava najniži indeks kvalitete kanala, a 15 najviši indeks kvalitete kanala. Ovisno o CQI vrijednosti, brzine kodiranja se određuju bazirano na vrsti modulacije (QPSK, 16QAM, 64 QAM) i količini redundancije. Korištenje svih navedenih vrsta modulacija ovisi o snazi na svakoj točki u području pokrivenosti. U LTE mrežama, sustav pokušava dodijeliti najveću razinu modulacije svakom pretplatniku kako bi se maksimizirala sveukupna propusnost. [6]

Tablica 4. CQI tablica s odgovarajućim SINR vrijednostima. Preuzeto od [6].

CQI	MCS , coding rate (x 1024)	SNR[dB]	Date rate [Mbps]	
4	QPSK	308	-2	3.360373
6	QPSK	602	2	6.733788
8	16 QAM	490	6	11.77152
9	16 QAM	616	8	14.79935
10	64 QAM	466	10	18.06857
12	64 QAM	666	14	25.07336

SINR vrijednosti koje podržavaju pojedine MCS-ove (*eng. Modulation and Coding Schemes*) se referenciraju na SINR distribucijsku tablicu. SINR distribucijska tablica prikazuje SINR vjerojatnosti dobivene iz proračuna vjerojatnosti pojavljivanja pojedine SINR vrijednosti na rubu ćelije. Minimalni dopušteni SINR određuje koja će se modulacijska shema koristiti. Prosječna propusnost ćelije se može izračunati iz SINR vjerojatnosti na način, prema [3]:

$$Cell_{Throughput} = \sum(allSINR_{values})(SINR\ occurrence_{propability} \times AverageThroughput_{SINR}) \quad (1)$$

Gdje je:

- SINR occurrence_{propability} ; vjerojatnost pojave određene vrijednosti SINR-a na rubu ćelije dobivene kroz simulacije
- AverageThroughput_{SINR} ; prosječna vrijednost propusnosti u odnosu na SINR vrijednost dobivene Shannon-ovim teoremom;

$$AverageThroughput_{SINR} \left(\frac{bits}{sec} \right) = BW \times BW_{eff} \times \eta \times \log_2 \left(1 + \frac{SNR}{SNR_{eff}} \right) \quad (2)$$

Gdje je:

- BW: Širina frekvencijskog pojasa.
- BW_{eff}: Efikasnost širine frekvencijskog pojasa.
- SNR_{eff}: Efikasnost SNR-a.
- η: konstanta.

3.3.2. Planiranje kapaciteta metodom analize prometa

Jedan od glavnih faktora koji utječu na planiranje kapaciteta su zahtjevi prometa korisnika. Bitno je razlikovati vrstu prometa korisnika. Poznato je da distribucija prometa nije ujednačena. Često postoje ćelije u kojim se generira više prometa i dosežu svoju gornju granicu kapaciteta prije nego druge ćelije koje rade s manjim količinama prometa. S obzirom na nekonstantnost prometa, vrlo je bitno uzeti ispravno prometne faktore i uključiti njih u sam proces planiranja kapaciteta. Faktori koji se uzimaju u obzir kod planiranja kapaciteta LTE mreža su, prema [6]:

- Analiza glavnog prometnog sata: potražnja za prometnom distribucijom određene usluge u najprometnijem dijelu dana.
- Vršne i prosječne brzine.
- Gustoća i vrsta pretplatnika.
- Količina prometa po pretplatniku.

Dvije su glavne vrste prometa: elastični promet i stvarno vremenski promet. Elastični promet se generira od strane non-real-time aplikacija i najčešće je transportiran od strane TCP (*eng. Transfer Control Protocol*) protokola. TCP protokol omogućuje paketima koji nisu bili u mogućnosti biti poslani zbog ograničenja kapaciteta retransmisiju, odnosno ponovno slanje kada se kapacitet oslobodi. Takvi paketi će kasniti, ali za ovu vrstu prometa to i nije bitno. Stvarno vremenski (*real time*) promet je generiran od strane *real time* aplikacija koje su osjetljive na kašnjenje. Tipični primjeri *real time* aplikacija su streaming, video streaming i VoIP. Podatci o vrsti prometa i njegovim parametrima su bitni kako bi se odredio broj korisnika kojih jedan eNodeB može podržavati i prosječno opterećenje noda. Distribucija aplikacija koja će se koristiti se može uz analizu i pretpostavku trendova tržišta i korisnika približno predvidjeti. Najzastupljenije aplikacije koje se koriste u LTE mrežama su VoIP, streaming, video streaming, Web pretraživanje, video konferencije, prijenos podataka i sl. Svaka od navedenih aplikacije ima drugačiji QoS. Parametri koji određuju QoS su kašnjenje, jitter, BER (*eng. Bit Error Rate*), minimalna propusnost, vjerojatnost gubitka paketa i sl. Različiti se parametri koriste pri kalkulaciju QoS-a ovisno o vrsti aplikacije (tablica 5). Za besprijekornu vezu na rubu ćelije, minimalni kriterij je bar održati vezu za real time aplikacije kao što je VoIP. U tablici 5 su prikazane maksimalne vrijednosti kašnjenja i maksimalne vjerojatnosti gubitaka paketa vezane za određene real time i non real time aplikacije. [6]

Tablica 5. QoS parametri i distribucija prometa za određene vrste aplikacija.
Preuzeto od [6].

Vrsta prometa	Kašnjenje	Prioritet	Aplikacije	Vjerojatnost gubitka paketa
Real-time	100 ms	1	VoIP	10^{-2}
Real-time	150 ms	2	Video poziv	10^{-3}
Real-time	300 ms	3	Streaming	10^{-6}
Non-real-time	100 ms	4	Interaktivno igranje igrica	10^{-3}
Non-real-time	-	5	Pretraživanje Web-a, file transfer, email	-

Uzimajući u obzir da svi UE-ovi u ćeliji posluženi s različitim prioritetima i bez maksimalnog ograničenja nosioca za svaki pojedinačni tok M/G/1 (s prioritetom) prometno modeliranje se može koristiti. Model M/G/1 se koristi kod paketskih mreža i slučajeva kada tok podataka nije ograničen. Prosječno prometno opterećenje se može izračunati prema formuli [6]:

$$delay_{transmission} = \left(\frac{Data_{size}}{Max_{bitrate}} \right) \times \left(1 + \frac{Ec(traffic_{offered_intensity})}{1 - traffic_{offered_intensity}} \right) \quad (1)$$

Gdje se E_c dobiva iz Erlang C formule.

$$traffic_{offered_intensity} = \frac{\sum_{i=1}^{Total\ active\ UEs} Data_{size(i)} \times intensity_{userCalls}}{Max\ bitrate} \quad (2)$$

S obzirom na to da eNodeB može održavati približno oko 60 aktivnih poziva po ćeliji gdje je zaprimljeno 10 zahtjeva za uslugom po sekundi M/G/1 model se može koristiti u planiranju LTE mreža s prihvatljivim kašnjenjima. Prosječno opterećenje koje se dobiva iz navedene formule služi za dimenzioniranje kapaciteta ćelije. Planiranje je napravljeno s maksimalnim opterećenjem kada potpuno iskoriste svi resursi u ćeliji. Kako bi se održao zadovoljavajući QoS preporučuje se da

opterećenje ćelije nije veće od 85%. Maksimalna prosječna propusnost korisničke opreme se računa prema [6]:

$$AverageThroughput_{SINR} = \frac{Average\ traffic_{load} \left(\frac{bits}{sec}\right)}{Utilization_{factor}} \quad (3)$$

S obzirom na to da se planiranje sa SNIR distribucijom zasnovano na potpuno teoretičkim simulacijama, najbolje bi bilo uzeti rezultate obje metode kako bi se dobili što bolji i realističniji podatci o prosječnoj propusnosti ćelije. Prosječna propusnost ćelije se dobiva prema formuli [6]:

$$Average_{CellThroughput} = (\alpha \times CellThroughput_{simulation}) + (\beta \times CellThroughput_{traffic}) \quad (4)$$

Gdje je:

- $CellThroughput_{simulation}$: prosječna propusnost dobivena iz simulacija sustava i linka.
- $CellThroughput_{traffic}$: prosječna propusnost dobivena iz analize prometa.
- α i β : konstante koje imaju vrijednost između 0 i 1.

Nakon određivanja prosječne propusnosti ćelije slijedi određivanje broja korisnika. Preračun propusnosti ćelije u maksimalni broj pretplatnika se izračunavao kako bi dobili ukupan broj korisnika koji ćelija može posluživati. Ukupan broj pretplatnika se računa prema [3]:

$$Subscribers_{site} = \frac{((Cell_{loading} * Peak_{Throughput}) * sector)}{\left(\frac{1 + Peak_{toAverage}}{DLThroughput_{user}}\right)} \quad (5)$$

Ukupan broj baznih stanica se može izračunati iz broja ljudi koji žive na tom području, odnosno očekivanog ili predviđenog broja pretplatnika prema [3]:

$$Total_{Number}Sites = \frac{TotalPolulation_{Number}}{Subscribers_{site}} \quad (6)$$

4. INTERFERENCIJA I REUPORABA FREKVENCIJE

Kod LTE proračuna linka, interferencija se odnosi na ukupnu interferenciju između odašiljača i prijemnika. Generalno interferencija može biti prouzročena od strane korisnika iste ćelije, te se takva interferencija naziva intra-ćelijska interferencija. Interferencija također može nastati kao rezultat korištenja frekvencije od strane više korisnika na različitim mobilnim sustavima. [6]

Kako bi se evaluirala interferencija drugih ćelija koristi se jednostavni mrežni model u kojem je opterećenje jednako distribuirano u svim ćelijama. Ukupni efekt interferencije se može odrediti prema sljedećim faktorima, prema [6]:

- G faktor koji nastaje zbog handover preklapanja margina (*eng. Cell Overlap Margin*). Distribucija G faktora se definira kao prosječna vlastita snaga ćelije prema drugoj ćeliji plus omjer šuma. Posluživajuća ćelija ne mora imati nominalno veću snagu.
- Dobitak nastao zbog interferencijskih kontrolnih mehanizama IntControlGain (*eng. Soft Frequency Reuse or Smart Frequency Domain Packet Scheduler*).
- Prilagodba kontrole snage s kojom se omogućuje dobar balans između propusnosti na samim rubovima ćelije i prosječne propusnosti.

Interferencijska margina se računa prema sljedećem izrazu, prema [6]:

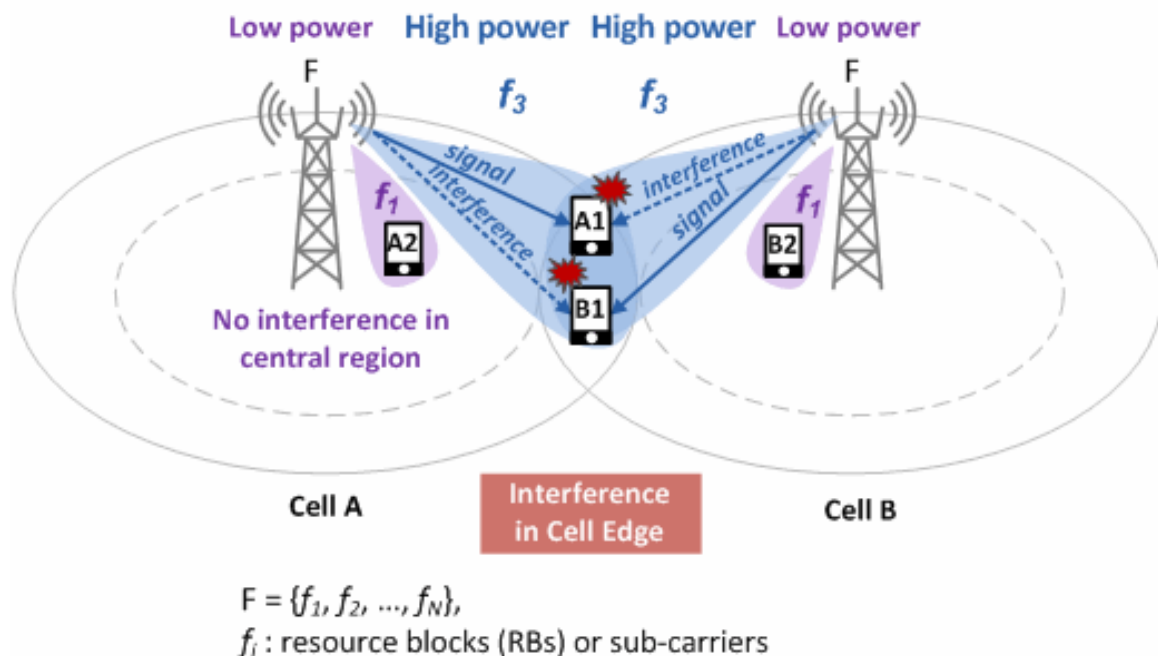
$$InterferenceMargin = \frac{SNR}{SINR} \quad (1)$$

Tablica 6. Odnos interferencijskih margina i opterećenja. Preuzeto od [6].

Opterećenje (%)	Interferencijska margina (dB)
35	1
40	1.3
50	1.8
60	2.4
70	2.9
80	3.3
90	3.7
100	4.2

Kod 2G i 3G mreža kontroleri baznih stanica su bili zaduženi za kontrolu interferenciju između ćelija. Kod LTE mreža interferencija između ćelija je kontrolirana koordinacijom interferencije između samih baznih stanica, odnosno ICIC-om (eng. *Inter-Cell Interference Coordination*) (slika 15). Ovakva koordinacije je moguća zbog uporabe X2 radijskog sučelja između baznih stanica. Razmjenom informacija o interferenciji preko X2 radijskog sučelja bazne stanice mogu rasporediti radijske resurse tako da se izbjegne interferencija između ćelija. Postoji nekoliko tehnika koordinacije interferencija kod LTE mreža, prema [3]:

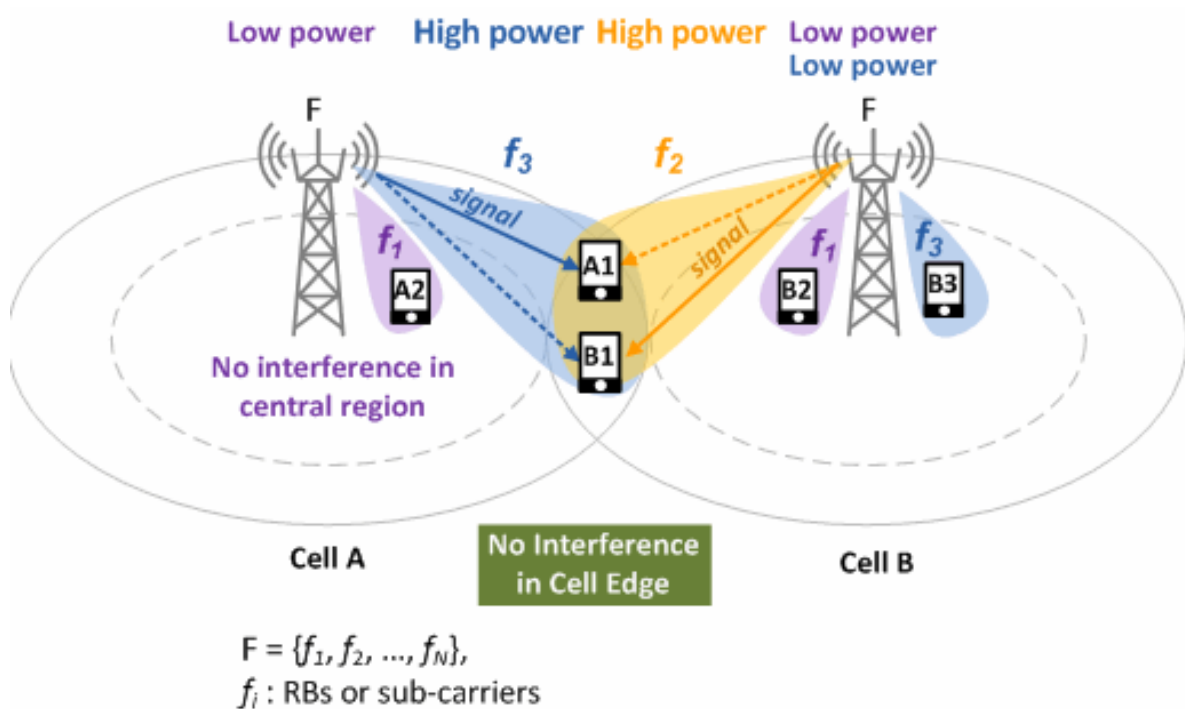
- ICIC: *Inter-Cell Interference Coordination*
- Enhanced ICIC (eICIC): unaprijeđena verzija ICIC-a koja koristi informacije o statusu kanala (CSI) koje dobiva od strane korisničke opreme za bolju koordinaciju interferencije između ćelija.



Slika 15. Prikaz interferencije na rubnom dijelovima ćelije. Preuzeto od [3].

Najveći uzrok smanjenog kapaciteta ćelije je interferencija. Interferencija nastaje kada korisnici iz različitih susjednih ćelija pokušavaju koristiti iste resursa u istom trenutku. Interferencija nastaju zato što ćelije imaju informacije samo o radijskim resursima UE-ova koji su spojeni na njih, a ne o UE-ovima susjednih ćelija. Na slici iznad ćelija A ima informacije o resursima korisnika A1, ali ne i od B2 korisnika i obrnuto. Ćelije neovisno raspoređuju radijske resurse za svoje UE-ove tako da je moguće da UE-ovi na rubu ćelija mogu alocirati iste frekvencijske resurse. [3]

ICIC tehnika smanjuje interferenciju tako da UE-ovi na rubnim dijelovima ćelije, a pripadaju različitim baznim stanicama koriste različite frekvencijske resurse. Bazne stanice koje podržavaju ICIC tehniku mogu generirati informacije za svaki frekvencijski resurs i izmjenjivati te informacije s drugim baznim stanicama preko X2 sučelja (slika16). [3]

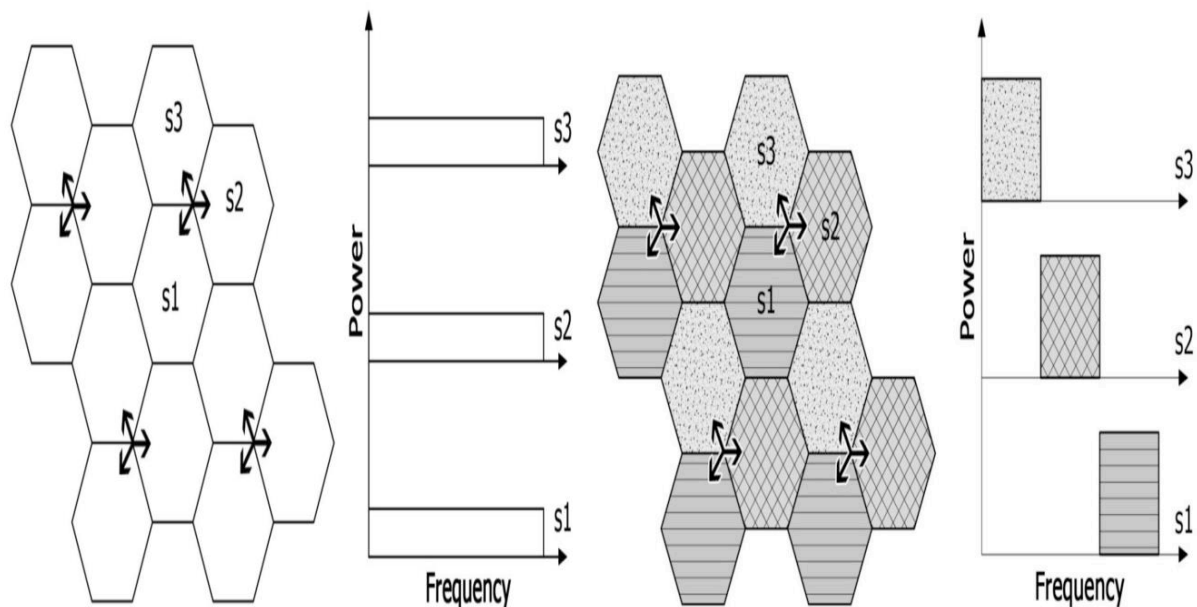


Slika 16. Korištenje ICIC-a kako bi se izbjegla interferencija na rubnim dijelovima ćelije. Preuzeto od [3].

Različiti frekvencijski resursi f_3 i f_2 se alociraju UE-ovima A1 i B1 na rubnim dijelovima susjednih ćelija. Ćelija B alocira f_3 frekvenciju svim UE-ovima s malom snagom transmisije Tx, ako ćelija A već koristi f_3 frekvenciju za UE na rubnom dijelu ćelije s visokom snagom transmisije Tx. [3]

4.1. Konvencionalna reuporaba frekvencije

Kako bi se najbolje iskoristio frekvencijski spektar i uvelike povećao kapacitet s minimalnom interferencijom vrlo je važno pravilno i efektivno koristiti reuporabu resursa. LTE RAN može biti konstruiran na istom frekvencijskom pojasu, odnosno uzorak reuporabe frekvencije se ponovno koristi u svakom sektoru bez ikakvih restrikcija prema uporabi frekvencijskih resursa ili alokaciji snage. Prednost ovakvog rješenja je da korisnici mogu potpuno iskoristiti frekvencijski pojas, ali mana je što je interferencija je vrlo visoka. Dakle ovakvo rješenje omogućuje najveće brzine prijenosa podataka, ali i najveću interferenciju posebno na rubnim dijelovima ćelije. Drugi način je da se frekvencijski pojas podijeli na tri jednaka ortogonalna frekvencijska potpojasa, te se alokira sektorima tako da svi sektori koriste različite frekvencije (slika 17). Na ovaj način se smanjuje interferencija između ćelija, ali se smanjuje i kapacitet jer se samo jedna trećina frekvencijskih resursa može iskoristiti. [3]



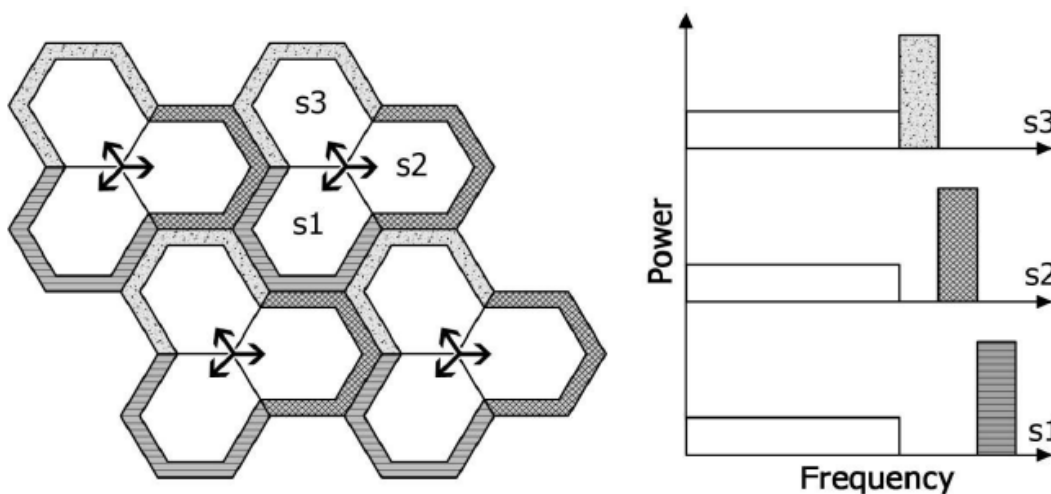
Slika 17. Konvencionalna reuporaba frekvencije. Preuzeto od [3].

LTE sustav ima na raspolaganju 15 MHz pojasne širine. U prvom slučaju 15 MHz imaju svi sektori, dok se u drugom slučaju tih 15 MHz dijeli na tri jednaka dijela po 5 MHz kako bi se omogućila uporaba tri različite frekvencije po sektoru. [3]

4.2. Frakcionalna reuporaba frekvencije

Glavna ideja frakcionalne reuporable frekvencije je u podijeli cjelokupnih resursa u dvije grupe: glavna grupa i sporedna grupa. Jedna grupa resursa opskrbljava korisnike na samim rubovima ćelija dok druga grupa resursa opskrbljiva korisnike koji se nalaze u centru ćelije. Na ovaj način se poboljšava iskoristivost resursa. Frakcionalna reuporaba frekvencija se može podijeliti na dvije klase, prema [3]:

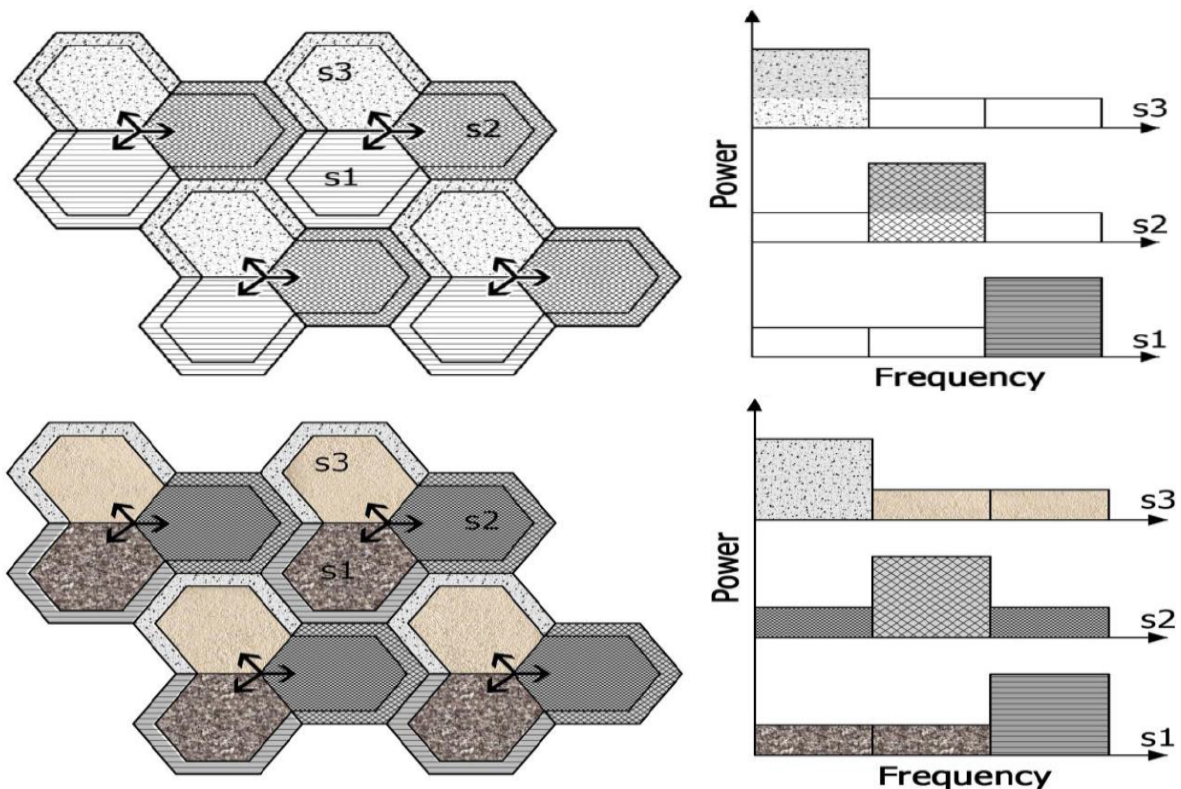
- Djelomična reuporaba frekvencije (PFR): u ovoj shemi zajednički frekvencijskih se koristi u svim sektorima s jednakom snagom, dok je snaga alokacije ostalih frekvencijskih potpojaseva koordinirana između susjednih ćelija tako da se omogući stvaranje frekvencijskog potpojasa s niskom razinom interferencije u svakom sektoru (slika18).
- Meko ponovno korištenje frekvencije (SFR): u ovoj shemi svaki sektor radi na sveukupnom frekvencijskom pojasu. Sektor koristi maksimalnu snagu u nekim frekvencijskim potpojasevima, a u drugom frekvencijskim potpojasevima koristi smanjenu snagu.



Slika 18. Djelomična reuporaba frekvencije (PFR-FI). Preuzeto od [3].

Korištenjem djelomične reuporabe frekvencije na rubnim dijelovima ćelije, a mekog ponovnog korištenja frekvencije u središtu ćelije povećava SINR na rubu ćelije, te zadržava vrlo dobru spektralnu efikasnost. [3]

PFR shema može rezultirati lošom utilizacijom dostupnih frekvencijskih resursa zbog ne dijeljenja frekvencija. SFR shema je balansirana između FRF i PFR shema. SFR shema ima mogućnost prilagodbe efektivne ponovne uporabe tako da podešava snage između frekvencija koje se koriste u središtu ćelije, odnosno na rubnim dijelovima ćelije. Kod SFR-a faktor ponovne uporabe frekvencije je 1 u središtu ćelije, a frekvencijski faktor ponovne uporabe frekvencije veći od jedan na dijelovima uz rub ćelije (slika19). Frekvencijski pojas na rubnim dijelovima ćelije koristi jednu trećinu dostupnog spektra koji je ortogonalan frekvencijama u susjednim ćelijama. Frekvencijski pojas u središtu ćelije u bilo kojem sektoru je sastavljen od frekvencija koje koriste susjedne ćelije u svojim rubnim dijelovima. [3]

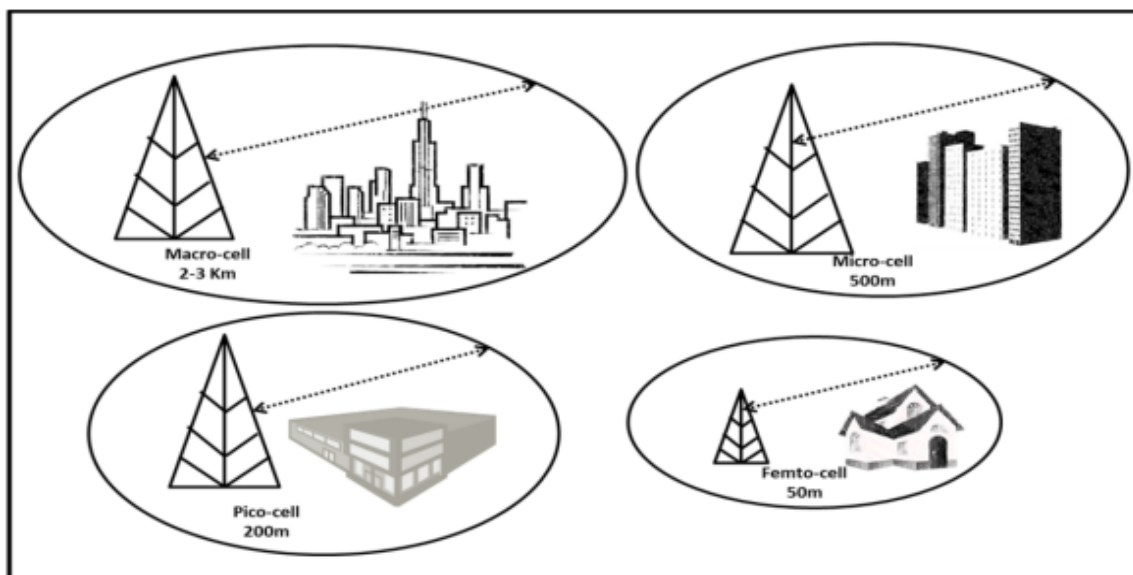


Slika 19. Meka reuporaba frekvencije. Preuzeto od [3].

5. VRSTE ĆELIJA

U trećoj generaciji mobilnih mreža upotrebljavaju se tri vrste mobilnih ćelija: macro, micro i piko u odnosu na području pokrivenosti i kapacitet. U LTE mrežama uvodi se četvrta vrsta ćelija, femtoćelije koja bi trebala posluživati pojedino kućanstvo. Ćelije možemo podijeliti na prema [7]:

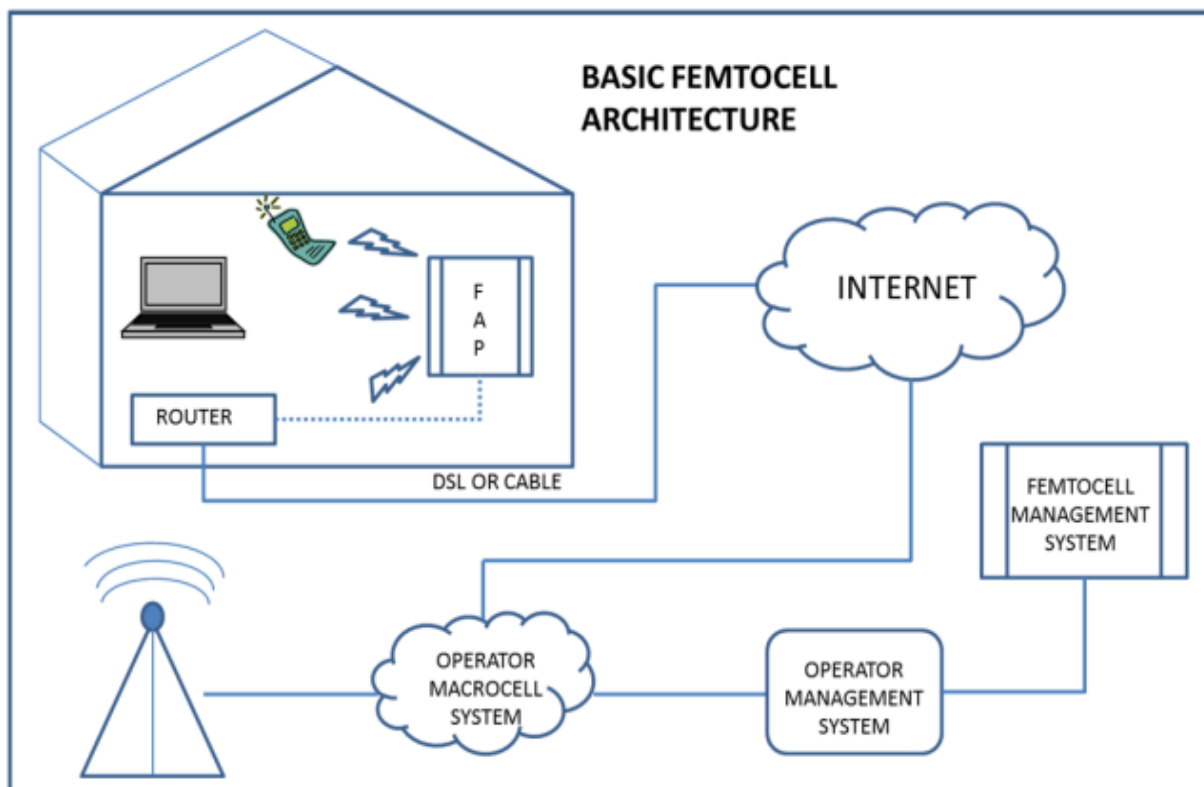
- Macro ćelije: Najveća vrsta ćelija koja ima područje pokrivenosti 2-3 km. eNB-ovi u ovim ćelijama mogu posluživati nekoliko tisuća korisnika istovremeno. Ovakvi eNB-ovi su skupi zbog velike cijene instalacije koja zahtjeva (velike antene, 30-50 m visoki tornjevi, kabinet itd.). Ćelije imaju tri sektora i čine središte mobilne mreže. Snage transmisije su vrlo visoke iznosa 5-40 W.
- Mikro ćelije: pružaju manju pokrivenost od makro ćelija, te se koriste za poboljšanje pokrivenosti u gusto urbanim područjima. Bazne stanice u mikro ćelijama poslužuju nekoliko stotina korisnika i imaju manju cijenu instalacije od makro ćelija. Najčešće se postavljaju na krovove zgrada s tro sektorskim antenskim sustavom. Snaga transmisije ćelija iznosi nekoliko vati.
- Piko ćelije: koriste se za poboljšanje pokrivenosti u uredskim okruženjima. Bazne stanice u piko ćelijama mogu posluživati desetke korisnika i omogućuju veće brzine prijenosa podataka. Piko ćelije su još jeftinije od već navedenih tipova ćelija, te snaga transmisije iznosi između 20-30 dBm.
- Femto ćelije: uvedene u četvrtoj generaciji mreža, poslužuju pojedino kućanstvo ili manji ured. Najjeftinija varijanta ćelija s kapacitetom ne većim od 10 korisnika i snagom transmisije oko 20 dBm-a. Femto ćelije omogućuju vrlo visoke brzine prijenosa podataka u *Uplinku* i *Dowlinku*.



Slika 20. Vrste ćelija. Preuzeto od [7].

5.1. Arhitektura femto ćelija

Arhitektura femto ćelija se sastoji od tri glavna elementa: Femto ćelijske pristupne točke, sigurnosnog pristupnika i femto ćelijskog sustava za upravljanje (slika21). Pristupna točka je najčešće preko širokopojasnog pristupa (DSL, VDSL) spojena na Internet. Femto ćelijsku pristupnu točku možemo zamisliti kao manju mobilnu baznu stanicu, te predstavlja glavni node u mreži koji povezuje korisnika s mrežom. Femto ćelijska pristupna točka može djelovati zasebno tako da se spaja direktno na korisnički usmjernik pomoću integrirane metode u svom vlastitom usmjerniku. Prosječna pristupna femto ćelijska točka ima domet 30 metara sa snagom transmisije 100 mW. Brzine prijenosa podataka koje omogućava su između 7.2 i 14.4 Mbps-a na frekvenciji između 1.9 i 2.6 GHz. Sigurnosni pristupnik je mrežni node koji siguran pristup Internetu. Sigurnosni pristupnik koristi Internet Protocol Security (IPSec) i *Internet Key Exchange* (IKEv2) Internet sigurnosne protokole za enkripciju i autentifikaciju femto ćelija. [7]



Slika 21. Prikaz arhitekture femto ćelije. Preuzeto od [7].

Femto ćelijski sustav za upravljanje je jedan od najvažnijih elemenata arhitekture femto ćelija. Femto ćelijski sustav za upravljanje mora raditi u skladu s protokolima za komunikaciju između korisničke opreme i *Auto-Configuration Servers* (ACS). Sustav upravljanja ima ključnu ulogu u upravljanu svih funkcionalnosti femto ćelija, rezervaciji resursa i aktivaciji resursa. Ovaj sustav također omogućava operatoru kontrolu prema regulacijskim pravilima. Za spajanje na Internet femto ćelije

koriste mreže mobilnih operatora preko širokopojasnog pristupa poput DSL-a, optike ili bakrene parice. Podatci od i prema femto ćeliji se prenose preko mreže zasnovane na IP protokolu. Korisnici se s mobilnim uređajima spajaju istom tehnologijom kao i kod makro ćelija. [7]

5.2. Zahtjevi femto ćelija

Kvaliteta usluge kod femto ćelija mora ispunjavati zahtjeve zadovoljavajuće razine SNR-a (*Signal to Noise Ratio*), gubitaka paketa i kašnjenja. Za ostvarenje prihvatljive razine QoS kod femto ćelija najčešće su potrebne hardverske promjene. Moguće je rješenje korištenje klasifikacije usluga poput *Differentiated Services* (DiffServ) ili *Integrated Services* (IntServ). IntServ poboljšava QoS tako da aplikacije koriste RSVP (*Resource Reservation Protocol*) protokol kako bi poboljšale zahtjeve i rezervaciju resursa u mreži. Diffserv prioritizira pakete prema vrsti usluge za koju su namijenjeni podešavanjem usmjernika i preklopnika. [7]

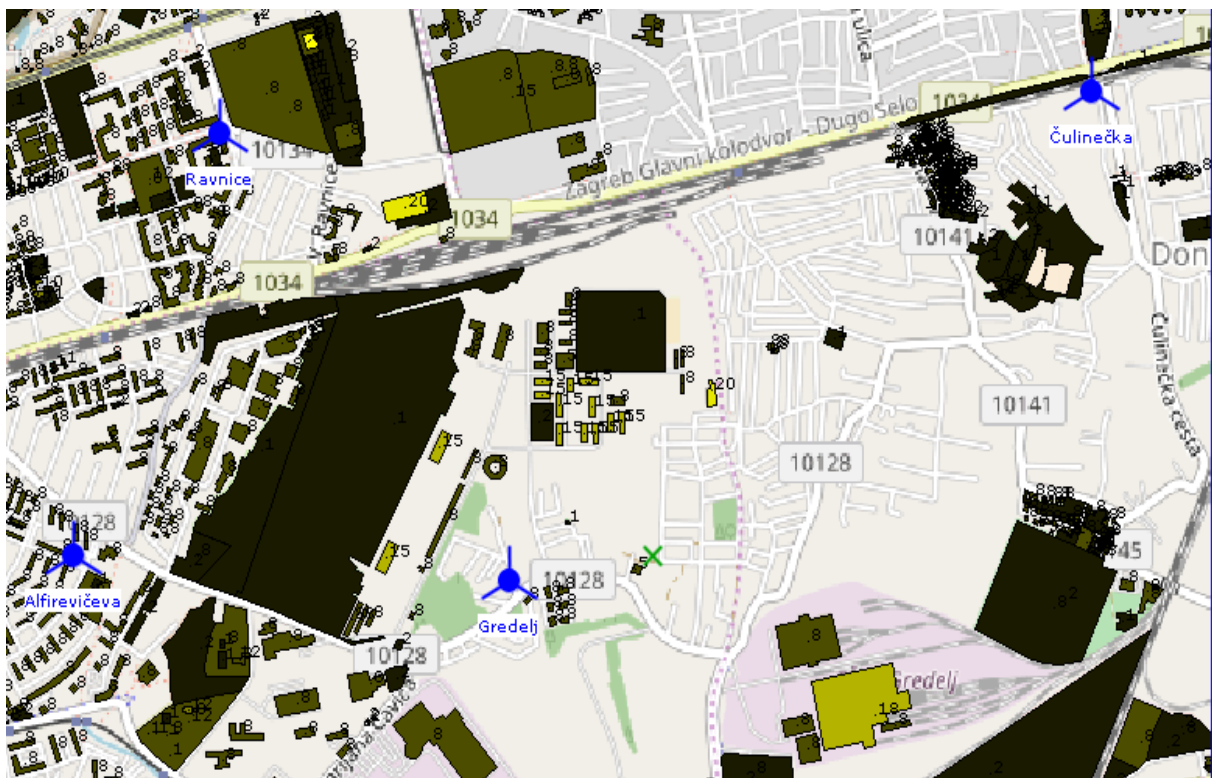
Femto ćelija koristi isti frekvencijski spektar alociran drugim pružateljima mobilnih usluga. Kako ne bi došlo do prevelikog broja korisnika u istoj femto ćeliji koriste se dvije metode *Co-channel Frequency Deployment* i *Orthogonal Channel Deployment*. Korištenje *Co-channel Frequency Deployment-a* omogućava femto ćelijama i makro ćelijama korištenje istog frekvencijskog pojasa, uz određene interferencijske probleme. Kod *Orthogonal Channel Deployment-a* makro i femto ćelije koriste različite kanale. Prednost ove metode je što je manja interferencija, ali i manji kapacitet sustava. Zahvaljujući malim snagama na kojim rade femto ćelije smanjena je i mogućnost nastanka interferencije. Femto ćelije moraju biti jako blizu jedna druge da bi se problem interferencije manifestirao. [7]

Kod prekapčanja u femto ćelijama glavni problem je u tome što je područje pokrivenosti pojedine ćelije malo. Zbog toga prekapčanje u femto ćelija ma je učestalo, te treba raditi besprijekorno. Postoje tri vrste prekapčanja kod femto ćelija. Prva vrsta je obično prekapčanje između dvije bazne stanice kad se korisnik pomiče iz područja pokrivenosti jedne bazne stanice u područje pokrivenosti druge bazne stanice. Druga vrsta prekapčanja nastaje između bazne stanice i femto ćelijske pristupne točke. Ovakvo prekapčanje nastaje kada se korisnik pomiče izvan područja pokrivenosti femto ćelije u područje pokrivenosti neke druge mobilno mrežne tehnologije. Kod ove vrste prekapčanja vrlo je bitna sinkronizacija između femto ćelijske pristupne točke i bazne stanice druge mobilne tehnologije. [7]

Treća vrsta prekapčanja nastaje kada se korisnik pomiče između dvije različite femto ćelijske pristupne točke. Ovako prekapčanje najčešće nastaje kada se korisnik giba po uredima unutar iste građevine koja je pokrivena s više femto ćelijski pristupnih točaka. [7]

6. SIMULACIJA LTE MREŽE

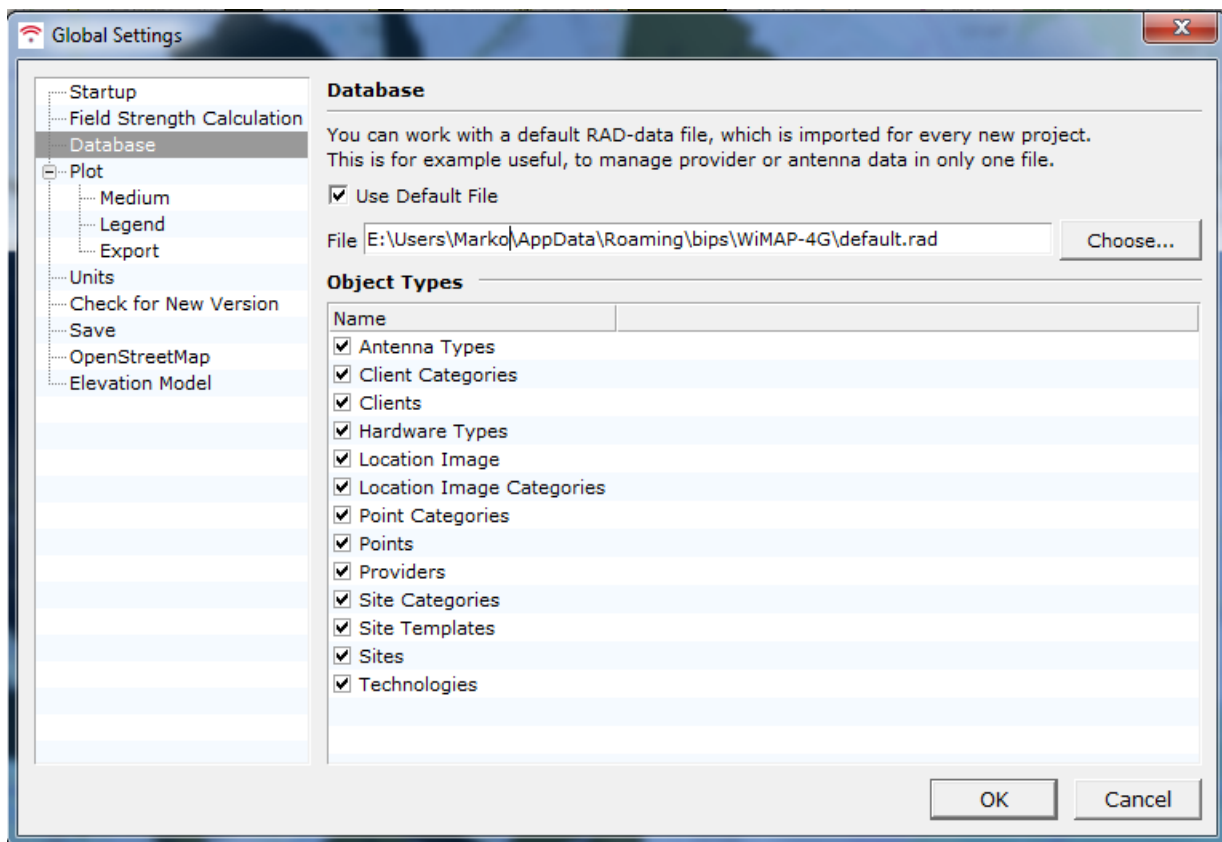
Simulacija LTE mreže na području Borongaja odradit će se primjenom programske podrške za planiranje radijskih mreža WiMAP-4G. WiMAP-4G je besplatni softver namijenjen za planiranje zračnog sučelja svih bežičnih mreža, te je razvijen od strane Brown Iposs-a. Ovaj program je vrlo dobro prilagođen za korisnike s malo manje iskustva u području planiranja, te je popraćen opširnim korisničkim priručnikom. Simulacija će biti podijeljena u dva dijela. Ovaj program ima integrirane propagacijske modele kao što su: COST-231 Walfish-Ikegami, model propagacije slobodnog prostora i CORLA. U prvom dijelu simulacija će biti odrađena prema realnom stanju (korištenje mikro ćelija) na području Borongaja (slika 22), a u drugom dijelu simulacija će biti napravljena korištenjem femto ćelija na istom području.



Slika 22. Područje Borongaja u programu WiMAP-4G

6.1. Priprema okoline

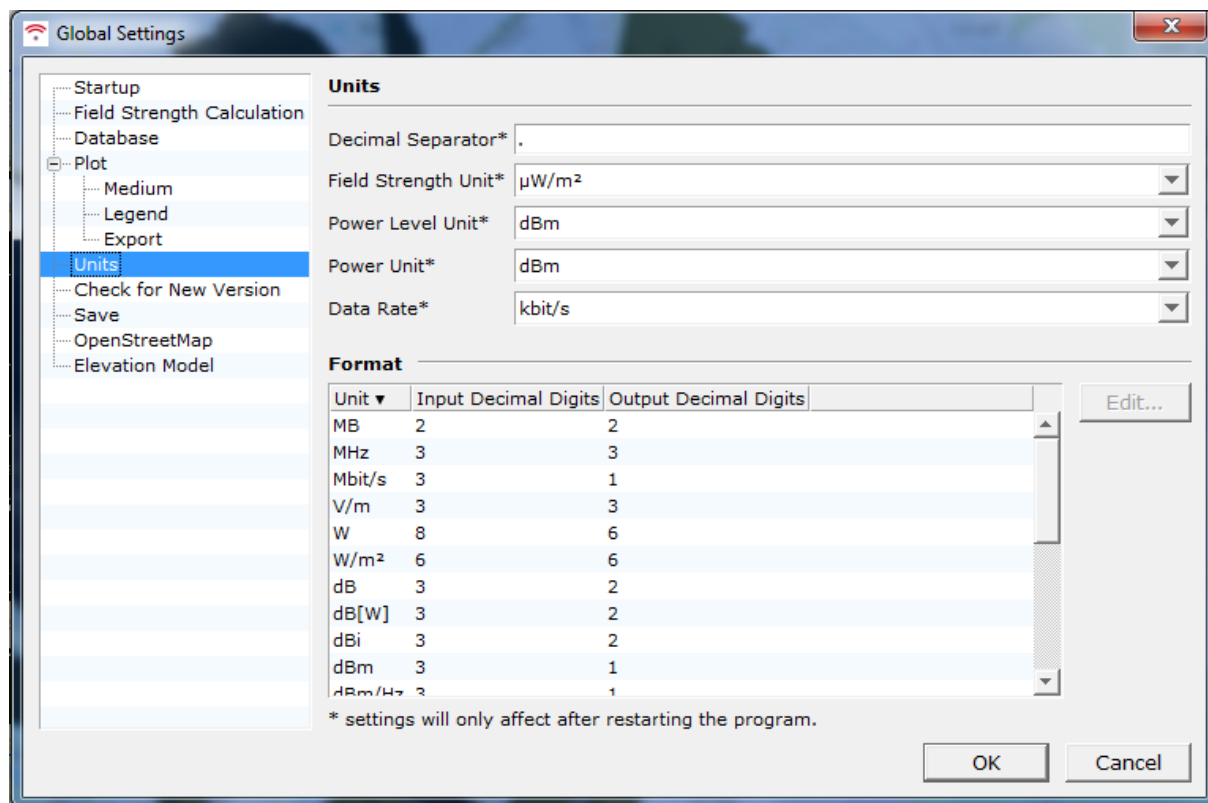
Prvi korak u pripremi okoline za izradu simulacija je postavljanje globalnih postavki (slika 23). Postavljanje globalnih postavki utječe na cijeli program, a ne samo na određeni projekt. Prvi korak u namještanju globalnih postavki je uvoz baza podataka. WiMAP-4G nudi već gotove baze podataka uz mogućnost dodavanja vlastitih. Neke od baza podataka koje WiMAP-4G nudi su: tipovi antena, kategorija korisnika, vrste hardvera, vrste baznih stanica, vrste tehnologija itd.



Slika 23. Baze podataka WiMAP-4G programa.

U izborniku "Plot" se mogu odabrati stavke koje će se prikazivati kod planiranja projekta. U ovom izborniku se podešava translacijski faktor i sve ostale stavke vezane za sam prikaz u našem projektu.

Sljedeći bitan korak u postavljanju globalnih postavki je postavljanje mjernih jedinica (slika 24). Mjerne jedinice za razinu snage, brzinu prijenosa podataka, jakost polja i sl. se definiraju u ovom izborniku.



Slika 24. Odabir mjernih jedinica.

WiMAP-4G ima mogućnost uvoza podataka u građevinama s OpenStreetMap™. karti preko sljedećeg linka: [http://overpass-api.de/api/map?bbox=\\$fromX,\\$fromY,\\$toX,\\$toY](http://overpass-api.de/api/map?bbox=$fromX,$fromY,$toX,$toY). Sljedeći korak je podešavanje elevacijskog modela. Elevacijski model je 3D prezentacija površine terena. Elevacijski model omogućuje detaljnu analizu te je vrlo bitan u urbanom planiranju mobilnih mreža. Kod WiMAP-4G-a koristi se elevacijski model baziran na SRTM-u (Shuttle Radar Topography Mission), te se može preuzeti na sljedećem linku: https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/.

6.2. Odabir propagacijskog modela

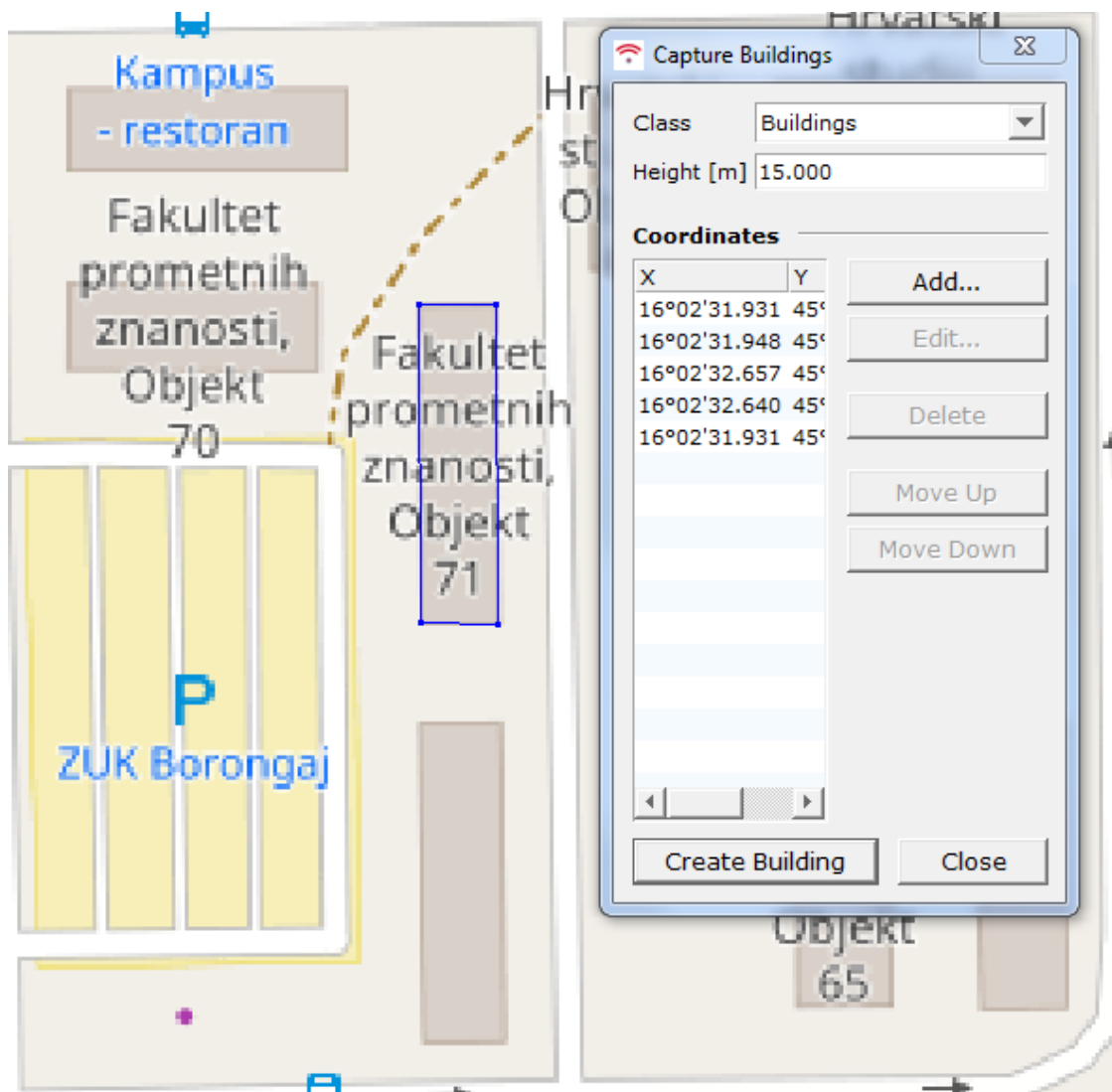
Nakon postavljanja generalnih postavki slijedi podešavanje postavki projekta. U podešavanju postavki projekta prvi korak je odabir koordinatnog sustava. Moguć je izbor između UTM (Universal Transverse Mercator), Gauss-Krueger i Geographic koordinatnih sustava. Pod kalkulacijskim postavkama je moguće odabrati propagacijski model. Ponuđeni propagacijski modeli su: ITU-R P.1411-3 (COST-231 Walfish-Ikegami), model propagacije slobodnog prostora, Erceg model i CORLA model. Moguće je podešavanje određenih parametara unutar svakog modela kao i izrada vlastitog modela. Kod podešavanja empiričkih modela moguće je postavljanje zalihosti gubitaka na putu. Model propagacije slobodnog prostora je najjednostavniji ponuđeni propagacijski model. Ovaj model se zasniva na elevacijskom modelu uz mogućnost postavljanja postavki da se u proračun uključi i sloj koji sadrži građevine. Ovaj model nije efikasan za korištenje u urbanim područjima, ali nudi dobre rezultate za sub urbana i ruralna područja.

ITU-R P.1411-3 je polu empirijski model zasnovan na COST 231 Walfish-Ikegami s nekim poboljšanjima. Ovaj model zahtjeva detaljnije ulazne informacije poput visine građevina, udaljenosti između građevina, širine ulica, visina na kojima se nalaze bazne i mobilne stanice i sl. Erceg model se više koristi kod planiranja WiMAX mreža. Dizajniran je za urbana i sub urbana područja. Detaljnije opisano postavljanje parametara propagacijskih modela bit će opisano u poglavljima koji slijede.

Nakon odabira propagacijskih modela slijedi namještanje postavki elevacijskog modela i modela građevina. WiMAP-4G nudi mogućnost uvoza katastarskih karata kako bi se što preciznije izradili modeli građevina.

6.3. Građevine

Klasifikacija građevina omogućuje korisniku da sam izradi profile građevina ili šume, odnosno bilo kakve prepreke koja može utjecati na signal. Građevine i šuma su potrebni za bilo kakvu precizniju kalkulaciju. Sve kalkulacije su poprilično beskorisne ako se građevine ne uzmu. Za unos građevina na kartu potrebne su točne koordinate, površina građevine i visina. Na slici 25 prikazan je primjer jednog od unosa građevine na kartu u programu WiMAP-4G.



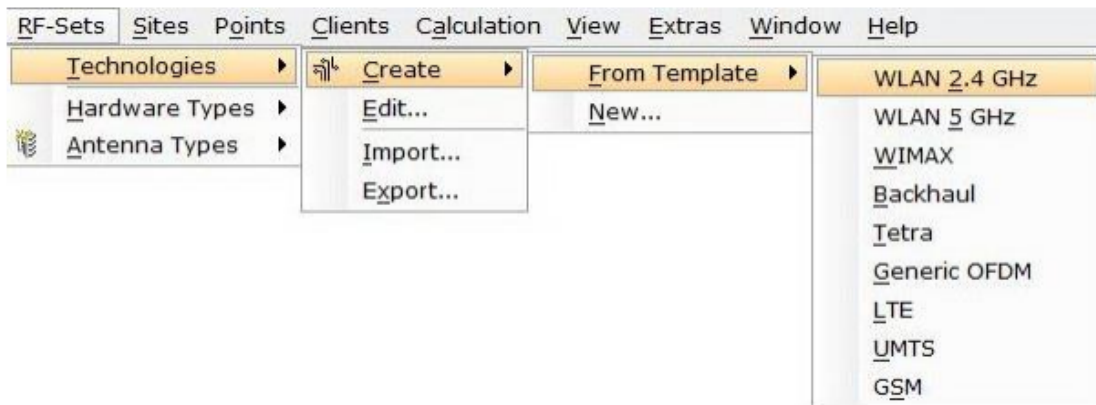
Slika 25. Proces dodavanja građevina.

Građevina se dodaje tako da se označe koordinate rubnih točaka građevine, te se zatim otvara prozor u kojem se postavlja visina objekta te njegova klasa. Građevine se mogu dodati i iz baza podataka o katastru ili iz OpenStreetMap karti.

6.4. Odabir tehnologije

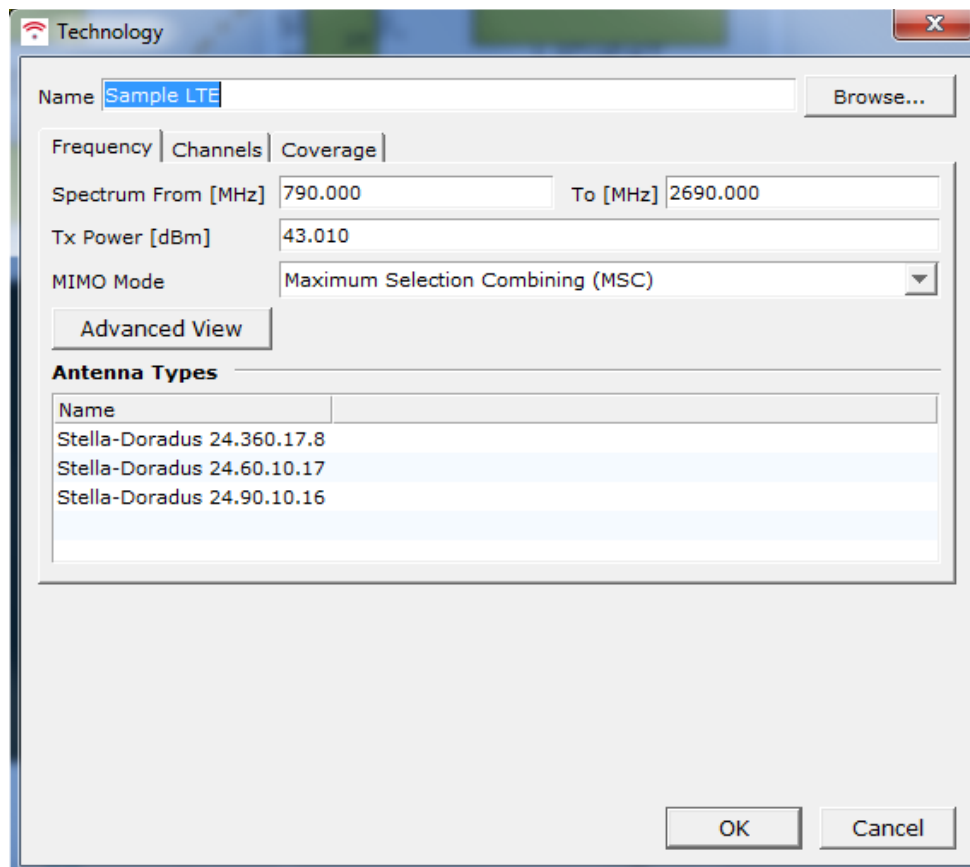
Na slici 26 prikazan je odabir tehnologije pomoću padajućih izbornika:

RF-Sets -> Technologies -> Create -> From Template -> LTE.



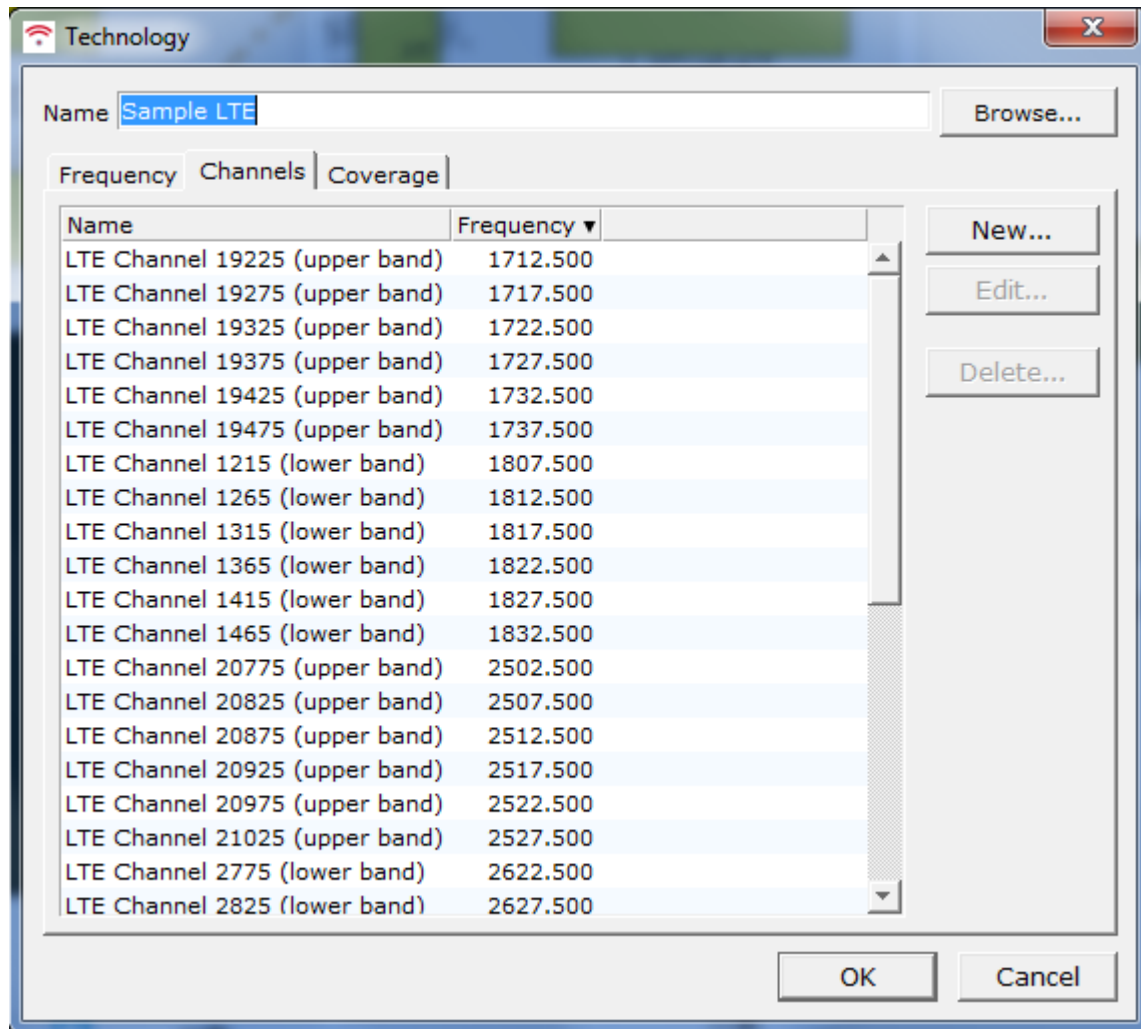
Slika 26. Odabir tehnologije pomoću padajućih izbornika

Nakon odabira LTE tehnologije otvara se prozor za konfiguraciju tri parametra (slika 27). Prvi parametar za konfiguraciju je frekvencija. Uz frekvenciju nalaze se dostupne vrste antena za odabranu mrežu kao i podatci o snazi transmisije i uporabi MIMO moda.



Slika 27. Konfiguracija tehnologije.

Drugi parametar koji se može konfigurirati su kanali. Kanali su prikazani uz odgovarajuće frekvencije (slika 28). Također se mogu dodavati novi kanali, a postojeći se mogu rekonfigurirati ili brisati.

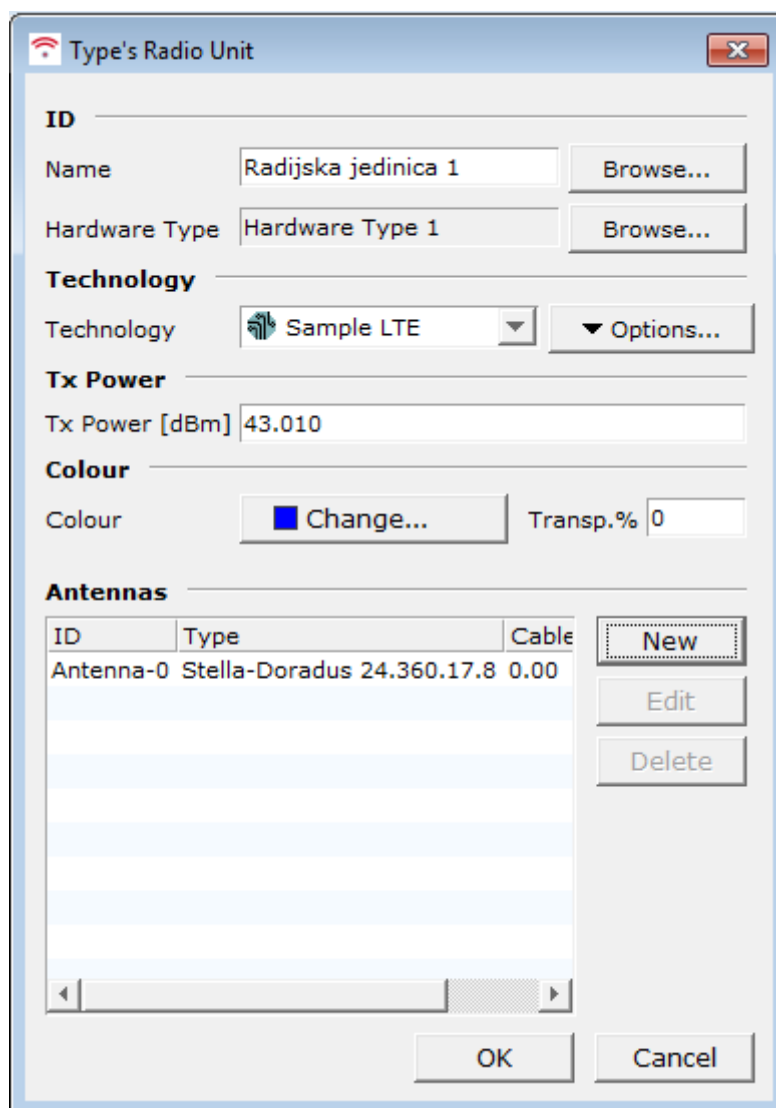


Slika 28. Odabir kanala koji će se koristiti.

Posljednji parametar koji se može konfigurirati je pokrivenost. Ovdje se mogu namješati različite boje koje prezentiraju razinu pokrivenosti ovisno razini snage ili C/I limitu. WiMAP-4G nudi mogućnost manualnog kreiranja nove tehnologije kao i izvoz i uvoz tehnologija.

6.5. Odabir sklopovlja

Definiranje sklopovlja je potrebno za izradu baznih stanica ili korisnika u projektu. Vrsta hardvera sadrži radijske jedinice i antene koje pripadaju radijskim jedinicama. U WiMAP-4G programu moguće je prikazati dokumente kao što su tehničke specifikacije određenom sklopovlja. Na slici 29 prikazana je konfiguracija radijske jedinice. Pri kreiranju nove vrste sklopovlja potrebno je odabrati vrstu tehnologije koji će hardver koristiti. Također je potrebno definirati radijsku jedinicu i antenu, te gubitak antene.



Slika 29. Konfiguracija radijske jedinice

Bazne stanice su jedna od najvažnijih stvari pri konfiguraciji WiMAP-4G projekta. Projekt se ne može planirati bez baznih stanica jer su one glavni aspekt svakog proračuna. Bolje poznavanje antena je korisno kako bi se antene

jednostavnije konfigurirale. WiMAP-4G nudi neke već prekonfigurirane antene za pojedine tehnologije. WiMAP-4G također nudi mogućnost izrade vlastitih antena kao i uvoz i izvoz antena iz drugih projekata (slika 30). Osnovne informacije o anteni koje treba poznavati kako bi se pravilno konfigurirala su tehnologija, primarni kanal, visina na kojoj se nalazi antena, usmjerenost antene i sl.

Antenna

ID

Name: Antenna-120 [Browse...]

Radio Unit: Sample Radio Unit 3 [Browse...]

Technology

Technology: LTE 2600 MHz [Browse...]

Primary Channel: LTE Channel 3175 (low band)

Height & Direction

Azimuth [°]: 120.000 Downtilt [°]: 0.000 Auto adjust

Height (AGL) [m]: 15.000 Height Refers To: Lower Edge Center

Antenna Type

Antenna Type: Ubiquiti AG-2G20 [Options...]

Attenuation

Cable Loss [dB]: 0.000

Position | Pattern | Colour

Position: As Site
 Relative Translation
 Absolute Coordinates

X: 0°00'00.000 Y: 0°00'00.000

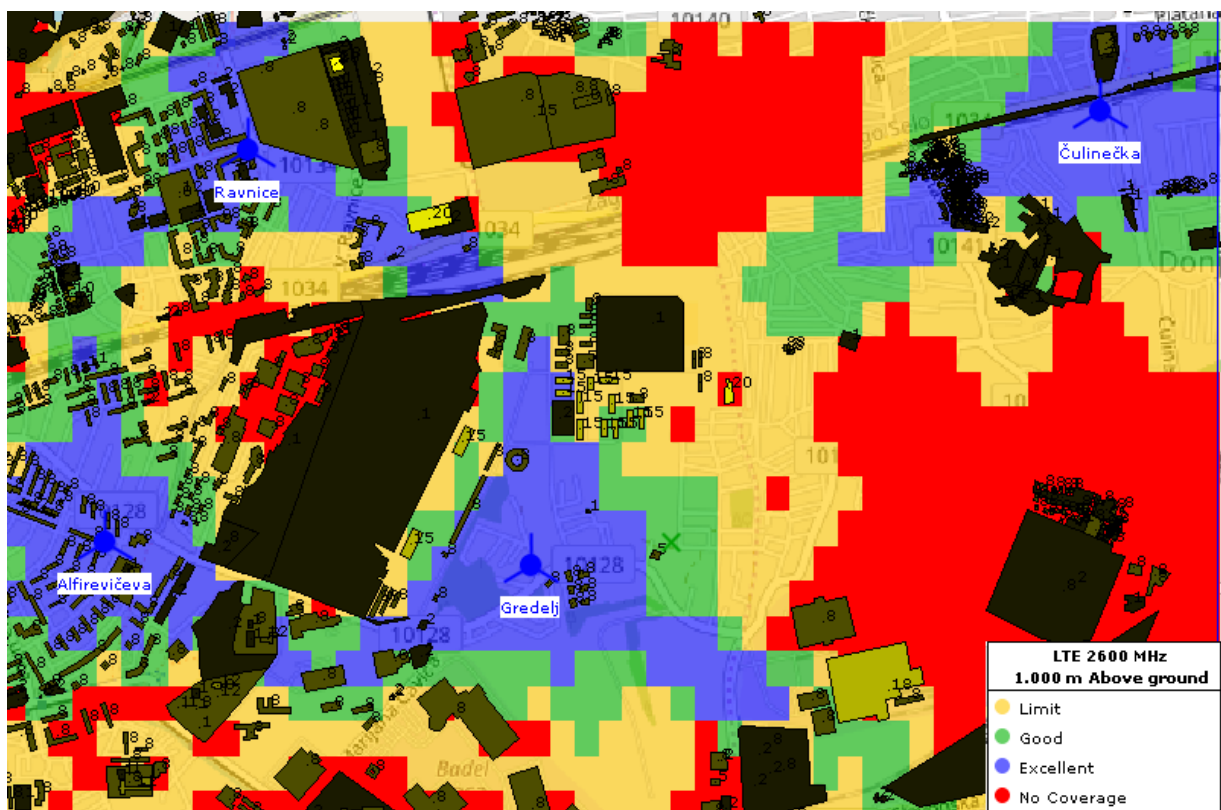
OK Cancel

Slika 30. Konfiguracija antene

Osim navedenih osnovnih informacija o anteni potrebne su informacije o horizontalnom i vertikalnom prigušenju antene. Ove informacije se zapisuju u predefiniranom obracu za prigušenje antena.

6.6. Simulacija korištenjem mikro ćelija

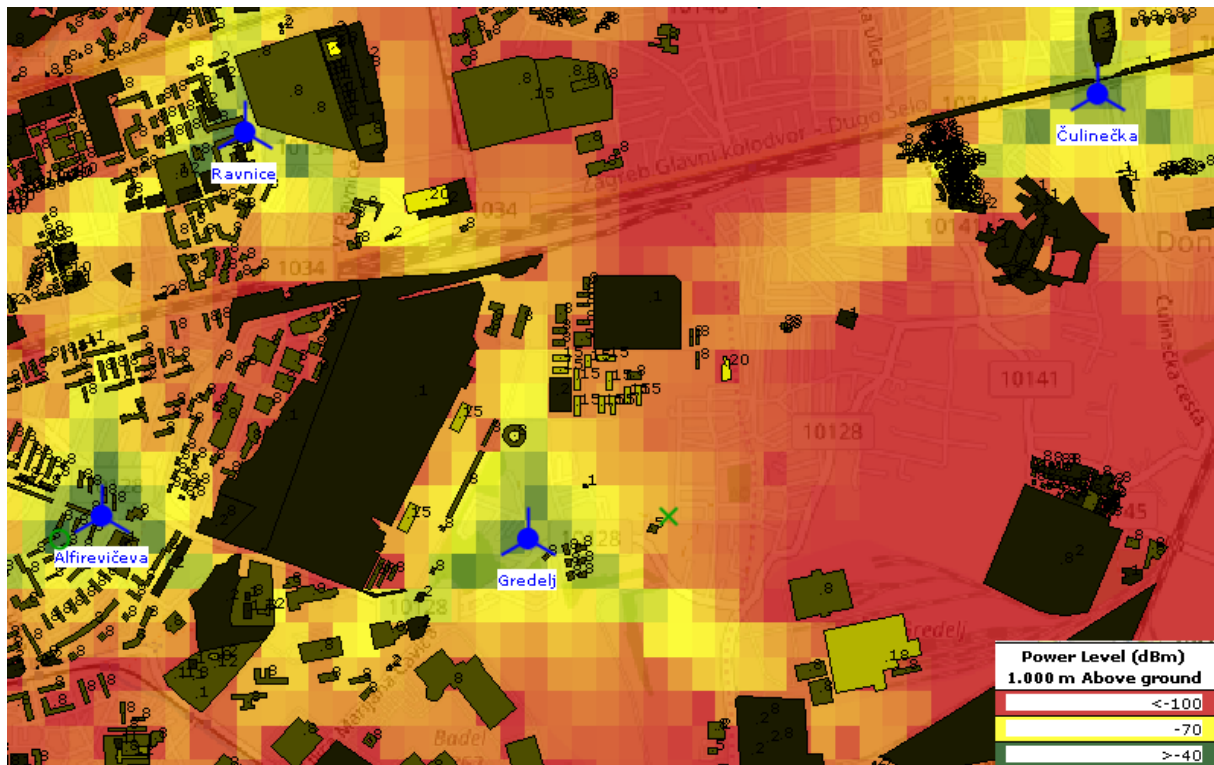
Simulacija korištenjem mikro ćelija je napravljena tako da smo koristili pet baznih stanica oko područja kampusa na Borongaju (slika 31). Bazine stanice su pozicionirane u Alfrevičevoj ulici pokraj trga na Volovčici, Vukomerec, Ulica Ravnice II, Ulica Siniše Glavaševićeva i Čulinečka ulica. Antene su postavljene na pojedinim zgradama i plus svojim antenskim tornjevima visine 2 do 3 metra. Za ovu simulaciju postavljena snaga bazne stanice iznosi 40 dBm-a. Antene koje su se koristile za ovu simulaciju su LTE antene UBIQUITI AG -2G20. Svaka bazna stanica se sastoji od tri antene međusobno pomaknute za 120° stupnjeva.



Slika 31. Simulacija pokrivenosti korištenjem mikro ćelije.

Za simulaciju pokrivenosti koristio se propagacijski model Erceg B. Erceg B je najpogodniji model za sub urbano područje koje sadrži šumske dijelove i područja sa zgradama. Plava boja prikazuje područja s najboljom pokrivenosti, zelena boja označava dobru pokrivenost, žuta boja označava limitiranu pokrivenost. Područja označena crvenom bojom su izvan područja pokrivenosti.

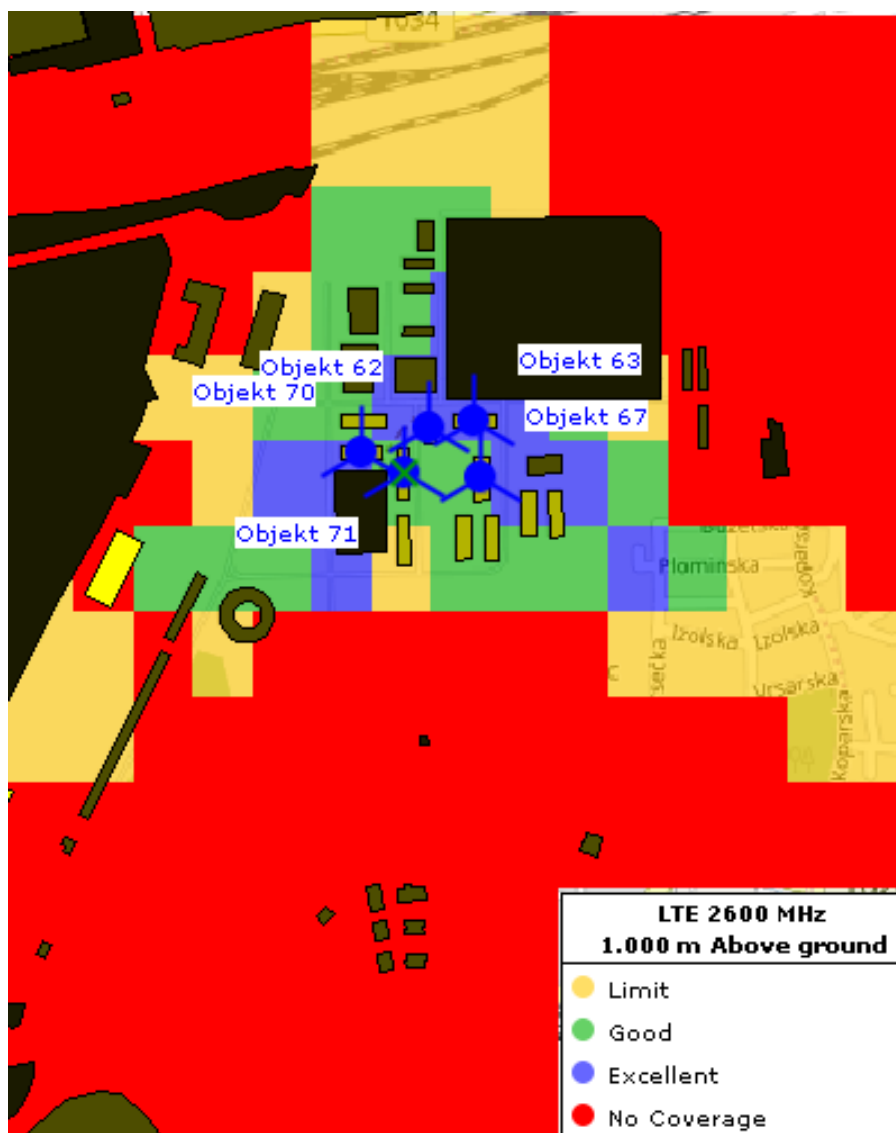
Na slici 32 prikazana je simulacija razine snage na području Borongaja korištenjem mikro ćelija. Simulacija razine snage pomaže pri određivanju točnih iznosa razine snage u određenom području. Zelena boja prikazuje područja s većom razinom snage, žuta boja označava područja sa 70 dBm-a i crvena boja označava područja s najnižom razinom snage. Zeleni krug označava područje s najboljom razinom snagom u cijelom projektu (kod bazne stanice u Alfrevičevoj ulici).



Slika 32. Razina snage korištenjem mikro ćelije.

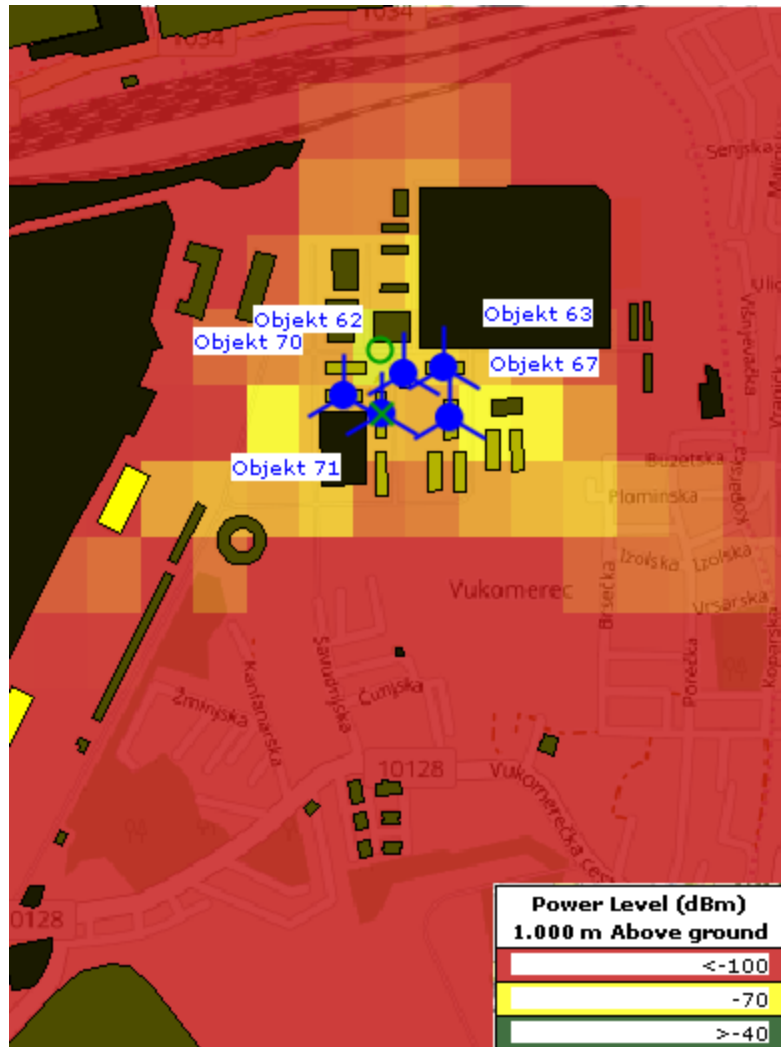
6.7. Simulacija korištenjem femto ćelija

Simulacija pokrivenosti područja Borongaja korištenjem femto ćelija prikazana je na slici 33. Simulacija s korištenjem femto ćelija je izvršena na način da je postavljeno pet baznih stanica na zgradama na kampusu Borongaj. Bazne stanice su postavljene na objekt 62, 63, 67, 70 i 71. Bazne stanice se sastoje od tri LTE antene UBIQUITI NZ-AG20 pomaknute za 120 ° stupnjeva jedna od druge. Antene su postavljene na niže visine u odnosu na simulaciju s mikro ćelijama. Snaga svake bazne stanice iznosi 10 dBm-a. Kod simulacije se koristio isto propagacijski model kao i u prethodnoj simulaciji Erceg B.



Slika 33. Simulacija pokrivenosti korištenjem femto ćelija.

Simulacija razine snage uporabom femto ćelija je prikazana na slici 34, gdje žuta boja prikazuje područja s razinom snage 70 dBm i crvena boja prikazuje područja bez razine snage.



Slika 34. Simulacija razine snage korištenjem femto ćelija.

6.8. Analiza rezultata simulacija

Kod simulacije gdje su korištene mikro ćelije vidljivo je da područja pokrivenosti imaju pretežno pravilan oblik. To je zbog specifičnosti terena, antene se nalaze na najvišim zgradama u području na visinama od oko 30 metara. S obzirom na to da na ovom području nema većih prepreka signalu, pokrivenost ima specifičan oblik za trosektorske antene kakve su se koristile u simulaciji. Treba uzeti u obzir da se na području Borongaja nalazi znatni dio područja prekriven šumom koji apsorbira dio signala. Vidljivo je na slici 31 da neka područja uz rub šume imaju lošiju pokrivenost. Objekt 70 i objekt 69 na kampusu Borongaj imaju odličnu pokrivenost u simulaciji s korištenjem mikro ćelija, dok objekti 71, 67, 43, 60, 61 i 63 imaju nešto slabiju pokrivenost. Također treba uzeti u obzir i to da bežični signal dodatno slabi ako se korisnička oprema nalazi unutar objekta jer signal na svom putu nailazi da dodatne prepreke. Ovaj problem mikro ćelije je posebno izražen ako je objekt je izrađen od betona i željeza, a korisnička oprema se nalazi na nižim katovima (hodnici, podrumi) i na većoj udaljenosti od prozora.

Kod simulacija gdje su korištene femto ćelije vidljivo je da je pokrivenost znatno bolja na svim objektima na području kampusa Borongaj. Rješenje s femto ćelijama je posebno namijenjeno za pokrivenost zatvorenih prostora (kuće, uredi) pa je pokrivenost u svim objektima koji su opremljeni s femto ćelijama na najvećoj razini. Veliko ograničenje femto ćelije su problemi oko prekapčanja. Ukoliko se korisnik giba iz područja pokrivenosti femto ćelije u područje pokrivenosti mikro ćelije dok obavlja poziv postoji velika mogućnost da će se poziv izgubiti. Razlog tome je loša sinkronizacija između femto ćelijske pristupne točke i bazne stanice mikro ćelije. Problem femto ćelija nastaje i kada se udaljimo od objekta u kojem se nalazi femto ćelijska bazna stanica, tako da za područje Borongaja najbolje bi rješenje bila kombinacija mikro mreže i femto mreže s dobrom međusobnom sinkronizacijom. Femto ćelija bi pružala besprijekornu pokrivenost krajnjim korisnicima koji se nalaze unutar objekata, mikro ćelija korisnike preuzimala u svoje područje pokrivenosti kada bi napustili objekte.

7. ZAKLJUČAK

LTE mreža donosi pojednostavljenije arhitekture mreže u odnosu na prethodne mobilne tehnologije što uvelike povećava njenu efikasnost. Pojednostavljena arhitektura LTE mreže omogućuje eNodeB-ovima direktnu konekciju, a također se i smanjuje broj sučelja. Pojednostavljenjem arhitekture smanjuje se i broj sučelja što omogućuje bolju protočnost podataka, ali i poboljšava sigurnost mreže. Korištenjem SC-FDMA pristupne tehnike u *uplink-u* smanjuje se potrošnja baterije na terminalnom uređaju, a korištenje OFDMA pristupne tehnike u *downlink-u* poboljšava iskoristivost resursa kanala što rezultira većim kapacitetom sustava. U usporedbi s drugim mobilnim mrežama poput GSM-a i UMTS-a LTE ne omogućuje znatno poboljšanje u kontekstu radijusa ćelija i proračuna gubitaka na putu, ali omogućuje znatno veće brzine. Kod proračuna radijskog linka LTE također ima bolje rezultate u odnosu na spomenute tehnologije zbog malih margina interferencije postignute uporabom ortogonalne modulacije.

U kontekstu mobilnih komunikacijskih sustava planiranje radijsko frekvencijskog dijela mreže se odnosi na dodjeljivanje frekvencijskog pojasa, odabir lokacije bazne stanice i određivanje parametara bežičnih komunikacijskih sustava kako bi se omogućio dovoljno dobar kapacitet i pokrivenost mreže. Proces planiranja radijske mreže varira ovisno o lokaciji i dominantnom faktoru (kapacitet ili pokrivenost). Glavni zadatak planiranja radijsko frekvencijskog dijela mreže je održavanje dobre ravnoteže između navedenih faktora. Planiranje pokrivenosti se odnosi na pronalaženje optimalnih lokacija za postavljanje baznih stanica kako bi se omogućila stalna pokrivenosti. Kako bi se odredio radijus ćelije potreban je proračun gubitaka na putu i proračun radijskog linka. Glavni faktori koji utječu na proračun radijskog linka su transmisivna snaga, dobitci antene i margine *fading-a*. Proračun gubitaka na putu govori o tome na koji način se snaga prijamnog signala degradira u odnosu na prijeđenu udaljenost, a ovisi o propagacijskom modelu. Odabir propagacijskog modela ovisi o geografskim značajkama prostora na kojem se planira. Najpogodniji model za urbana područja je COST 231 Hata, dok se za sub urbana i ruralna područja mogu koristiti Erceg model ili Cost 231 Walfish-Ikegami model.

Planiranje kapaciteta se odnosi na mogućnost sustava da podržava određen broj pretplatnika u istom trenutku. Kod planiranja kapaciteta treba uzeti u obzir faktore kao što su razina interferencije, vrsta podržane modulacije, vrste kodiranja i sl. Kod SINR metode planiranja također treba uzeti u obzir vrstu okoline (urbana, sub urbana, ruralna) modele kanala i konfiguracije antena. Kod planiranja kapaciteta metodom analize prometa najvažniju ulogu ima vrsta prometa koju generira korisnik. Bitno je analizirati glavni prometni sat, vršne i prosječne brzine, količinu prometa po pretplatniku i gustoću i vrstu pretplatnika. Najbolji se rezultati planiranja kapaciteta postižu kombinacijom navedenih metoda.

LTE mreža koristi četiri vrste ćelija. Makro ćelije su ćelije velikih snaga (40W) i velikog dometa oko 2-3 km, mikro ćelije snage 1-5 W i dometa oko 100 metara, piko ćelije snage 30 dBm-a s namjenom da mogu pokrivati pojedine zgrade i femto ćelije snage 20 dBm-a uz mogućnost pokrivanja ureda ili pojedinog kućanstva. U prvoj odrađenoj simulaciji s korištenjem mikro ćelija vidljivo je da je pokrivenost vrlo dobra na području oko samih baznih stanica. Područje kampusa na Borongaju je specifično jer nema pre visokih prepreka. S obzirom na to da su bazne stanice postavljene na najviše zgrade u području signal može bez većih problema pokrivati cijelo područje. Najveći problem predstavljaju područja šume gdje se vrlo visok dio signala apsorbira što rezultira smanjenom pokrivenosti u tom području. Kod uporabe femto ćelija osigurava se pokrivenost u zatvorenim prostorima. Svaka zgrada na kampusu imat će odličnu pokrivenost i veće brzine prijenosa. Femto ćelije će ponuditi efikasniju mrežu uz dosta jeftiniju izvedbu u odnosu na mikro ćelije. Problem femto ćelije nastaje kada se udaljimo od zgrade gdje nema pokrivenosti. Najbolje rješenje za područje kampusa na Borongaju bi bila kombinacija femto ćelija i mikro ćelija s dobrom sinkronizacijom kod prekapčanja.

LITERATURA

- [1] Penttinen, T.J.:The LTE/SAE Deployment Handbook, John Wiley & Sons Ltd., Ujedinjeno Kraljevstvo, 2012.
- [2] Sesia, S., Toufik, I.: LTE – The UMTS Long Term Evolution From Theory to Practice Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., 2011.
- [3] Mohammad, S. Sharawi: RF Planning and Optimization for LTE Networks., Saunder., Travanj 12, 2010.
- [4] Ahson, A., Long,S.: Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology. Taylor & Francis Group., 2009.
- [5] Li, X., Toseef, U., Weerawardane, T., Bigos, W., Dulas, D., Goerg, C.:Dimensioning of the LTE S1 Interface. Timm-Giel and A. Klug.,IEEE press., Studeni, 2011.
- [6] Novosad, T., Laiho, T., Wacker, S.: Radio Network Planning and Optimisation for UMTS., Engleska, John Wiley & Sons Ltd., 2006.
- [7] Claussen, H., Ho, L., Samuel, L. G.: An overview of the femtocell concept., Bell Labs Technical Journal, 2008.
- [8] Khan, M. F., Khan, M. I., Raahemifar, K.: Local IP Access (LIPA) enabled 3G and 4G femtocell architectures. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineer (CCECE), 2011.
- [9] Li, X.: Radio Access Network Dimensioning for 3G UMTS. China. University of Bremen, 2009.
- [10] Palat, S., Godin, P.: The LTE Network Architecturehe., Alcatel-Lucent"s LTE solution. 2009.
- [11] A.Kaid, H. Hassan, A. Ghaleb: LTE Network Planning and Optimization. Taiz University Faculty of Engineering and IT Communication Department. 2014.
- [12] Strategic white paper:The LTE Network Architecture. Alcatel Lucent.2009.
- [13] Teković, A.: Bežične računalne mreže, Algebra, Zagreb, 2010.
- [14] Zhang, L.: Network Capacity, Coverage Estimation and Frequency Planning of 3GPP Long Term Evolution., Sweden LINKOPINGS UNIVERSITET, Insitiute of Technology, 2010.
- [15] Kavran Z., Gurgurević I.: *Autorizirana predavanja iz kolegija Planiranje telekomunikacijskih mreža: Pokretne mreže* , Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.

Internet stranica:

http://e-student.fpz.hr/Predmeti/P/Planiranje_telekomunikacijskih_mreza/Materijali/12_Pokretne_mreze.pdf (kolovoz, 2017.)

- [16] Kavran Z., Gurgurević I.: *Autorizirana predavanja iz kolegija Planiranje telekomunikacijskih mreža: Planiranje LTE mreže*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2017.

Internet stranica:

http://e-student.fpz.hr/Predmeti/P/Planiranje_telekomunikacijskih_mreza/Materijali/13_Planiranje_LTE_mreze.pdf (kolovoz, 2017.)

POPIS KRATICA

ARQ	<i>Automatic Repeat and Request</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CDMA	<i>Code-Division Multiple Access</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DFTS-OFMDA	<i>Discrete Fourier Transform Spread – OFDMA</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packed System</i>
E-RAB	<i>EPS Radio Access Bearer</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
IKE	<i>Internet Key Exchange</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
GDT	<i>GTP User Data Tunneling-u</i>
GERAN	<i>GSM EDGE Radio Access Network</i>
eICIC	<i>Enhanced Inter-Cell Interference Coordination</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat and Request</i>
ICIC	<i>Inter-Cell Interference Coordination</i>
ACS	<i>Auto-Configuration Servers</i>
DiffServ	<i>Differentiated Services</i>
HCS	<i>Home Subscriber Server</i>
IntServ	<i>Integrated Services</i>
HD-FDD	<i>Half Duplex – Frequency Division Duplex</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MM	<i>Mobility Management</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
NAS	<i>Non-access stratum</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplex Access</i>
PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PGW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
P-GW	<i>PDN Gateway</i>
PoP	<i>Point of Presence</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>

QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RANAP	<i>Radio Access Network Application Part</i>
RAT	<i>Radio Access Technology</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RRP	<i>Resource Reservation Protocol</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
RS	<i>Resource Block</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
VDSL	<i>Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
SCTP	<i>Streaming Control Transmission Protocol</i>
SDF	<i>Service Data Flow</i>
SDU	<i>Service Data Units</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SM	<i>Session Management</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TCP	<i>Transfer Control Protocol</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TFT	<i>Traffic Flow Template</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UE	<i>User Equipment</i>
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Schemes</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
VLR	<i>Visitor Location Register</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

POPIS ILUSTRACIJA

Popis slika

Slika 1. Prikaz EPS arhitekture.....	3
Slika 2. Koncept EPS nosioca.. ..	4
Slika 3. Prikaz EPC arhitekture.....	5
Slika 4. Prikaz implementacije GERAN-a i UTRAN-a.....	7
Slika 5. Prikaz LTE sučelja s pripadajućim protokolima.....	8
Slika 6. Prikaz SC-FDMA i OFDM pristupnih tehnika.. ..	13
Slika 7. LTE širina frekvencijskog kanala.....	14
Slika 8. OFDMA/SC-FDMA vremenska domena.. ..	15
Slika 9. Vrste modulacijskih tehnika podržanih od strane LTE-a.....	17
Slika 10. Adaptivno kodiranje.....	18
Slika 11. MIMO koncept.....	19
Slika 12. Koncept planiranje pokrivenosti.. ..	25
Slika 13. Prikaz faktora koji utječu na proračun gubitaka na putu.. ..	30
Slika 14. Prikaz Omni-usmjerenih i tro-usmjerenih ćelija.....	32
Slika 15. Prikaz interferencije na rubnom dijelovima ćelije.....	40
Slika 16. Korištenje ICIC-a kako bi se izbjegla interferencija na rubnim dijelovima ćelije.....	41
Slika 17. Konvencionalna reuporaba frekvencije.....	42
Slika 18. Djelomična reuporaba frekvencije (PFR-FI).....	43
Slika 19. Meka reuporaba frekvencije.....	44
Slika 20. Vrste ćelija.....	45
Slika 21. Prikaz arhitekture femto ćelije.....	46

Slika 22. Područje Borongaja u programu WiMAP-4G	48
Slika 23. Baze podataka WiMAP-4G programa.....	49
Slika 24. Odabir mjernih jedinica.	50
Slika 25. Proces dodavanja građevina.....	52
Slika 26. Odabir tehnologije pomoću padajućih izbornika	53
Slika 27. Konfiguracija tehnologije.....	53
Slika 28. Odabir kanala koji će se koristiti.....	54
Slika 29. Konfiguracija radijske jedinice.....	55
Slika 30. Konfiguracija antene	56
Slika 31. Simulacija pokrivenosti korištenjem mikro ćelije.	57
Slika 32. Razina snage korištenjem mikro ćelije.....	58
Slika 33. Simulacija pokrivenosti korištenjem femto ćelija.....	59
Slika 34. Simulacija razine snage korištenjem femto ćelija.....	60

Popis tablica

Tablica 1. LTE frekvencijski pojasevi (1/2).....	20
Tablica 2. LTE frekvencijski pojasevi (2/2).....	21
Tablica 3. LTE TDD frekvencijski pojasevi.....	22
Tablica 4. CQI tablica s odgovarajućim SINR vrijednostima.....	34
Tablica 5. QoS parametri i distribucija prometa za određene vrste aplikacija.. ..	37
Tablica 6. Odnos interferencijskih margina i opterećenja.	39



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

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

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

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____
pod naslovom Simulacija LTE mreže na području Borongaja

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

Student/ica:

U Zagrebu, 13.9.2017

J. J. J. J. J.
(potpis)