

Principi planiranja i optimizacije kapaciteta LTE radijske mreže

Karlović, Jelena

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:189422>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Jelena Karlović

PRINCIPI PLANIRANJA I OPTIMIZACIJE KAPACITETA
LTE RADIJSKE MREŽE

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2019.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

**PRINCIPI PLANIRANJA I OPTIMIZACIJE KAPACITETA
LTE RADIJSKE MREŽE
CAPACITY PLANNING AND OPTIMIZATION PRINCIPLES
FOR LTE RADIO NETWORKS**

Mentor: prof. dr. sc. Štefica Mrvelj

Student: Jelena Karlović

JMBAG: 0135237125

Zagreb, rujan 2019.

PRINCIPI PLANIRANJA I OPTIMIZACIJE KAPACITETA LTE RADIJSKE MREŽE

SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada jest dati pregled različitih alata i metoda za izračunavanje kapaciteta LTE radijske mreže, te prikazati analizom prometa potreban kapacitet prilikom planiranja. Alati i metode razlikuju se u mnogim značajkama, pa tako i u načinu planiranja kapaciteta mreže. Analizom prometa prikazani su glavni parametri za određivanje kapaciteta, te njihov utjecaj prilikom planiranja. Izvršeno je analiziranje na osnovu poznatih ulaznih veličina za prosječnu brzinu prijenosa podataka korisnika, te vršne brzine koja se može postići u ćeliji LTE mreže.

KLJUČNE RIJEČI: LTE mreža; planiranje; planiranje pokrivenosti; planiranje kapaciteta; ćelija; brzina prijenosa podataka

SUMMARY

The purpose of this diploma thesis is to give an overview of the various tools and methods for capacity calculation of the LTE radio network, and to show the required capacity when planning through traffic analysis. Tools and methods differ in many features, including how network capacity planning works. The traffic analysis shows the main parameters for determining the capacity and their impact in planning. Analyzes were made based on known input values for the average user data rate and peak data rate that can be achieved in the LTE network cell.

KEYWORDS: LTE network; planning; coverage planning, capacity planning; cell, data rate

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Arhitektura LTE mreže.....	3
2.1. Pristupna mreža.....	4
2.2. Jezgrena mreža	5
2.2.1. Entitet za upravljanje resursima i terećenje (PCRF).....	6
2.2.2. Pristupno središte mobilne lokacije (GMLC)	6
2.2.3. Poslužitelj domaćih pretplatnika (HSS)	6
2.2.4. Pristupnik za paketnu podatkovnu mrežu (P-GW).....	7
2.2.5. Pristupnik posluživanja (S-GW).....	7
2.2.6. Mrežni entitet za upravljanje mobilnošću (MME)	7
2.2.7. Evoluirani centar za prikazivanje mobilne lokacije (E-SMLC).....	8
3. Analiza performansi LTE mreže	9
3.1. MIMO	9
3.2. Propusnost.....	10
3.3. Kašnjenje u korisničkoj ravnini	12
3.4. Kašnjenje u kontrolnoj ravnini	13
3.5. Kvaliteta usluge (QoS)	14
4. Metodologija dimenzioniranja	16
4.1. Ulazni parametri dimenzioniranja LTE mreže	17
4.1.1. Parametar kvalitete usluge.....	17
4.1.2. Parametar pokrivenosti	18
4.1.3. Parametar kapaciteta	19
4.2. Izlazni parametri dimenzioniranja LTE mreže	19
4.3. Proces dimenzioniranja LTE mreže	19
5. Planiranje pokrivenosti i kapaciteta LTE mreže	22

5.1. Planiranje pokrivenosti LTE mreže.....	22
5.1.1. Proračun radio veze	23
5.1.2. Interferencija.....	26
5.1.3. Zahtijevani SINR	26
5.1.4. Broj stanica na temelju pokrivanja.....	27
5.2. Planiranje kapaciteta LTE mreže	28
5.2.1. Izračun prosječne propusnosti ćelije.....	28
5.2.2. Analiza prometa.....	30
5.2.3. Izračun kapaciteta	30
6. Pregled i analiza alata i modela za planiranje i optimizaciju LTE mreže	32
6.1. Excel alat za LTE dimenzioniranje	32
6.2. Infovista alat – Planet.....	36
6.3. Prsten metoda	37
6.4. Cost 231 Hata Model	43
6.5. Okumura-Hata Model.....	44
7. Analiza prometa za određivanje kapaciteta LTE ćelije	46
8. Zaključak	53
Literatura	54
Popis kratica.....	58
Popis slika	60
Popis tablica.....	61
Popis grafikona.....	62

1. Uvod

Mobilne mreže konstantno rastu posljednjih par godina zajedno sa količinom podataka koja se prenosi u mobilnim mrežama i korisničkim zahtjevima. Upravo zbog toga, mobilni operatori su nadogradili postojeće mreže u *Long Term Evolution* (LTE) mrežu. LTE mreža poboljšava korisničko iskustvo osiguravajući zahtijevanu propusnost po korisniku, potreban kapacitet i brzinu prijenosa podataka.

LTE predstavlja jednu od boljih inovacija u razvoju telekomunikacijskih sustava, odnosno mobilnih mreža. Njezina namjena je omogućiti veće prijenosne brzine i kapacitet nego prethodne mreže. Osim toga, ciljevi su i smanjenje kašnjenja, pa samim tim i povećanje kvalitete usluga. Kako bi se udovoljilo svim prethodno navedenim zahtjevima, veoma je važno pravilno i učinkovito pristupiti planiranju i optimiziranju LTE mreže.

Najvažniji parametri prilikom planiranja mreže su utvrđivanje dobre pokrivenosti, a zatim i učinkovito isplaniran i iskorišten kapacitet mreže. Za ostvarivanje pokrivenosti i iskorištenosti kapaciteta, neophodno je utvrditi korake za pravilno dimenzioniranje mreže koja obuhvaća niz parametara.

Kako bi bili najbolji na tržištu, mnoštvo operatora koristi različite modele i alate za planiranje i optimizaciju mreže kako bi postigli najbolje rezultate i samim tim dobili najveći broj korisnika. Mnogi od alata omogućavaju planiranje i optimizaciju u realnom vremenu što predstavlja veliku prednost.

Shodno tome, svrha rada je analizirati modele i razvijene alate za planiranje kapaciteta ćelija LTE mobilne mreže, jer je planiranje kapaciteta radijskog dijela LTE mreže znatno kompleksnije nego je to bio slučaj sa prijašnjim generacijama mreže. Ciljevi rada su dati pregled razvijenih modela i alata za planiranje kapaciteta, analizirati prednosti i nedostatke modela i alata, te naposljetku odrediti potreban kapacitet ćelije/sektora LTE mreže za poznate ulazne veličine.

Ovaj rad se sastoji od sljedećih poglavlja:

1. Uvod
2. Arhitektura LTE mreže
3. Analiza performansi LTE mreže
4. Metodologija dimenzioniranja

5. Planiranje LTE mreže
6. Pregled i analiza alata i modela za planiranje i optimizaciju LTE mreže
7. Analiza prometa za određivanje kapaciteta LTE ćelije/sektora
8. Zaključak

U drugom poglavlju opisana je arhitektura LTE mreže koja se sastoji od jezgrene i pristupne mreže. Unutar tog poglavlja navedeni su glavni elementi mreže i njihove glavne funkcionalnosti.

U trećem poglavlju analizirane su performanse LTE mreže u koje spadaju: MIMO tehnologija, kvaliteta usluge, propusnost i kašnjenja. Svaka od performansi ima utjecaj na planiranje i optimiziranje LTE mreže, te su u ovom poglavlju pobliže objašnjenja njihova značenja i funkcionalnosti.

Četvrto poglavlje objašnjava metodologiju dimenzioniranja koja je važan korak prilikom planiranja mreže. Dimenzioniranje LTE mreže se sastoji od pet koraka kroz koje se detaljno ispituju prethodno navedene performanse mreže.

U petom poglavlju opisano je planiranje LTE mreže, točnije planiranje pokrivenosti i kapaciteta mreže koji su izdvojeni kao najvažniji faktori prilikom optimizacije mreže.

Šesto poglavlje opisuje dva alata koja postoje na tržištu za planiranje mreže, te jedan model, odnosno prsten metodu kojom se određuje kapacitet u silaznoj vezi koja je svakako kritičnija od uzlazne veze. Nadalje, objašnjena su i prikazana i dva modela koja se koriste za planiranje pokrivenosti.

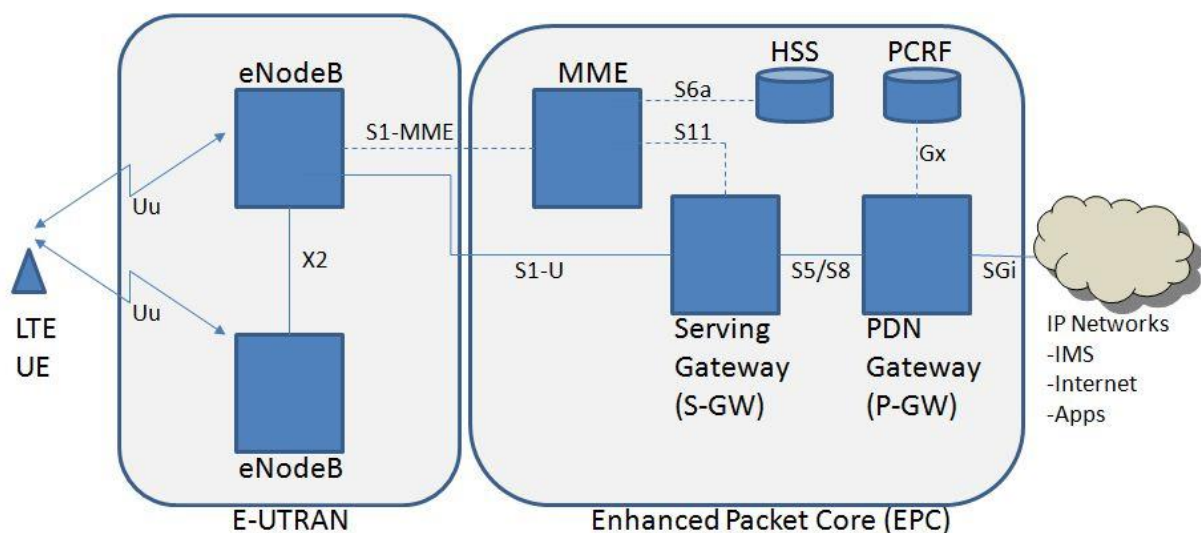
U posljednjem poglavlju, prikazano je analiziranje prometa na osnovu poznatih ulaznih parametara kako izgleda planiranje kapaciteta mreže za silaznu vezu i o čemu sve ovisi.

2. Arhitektura LTE mreže

LTE (*Long Term Evolution*) mreža predstavlja posljednju implementiranu generaciju naprednih tehnologija u mobilnim komunikacijskim sustavima. Razlog zbog kojeg je dizajnirana je omogućavanje usluga koje funkcioniraju isključivo prijenosom paketa kroz mrežu, [1].

Cilj LTE mreže je da pruži besprijekornu povezivost s Internetom korisničke opreme (*User Equipment* - UE) i mreže za paketni prijenos podataka (*Packet Data Network* - PDN) bez da se ometaju aplikacije krajnjih korisnika tijekom mobilnosti, [2]. Glavni dio u arhitekturi LTE mreže je evoluirani paketni sustav (*Evolved Packet System* - EPS) koji se sastoji od paketske jezgrene mreže (*Evolved Packet Core* - EPC) i pristupne mreže (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* – E-UTRAN).

Jezgrena mreža se sastoji od više logičkih čvorova, što je moguće vidjeti na slici 1, a pristupna mreža se sastoji od evoluiranog čvora *eNodeB* koji se povezuje sa korisničkom opremom, odnosno mobilnim uređajima. Jezgrena mreža omogućuje pristup vanjskim podatkovnim mrežama (Internet, Intranet), te može pratiti i mobilnost neaktivnih terminalnih uređaja. Osim toga, jezgrena mreža ima i funkcije koje su vezane za sigurnost (autentikacija), te informacije o korisnicima i naplati.



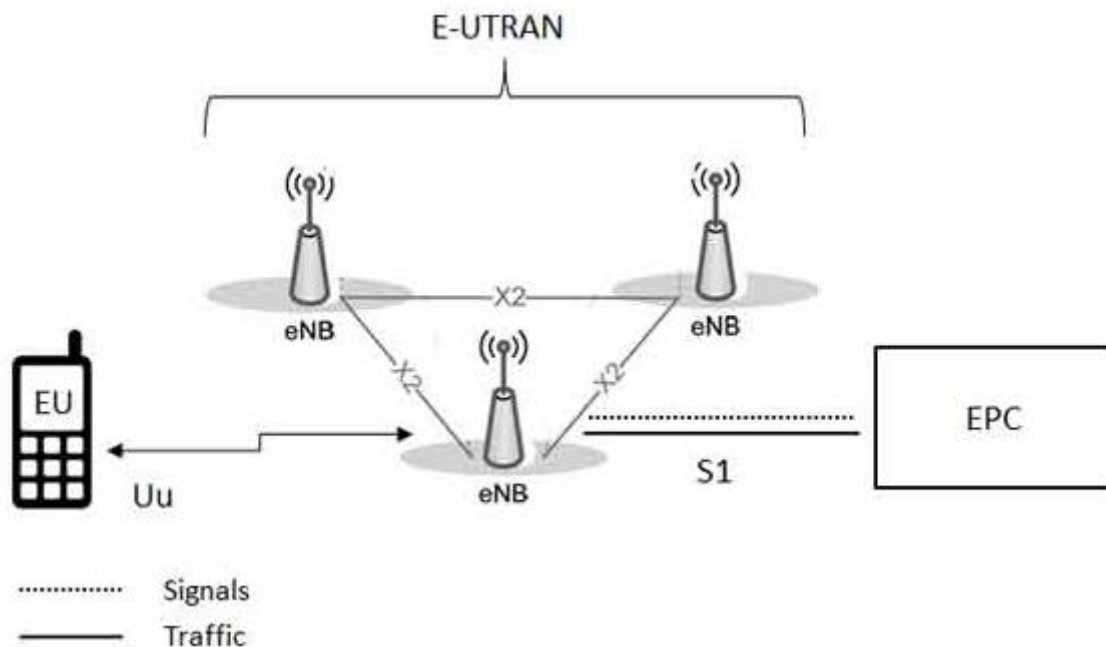
Slika 1. Prikaz EPS arhitekture, [3]

Pristupnu mrežu E-UTRAN čine *eNodeB* čvorovi koji su međusobno povezani X2 sučeljem, a sa jezgrenom mrežom povezana je putem S1 sučelja – točnije, S1-MME (*Mobility Management Entity*) sučelje povezano je sa MME, a S1-U sučelje povezano je sa S-GW (*Service Gateway*).

EPS koristi koncept EPS nositelja za usmjeravanje IP (*Internet Protocol*) prometa od pristupnika za paketnu podatkovnu mrežu (*PDN gateway*) do korisničke opreme. IP paket predstavlja nositelja koji definira određenu kvalitetu usluge (*Quality of Service* - QoS) između pristupnika i korisničke opreme. E-UTRAN i EPC zajedno postavljaju i oslobađaju nositelje u skladu s zahtjevima aplikacija.

2.1. Pristupna mreža

E-UTRAN upravlja radio vezom između mobilne mreže i jezgrene mreže i ima samo jednu komponentu, a to su evoluirane bazne stanice, odnosno *eNodeB*. Na slici 2 može se vidjeti prikaz E-UTRAN dijela mreže.



Slika 2. Prikaz E-UTRAN arhitekture, [4]

Svaki *eNodeB* je bazna stanica koja upravlja mobilnim terminalnim uređajima u jednoj ili više ćelija, te se ona naziva poslužiteljski *eNodeB*. LTE mobilni uređaj u isto vrijeme razgovara samo sa jednom baznom stanicom i jednom ćelijom, dok bazna stanica podržava dvije glavne funkcije, a to su:

- *eNodeB* šalje i prima radio signale svim mobilnim uređajima koristeći analogne i digitalne funkcije obrade signala LTE zračnog sučelja.
- *eNodeB* upravlja radom svih uređaja koji su na niskoj razini šaljući im signalne poruke, kao što su *handover* naredbe, [4].

Svaka bazna stanica je povezana sa jezgrenom mrežom putem S1 sučelja. Sa baznim stanicama povezuje se putem X2 sučelja koje se uglavnom koristi za signalizaciju i prosljeđivanje paketa tijekom *handovera*.

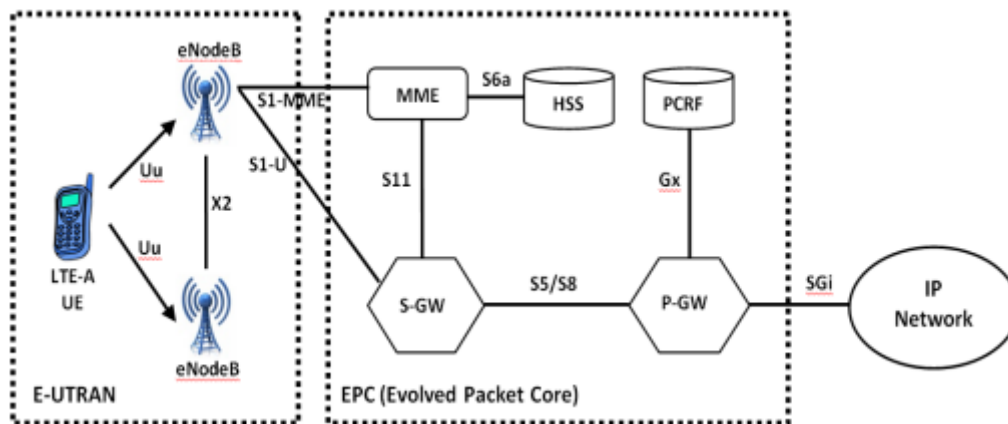
Osim glavnih funkcija koje *eNodeB* obavlja, E-UTRAN obavlja i sve radio funkcije koje su smještene upravo u *eNodeB* čvorovima kao što su:

- upravljanje radio resursima (*Radio Resource Management*) odnosi se na područje koje je vezano uz radio nositelje u koji spada: kontrola radio nositelja, kontrola radio prijema, kontrola radio mobilnosti, raspoređivanje resursa prema korisničkoj opremi u silaznoj i uzlaznoj vezi.
- komprimiranje zaglavlja omogućava učinkovitiju uporabu radijskog sučelja. Komprimira se zaglavlje IP paketa, jer ono može predstavljati višak prilikom prijenosa, posebice malih paketa, kao što je kod prijenosa govora.
- sigurnost je veoma bitna kod toka paketa u mreži, jer svi podaci moraju biti enkriptirani kada se šalju radijskim sučeljem.
- pozicioniranje predstavlja važnu stavku kako bi se pronašla pozicija korisničke opreme. E-UTRAN dostavlja odgovarajuće informacije E-SMLC-u (*Evolved Serving Mobile Location Centre*) kako bi taj element mogao otkriti poziciju.
- povezivost označava signalizaciju prema MME, te put kojim signal nositelj ide prema S-GW-u, [1].

2.2. Jezgrena mreža

Jezgrena mreža je odgovorna za potpunu kontrolu korisničke opreme i uspostavljanje signala nositelja. Glavni čvorovi u jezgrenoj mreži kako je prikazano na slici 3 su:

- PDN Gateway (P-GW)
- Serving Gateway (S-GW)
- Mobility Management Entity (MME)
- Evolved Serving Mobile Location Centre (E-SMLC).



Slika 3. Prikaz jezgrene mreže, [5]

Osim glavnih čvorova, jezgrena mreža sadržava druge logičke čvorove i funkcije, kao što su *Gateway Mobile Location Centre (GMLC)*, *Home Subscriber Server (HSS)* i *Policy Control and Charging Rules Function (PCRF)*, [6].

2.2.1. Entitet za upravljanje resursima i terećenje (PCRF)

PCRF odgovoran je za politiku kontrole odlučivanja, jednako kao i za kontrolu toka. Također, kakva će biti kvaliteta isporučene usluge ovisi o PCRF-u koja mora biti u skladu s korisničkom pretplatom. Uzimajući u obzir kvalitetu usluge, pakete je potrebno rasporediti u odgovarajuće klase što će nadalje utjecati i na brzinu prijenosa paketa. PCRF komunicira sa P-GW-om preko Gx sučelja kako bi mogao upravljati korisnicima i mrežnim informacijama prema već uspostavljenim pravilima, [6].

2.2.2. Pristupno središte mobilne lokacije (GMLC)

GMLC sadržava funkcionalnosti koje su potrebne za podršku uslugama koje se temelje na lokaciji. Nakon što se potvrdi autorizacija, šalje pozicijske podatke MME-u i tako dobiva konačnu lokaciju. GMLC se bazira na SS7 standardu podržavajući SIGTRAN sučelje za IP povezivost, [6].

2.2.3. Poslužitelj domaćih pretplatnika (HSS)

HSS se može definirati kao korisnička baza podataka u kojoj su sadržane brojne korisne informacije, kao što je npr. tarifni model i sva ograničenja za *roaming*. Osim toga, sadrži i informacije o PDN mreži na koju se korisnik može povezati. To može biti u obliku naziva pristupne točke ili PDN adresa. Nadalje, moguće je vidjeti i MME na koji je korisnik trenutno povezan ili registriran. Baza komunicira sa autentikacijskim centrom (*Authentication Centre - AuC*) koji vodi računa o sigurnosti, tj. autentikaciji sigurnosnim ključevima, [6].

2.2.4. Pristupnik za paketnu podatkovnu mrežu (P-GW)

P-GW odgovoran je za dodjeljivanje IP adrese korisničkim uređajima, kao i za provođenje QoS-a i naplatu u skladu sa pravilima definiranim od strane PCRF-a. Također, P-GW odgovoran je za filtriranje IP korisničkih paketa u silaznoj vezi kako bi se ostvarila odgovarajuća kvaliteta usluge s obzirom na vrstu korisničke pretplate. Osim toga, omogućuje i rad s tehnologijama koje nisu standardizirane prema 3GPP¹ (*Third Generation Partnership Project*) i Wi-Max² (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), [6].

2.2.5. Pristupnik posluživanja (S-GW)

Svi korisnički paketi prenose se preko S-GW-a koji predstavlja područje kroz koje paketi „putuju“ između korisničke opreme i *eNodeB* čvorova. Također, zadržava informacije i kada je korisnička oprema u stanju mirovanja i privremeno zadržava podatke u silaznoj vezi sve dok MME ponovno ne uspostavi konekciju do korisničke opreme putem signala nositelja. Osim toga, S-GW obavlja administrativne funkcije u posjećenoj mreži, kao što je prikupljanje podataka za naplatu. Te rad s nekim drugim tehnologijama kao što su GPRS (*General Packet Radio Service*) i UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), [6].

2.2.6. Mrežni entitet za upravljanje mobilnošću (MME)

MME predstavlja kontrolni čvor koji obrađuje signalizaciju između korisničke opreme i jezgrene mreže. MME je odgovoran za pokretanje provjere autentičnosti mobilnog uređaja. On zadržava informacije o lokaciji na razini područja praćenja za svakog korisnika i zatim odabire odgovarajući pristupnik tijekom početnog postupka registracije. MME podržava različite funkcionalnosti, a one su:

- kontrola pristupa mreži – MME upravlja autentikacijom i autorizacijom korisničke opreme. Također, olakšava pristup mreži za korisničke uređaje kako bi se dobila IP povezivost.
- upravljanje radio resursima – MME radi s HSS-om i radio sučeljem mreže kako bi odlučio koja je odgovarajuća strategija upravljanja resursima koja može biti specifična za pojedini korisnički uređaj.

¹ The 3rd Generation Partnership Project je organizacija za standarde koja razvija protokole za mobilnu telefoniju.

² Wi-Max je bežični digitalni komunikacijski sustav namijenjen za formiranje bežičnih regionalnih mreža.

- upravljanje mobilnošću – Jedna od najsloženijih funkcija koje MME obavlja. Osigurava neprekidan međusobni rad, kao što je rad između baznih stanica i između radio pristupnih tehnologija (*Radio Access Technology* – RAT). Slučajevi upotrebe postaju složeniji ovisno o promjeni MME, S-GW, P-GW ili međusobnom radu s drugim mobilnim mrežama.
- upravljanje *roamingom* – MME podržava korisnike izlaznih i ulaznih roaminga iz drugih mreža.
- mogućnost dosega korisničke opreme – MME upravlja komunikacijom sa korisničkom opremom i HSS-om kako bi osigurao informacije o sposobnosti za doseg i aktivnost korisničke opreme.
- upravljanje područjem praćenja – dodjeljuje i ponovno dodjeljuje popis identiteta područja praćenja korisničke opreme.
- zakonito presretanje – budući da MME upravlja upravljačkom (kontrolnom) ravninom mreže, MME može osigurati položaj korisničkog uređaja opremi za zakonsko provođenje nadzora.
- balansiranje opterećenja između S-GW-ova – usmjerava korisničku opremu koja ulazi u područje S-GW-a u odgovarajući S-GW i na taj način postiže uravnoteženje, [7].

2.2.7. Evoluirani centar za prikazivanje mobilne lokacije (E-SMLC)

E-SMLC koristi se kako bi izvršio koordinaciju i planiranje resursa koji su neophodni kako bi se locirala korisnička oprema koja je povezana na pristupnu mrežu. Na točnost procjene pozicije utječu podaci koji se dobivaju putem E-SMLC-a. Putem E-SMLC-a izračunava se konačni položaj koji je baziran na podacima koje zaprima i brzini kretanja korisničke opreme, [1].

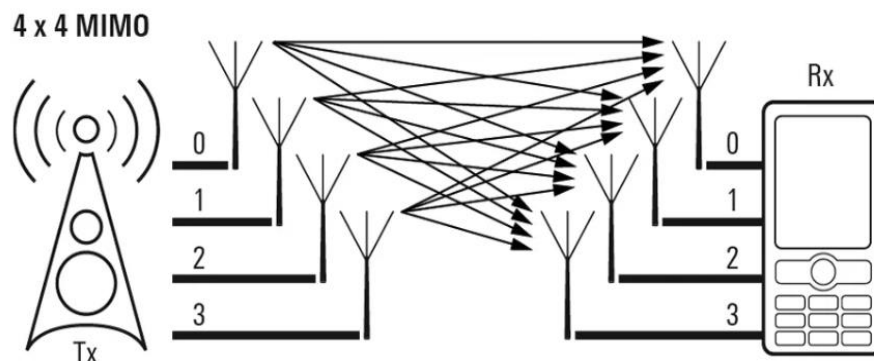
3. Analiza performansi LTE mreže

Pretpostavljene brzine prijenosa podataka često se smatraju brzinama koje će korisnik zaista postići u mobilnoj mreži, međutim to u realnosti nije tako. Na brzinu prijenosa podataka utječu mnogi faktori, a neki od njih su: prometno opterećenje, prigušenje, slabljenje signala i slično. U bežičnoj mreži osim toga utječe i okolina i atmosferski uvjeti, što rezultira realnom brzinom prijenosa podataka.

Na brzinu prijenosa podataka utječu, posebice u LTE mreži i sljedeće performanse: MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) sustavi, propusnost, kašnjenje, te kvaliteta usluge koja je u mrežama postala veoma važan dio planiranja i dizajniranja mreže.

3.1. MIMO

Jedna od glavnih performansi koja utječe na brzinu prijenosa podataka u LTE mreži jest MIMO tehnologija. Prilikom planiranja LTE mreže, cilj je ostvarivati povećanje kapaciteta mobilne mreže i u postizanju tog cilja upravo sudjeluje MIMO sustav. MIMO predstavlja metodu za povećanje brzine prijenosa podataka korištenjem višestruke antene na prijamnoj i odašiljačkoj strani. Na slici 4 prikazana je izvedba MIMO sustava.



Slika 4. MIMO sustav 4x4, [8]

Slika 4 prikazuje MIMO sustav sa izvedbom od četiri antene na prijamnoj i 4 antene na odašiljačkoj strani. Broj antena je jednostavno nadogradiv, a prva verzija je upravo dizajnirana za podržavanje rada do četiri antene na odašiljačkoj i prijamnoj strani.

MIMO tehnologija može se opisati i kao prostorno multipleksiranje. To označava da omogućuje prijenos više od jednog signala prema jednom korisniku putem istog skupa resursa zračnog sučelja. 4x4 MIMO znači da bazna stanica odašilje četiri različita

signala s točno istim blokovima resursa na zračnom sučelju preko četiri antene za odašiljanje na jednog korisnika. Međutim, za primanje signala, korisnička oprema također mora imati četiri antene. Ovaj način udvostručuje propusnu silaznu vezu po bloku resursa u usporedbi sa 2x2 MIMO sustavom, [8].

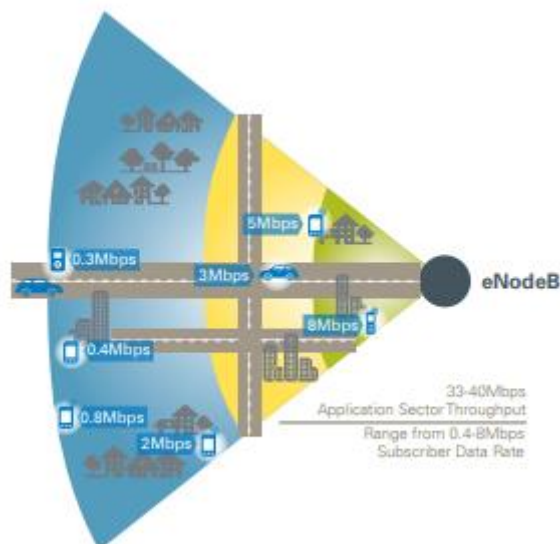
Korištenjem tehnologije višestrukih antena mogu se ostvariti različite mogućnosti, a neke od tih mogućnosti su:

- dobitak višestrukog prijenosa – višestruke antene omogućavaju višestruki prijenos kako bi povećale otpornost na manja odstupanja.
- dobitak polja (snage) – omogućava se višestrukim korisnicima da budu posluženi istovremeno tako što se energija koncentrira u jednom ili više smjerova putem usmjerenih snopova ili prekodiranja.
- dobitak prostornog multipleksiranja – omogućava se povećanje kapaciteta bez dodatne snage ili širine pojasa na način da sustav šalje tokove podataka koji su različiti, a nalaze se na istom radio izvoru. Iako su na istom izvoru, nalaze se u različitim prostornim dimenzijama i šalju se ili primaju preko više kanala koji su povezani pomoću pilot frekvencija koje su također različite, [1].

3.2. Propusnost

Propusnost se definira kao količina podataka koja se može slati kroz mrežu u određenoj jedinici vremena. Najčešće se mjeri u Mbit/s (megabit po sekundi). Propusnost također označava jednu od veličina koje se koriste za izračun kapaciteta mreže.

Ista mreža može pružati različitu propusnost korisnicima s obzirom na područje na kojem se nalaze. Na slici 5 može se vidjeti kako korisnici imaju različitu propusnost.



Slika 5. Primjer propusnosti na različitoj udaljenosti od bazne stanice, [9]

Slika 5 pokazuje različitu propusnost u ovisnosti o udaljenosti od bazne stanice. Osim udaljenosti, na propusnost još utječe: broj korisnika, mobilnost, interferencija, vanjska/unutarnja pokrivenost, visine antena, kao i vrste uređaja koji se koriste na mreži. Upravo zbog toga, prosječna propusnost je najkorisnije mjerenje kada se želi detaljno planirati i optimizirati mreža.

Propusnost predstavlja mjeru količine podataka koja može biti poslana u određenom vremenskom okviru, odnosno mjeri brzinu kojom poruke uspješno stižu na odredište. Ukupna propusnost se može koristiti za procjenu broja istodobnih korisnika koji mogu biti posluženi. Upravo propusnost olakšava operatorima bolje razumijevanje njihovih troškova razvoja i primjene, kao i operativnih troškova omogućavajući im bolje dimenzioniranje i profitabilnost mreže.

Slika 6 prikazuje usporedbu propusnosti u različitim tehnologijama koristeći različite radio tehnologije.



Slika 6. Prikaz prosječne propusnosti različitih tehnologija, [9]

Kako je prikazano na slici 6, LTE mreža pruža značajno poboljšanje po pitanju prosječne propusnosti u usporedbi sa drugim 3GPP tehnologijama. Poboljšanja kapaciteta nužna su kako bi se postigli ciljevi učinkovitosti koji su potrebni kako bi se doseglo masovno tržište i smanjenje troškova po bitu za svakog operatora.

Također, iako i HSPA+ (*Evolved High Speed Packet Access*)³ i LTE koriste 64QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*)⁴ i MIMO tehnologiju, LTE nema problema sa stalnom promjenom raspona zemljopisnog područja kod kojih antena pokriva odašiljače mobilnih uređaja (*cell breathing*). U HSPA+ korisnici dijele isti radio nositelj, ali LTE koristi OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)⁵ tehnologiju koja ima više nositelja i na taj način se osiguravaju vrlo fleksibilne sheme višestrukog pristupa, [9].

3.3. Kašnjenje u korisničkoj ravnini

Za stvarnovremenske i interaktivne usluge, kašnjenje u korisničkoj ravnini predstavlja jednu od važnijih mjera performansi sustava. Minimalno kašnjenje može se izračunati bazirajući se na analizu signalizacije kada se sustav nalazi u neopterećenom stanju, [6]. Upravo to kašnjenje može se definirati kao prosječno

³ Tehnički standard za bežični širokopolasni pristup koji omogućuje brzinu prijenosa podataka do 42,2 megabita po sekundi (Mb/s).

⁴ 64QAM modulacija je modulacija višeg reda koja omogućava da jedan radioval predstavlja 6 bitova podataka tako što će manipulirati amplitudu i fazu radiovalova u jedno od 64 različitih diskretnih i mjerljivih stanja.

⁵ OFDM dijeli raspoloživu širinu pojasa za prijenos signala u velik broj uskopojasnih podnosioca, organiziranih da budu međusobno ortogonalni, koji pojedinačno ili u grupi mogu nositi neovisne informacijske tokove.

vrijeme prvog prenesenog podatkovnog paketa i prijema potvrde paketa koji dobiva od fizičkog sloja.

Kada se računa kašnjenje, potrebno je uključiti i HARQ (*Hybrid Automatic Repeat reQuest*)⁶ retransmisije kojih može biti od 0-30%. Kružno kašnjenje može se postići kada jednosmjerno kašnjenje pomnoži sa dva u korisničkoj ravnini. Jednosmjerno kašnjenje u LTE mreži iznosi 5 ms u optimalnim uvjetima u radio-pristupnoj mreži. Međutim, stvarno kašnjenje ovisi o prometnim opterećenjima u mreži, kao i o radio propagaciji.

3.4. Kašnjenje u kontrolnoj ravnini

Još jedna važna mjera performansi sustava je kašnjenje u kontrolnoj ravnini. U usporedbi sa prethodnim mrežama, u LTE mreži znatno je smanjeno vrijeme uspostave poziva. Osim što je bolja kvaliteta usluge, time se postiže i povećanje trajanja baterije terminalnog uređaja, jer dizajn sustava omogućava brz prijelaz iz stanja mirovanja u aktivno stanje. Na taj način se omogućava terminalnim uređajima da više vremenu budu u stanju mirovanja s malom potrošnjom energije, [6].

Kašnjenje u kontrolnoj ravnini može se mjeriti kao vrijeme koje je potrebno za prijelaz između različitih LTE stanja. LTE se temelji na dva osnovna stanja, a to su: RRC_IDLE (stanje mirovanja) i RRC_CONNECTED (stanje aktivan). LTE mreža zahtijeva da prijelaz između ta dva stanja bude manji od 100 ms ne uključujući pozivno kašnjenje i kašnjenje NAS (*Non-Access Stratum*)⁷ signalizacije.

Kapacitet LTE sustava ovisi o podržanoj propusnosti, te i o broju korisnika koji istovremeno boravi u ćeliji koja je podržana kontrolnom signalizacijom. Očekivanja LTE mreže su da podrži 200 korisnika u aktivnom stanju u ćeliji koja ima frekvenciju do 5 MHz (megaherza) i 400 korisnika u slučaju korištenja većeg frekvencijskog spektra.

Međutim, pretpostavka je da će samo mali broj korisnika biti aktivan istovremeno u primanju i slanju podataka što opet ovisi o dostupnosti podataka za prijenos i uvjetima radio kanala. Također, u svakoj ćeliji može postojati isto tako veliki broj neaktivnih

⁶ HARQ – je kombinacija visokokvalitetnog kodiranja i ispravljanja pogrešaka (ARQ). Kod HARQ-a, izvorni podaci su kodirani s kodom za prethodno ispravljanje pogrešaka, a parni bitovi su odmah poslani s porukom ili se prenose samo na zahtjev kada primatelj otkrije pogrešnu poruku.

⁷ NAS predstavlja skup protokola u LTE mreži i koristi se za prijenos ne radijske signalizacije između korisničke opreme i entiteta za upravljanje mobilnošću (MME).

korisnika koji mogu biti pozvani ili koji mogu započeti prijenos podataka sa malim kašnjenjem, [6].

3.5. Kvaliteta usluge (QoS)

Kvaliteta usluge (*Quality of Service – QoS*) važan je dio planiranja i dimenzioniranja u LTE mrežama. Kvaliteta usluge predstavlja sposobnost mreže za provedbu različitih prioriteta od strane različitih aplikacija, korisnika, podataka garantirajući određenu razinu značajki za podatkovnu sesiju, [9]. Korisnici često koriste usluge ovisne o vremenu, a neki jednostavno žele kvalitetnu uslugu. LTE je upravo dizajniran kako bi ostvario korisničko zadovoljstvo kvalitetom usluge.

U LTE mreži implementiran je QoS između CPE (*Customer-Premises Equipment* ili *Customer-Provided-Equipment*) i PDN *gateway-a* i zbog toga koristi uspostavu nosive usluge koja predstavlja virtualni koncept koji se uspostavlja kako bi se osigurao posebni tretman za određeni promet.

Postoje dvije vrste QoS nositelja:

- standardni (*default*)
- namjenski (*dedicated*).

Kada se korisnička oprema prvi put spoji na LTE, dodijeli joj se standardni nositelj koji ostaje dokle god je korisnička oprema priključena. Svaki zadani nositelj dolazi sa IP adresom, a korisnička oprema može imati i dodatne zadane nositelje, [10]. Standardni nositelj predstavlja *best effort* uslugu što znači da brzina i kvaliteta usluge mogu varirati ovisno o prometnom opterećenju.

Što se tiče namjenskog nositelja, oni pružaju namjenski tunel za jedan ili više specifičnih vrsta prometa (VoIP, video itd.). Namjenski nositelj dijeli IP adresu koja je uspostavljena na standardnom nositelju i zbog toga on ne zahtijeva zauzimanje dodatnih adresa. Namjenski nositelj može biti GBR (*Guaranteed Bit Rate*) ili *non-GBR*, dok je standardni nositelj *non-GBR*. Namjenski nositelj koristi predloške toka prometa kako bi se ostvario poseban utjecaj na specifične usluge, [10].

U LTE mreži parametri QoS-a su:

- QCI (*QoS Class Identifier*)
- ARP (*Allocation and Retention Priority*)

- GBR (*Guaranteed Bit Rate*)
- MBR (*Maximum Bit Rate*)
- APN-AMBR (*Access Point Name-Aggregate Maximum Bit Rate*)
- UE-AMBR (*User Equipment-Aggregate Maximum Bit Rate*).

QCI označava devet različitih karakteristika QoS performansi svakog IP paketa. Svaki QCI sadrži standardizirane vrijednosti performansi, kao što su: GBR ili *non-GBR*, prioritet, kašnjenje paketa, omjer izgubljenih i ukupno prenesenih paketa, [11].

Zahtijevanje novog EPS nositelja u mreži sa nedovoljno resursa uzrokuje odlučivanje jednog od mrežnih entiteta (P-GW, S-GW ili eNB) bazirajući se na ARP-u (niz cjelobrojnih vrijednosti od 1 do 15 pri čemu 1 označava najvišu razinu prioriteta), hoće li:

- ukloniti već postojeći EPS nositelj i stvoriti novi (npr. ukloniti jedan nositelj koji ima niski ARP prioritet kako bi se kreirao jedan nositelj sa visokim ARP prioritetom).
- odbaciti kreiranje novog EPC-a.

Dakle, ARP se uzima u obzir samo kada se odlučuje hoće li stvoriti novi EPS nositelj. Kada se stvore novi nositelj i isporučivanje krene kroz njega, ARP ne utječe na prioritet isporučenog paketa, pa stoga mrežni entitet prosljeđuje pakete bez obzira na njihove ARP vrijednosti. Jedan od najjednostavnijih primjera upotrebe ARP-a predstavlja žurni VoIP poziv, kada se već postojeći EPS nositelj uklanja, te se zatim stvara novi za žurni poziv, [11].

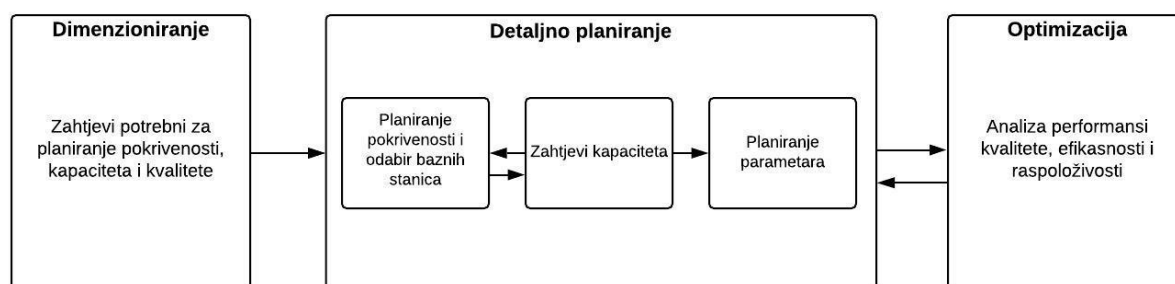
Za GBR tip nositelja koristi se GBR parametar koji označava treba li LTE mreža garantirati brzinu prijenosa. Za GBR tip nositelja koristi se i MBR koji označava maksimalnu brzinu prijenosa koja je pružena u LTE mreži. Ako se premaši specificirana MBR vrijednost svakog paketa koji stigne na nositelj, onda se isti odbacuje.

APN-AMBR predstavlja ukupnu širinu pojasa (brzinu prijenosa) za *non-GBR* EPS nositelje, te se ona odnosi na sve *non-GBR* EPS nositelje i pri tome je ograničena. Za sve *non-GBR* EPS nositelje koji su povezani sa istom korisničkom opremom, UE-AMBR označava maksimalnu širinu pojasa (brzinu prijenosa) koja je dopuštena, neovisno o tome koliko korisnička oprema ima PDN konekcija.

4. Metodologija dimenzioniranja

Prilikom planiranja mreže, dimenzioniranje predstavlja inicijalnu fazu, te pruža procjenu stanja mežnih elemenata, kao i kapacitet tih elemenata. Svrha dimenzioniranja je odrediti potreban broj baznih stanica za podržavanje prometa na nekom području.

Dimenzioniranje je dio cjeloukupnog procesa planiranja koji uključuje detaljno planiranje i optimizaciju mobilne mreže, te predstavlja veoma važan korak u planiranju mreže.



Slika 7. Proces planiranja mreže

Izvor: [12]

Slika 7 pokazuje kako izgleda proces planiranja mreže i poziciju dimenzioniranja prilikom planiranja mreže. Dimenzioniranje je bazirano na skupini ulaznih parametara koji mogu uključivati područje baznih stanica, očekivani promet, kao i očekivanu kvalitetu usluge – QoS. Na taj način, može se ocijeniti koji su zahtjevi potrebni za mrežnu infrastrukturu. To je izvedivo korištenjem alata za dimenzioniranje pristupne i jezgrene mreže. Međutim, moguće je i korištenje jednostavnijih modela pomoću kojih se modeliraju stvarni uvjeti u odnosu na detaljno planiranje, [12].

Što se tiče bežične mreže, dimenzioniranje je direktno povezano s kvalitetom i efektivnošću mreže i uvelike može utjecati na njezin razvoj, te zbog toga prati ove korake:

- analiza prometa/podataka
- planiranje područja pokrivenosti
- procjena kapaciteta
- dimenzioniranje resursa prometa.

Ispravan skup ulaza presudan je za dimenzioniranje kako bi se dobili točni rezultati. Dimenzioniranje bežične mobilne mreže zahtijeva neke temeljne podatke što se odnosi na: broj korisnika, raspodjelu prometa, zemljopisno područje koje se obuhvaća, frekvencijski pojas, dodijeljenu širinu pojasa (*bandwidth*), te zahtjeve za pokrivenost i kapacitet. Svaka bežična mreža ima svoje vlastite parametre, te s analizom prometa dobiva se procjena o vrsti prometu u mreži.

Cilj dimenzioniranja LTE mreže je procijeniti potrebnu gustoću i konfiguraciju ćelija na području na kojem se planira uspostaviti mreža. Početne aktivnosti planiranja LTE pristupa uključuju i proračun radio veze i analizu pokrivenosti, procjenu kapaciteta bazne stanice, procjena količine baznih stanica i pristupnih *gatewaya* (MME), kao i hardverske konfiguracije i opreme na sučeljima, [12].

4.1. Ulazni parametri dimenzioniranja LTE mreže

Važnu stavku predstavlja utvrđivanje razlika između ulaznih i izlaznih parametara dimenzioniranja LTE mreže. Ovaj dio govori o ulaznim parametrima dimenzioniranja koji se koriste u razvoju metoda i modela za LTE dimenzioniranje. Ulazni parametri korišteni za LTE dimenzioniranje mogu se podijeliti u tri skupine, a to su: kvaliteta, pokrivenost i kapacitet.

4.1.1. Parametar kvalitete usluge

Ulazni parametri koji se odnose na kvalitetu su propusnost i vjerojatnost blokiranja. Ti parametri predstavljaju korisničke zahtjeve kako bi se osigurala određena razina usluge svojim korisnicima i izravno se prevode u parametre kvalitete usluge. Osim toga, performanse ruba ćelije također su značajne u dimenzioniranju mreže, te se koriste tri metode kako bi se iste odredile.

U metode spadaju maksimalna definirana korisnička propusnost na rubu ćelije, maksimalna pokrivenost, te unaprijed definirani radijus ćelije. Ako je unaprijed definiran radijus ćelije, parametri se mogu mijenjati kako bi se osigurala brzina podataka koja je utvrđena na toj veličini ćelije. Pomoću ove funkcije, omogućava se fleksibilnost optimiziranja prijenosne snage i određivanja pogodne brzine podataka koja odgovara toj snazi, [12].

4.1.2. Parametar pokrivenosti

Parametar pokrivenosti zasniva se na zahtjevima propusnosti na rubu ćelije. *Radio Link Budget*⁸ (RLB) veoma je važan za planiranje pokrivenosti u LTE mreži. Parametri koji se koriste za računanje mogućnosti RLB-a su sljedeći:

- širina pojasa (*bandwidth*) - Kada se računa RLB uzima se u obzir samo frekvencija nositelja. Konfiguracija širine pojasa utječe na prekomjernu i ukupnu propusnost. Najbolja značajka mreže postiže se sa uporabom maksimalne širine pojasa od 20 MHz (uzimajući u obzir i maksimalnu brzinu podataka).
- Tx/Rx (odašiljačka snaga i prijemna snaga bazne stanice) parametri – Odašiljačka snaga bazne stanice mora biti postavljena s obzirom na hardverska ograničenja. Odašiljačka snaga bazne stanice najčešće je postavljena na snagu od 8 do 100 W u ovisnosti od opreme bazne stanice. Uzimajući u obzir pravila, niska odašiljačka snaga se postavlja kada je i širina pojasa manja, a velika odašiljačka snaga postavlja se kada je širina pojasa velika.

Ukupna snaga bazne stanice se dijeli jednako na sve podnositelje. Što je manji broj podnositelja dodijeljen korisniku, manja je snaga koju prima korisnička oprema.

Odašiljačka snaga korisničke opreme se dijeli samo među podnositeljima koji sudjeluju u tom prijenosu podataka. Kada korisnička oprema radi sa manjim brojem podnositelja, povećat će odašiljačku snagu po podnositelju poboljšavajući pokrivenost uzlazne veze.

- pojačanje i smanjenje snage antene – Snaga antene ovisi i o tome o kakva se antena koristi. Najčešći parametri antena koje se koriste su snage 18 dBi (decibel isotropic) za 2x2 MIMO u silaznoj vezi, a 0 dBi u uzlaznoj vezi.
- ostali gubici – Ostali gubici ovise o scenarijima u kojima se mreža planira i nalazi. Pokrivenost mreže ovisi i o okolišu, ako je u pitanju zastupljenost mreže u unutarnjem prostoru (npr. zidovi, staklena površina i slično).

⁸ Radio Link Budget (RLB) predstavlja sumu odašiljane snage sa svim gubicima i dobitcima u sustavu i to omogućava izračun snage primljenog signala.

- buka bazne stanice – Uobičajena razina smetnji za baznu stanicu iznosi 2-3 dB, te može ići do 7 dB, [13].

4.1.3. Parametar kapaciteta

Kapacitet prilikom dimenzioniranja mreže mora ostvariti određene zahtjeve. Zahtjevi koji se odnose na planiranje kapaciteta su broj korisnika u sustavu, njihove tražene usluge i razina upotrebe te usluge od strane korisnika. Osim toga za planiranje kapaciteta važni su i upotrijebljeni raspoloživi spektar i propusnost kanala. Analiza prometa i podaci o prometu (govor, podaci) koriste se za određivanje broja korisnika podržanih od jedne ćelije. Također, nerijetko se može koristiti za izračun broja korisnika i radijus ćelije.

Glavni cilj planiranja kapaciteta jest utvrditi sposobnost sustava na temelju potrebnih resursa da podržava određeni broj korisnika s obzirom na određenu razinu kvalitete usluge.

4.2. Izlazni parametri dimenzioniranja LTE mreže

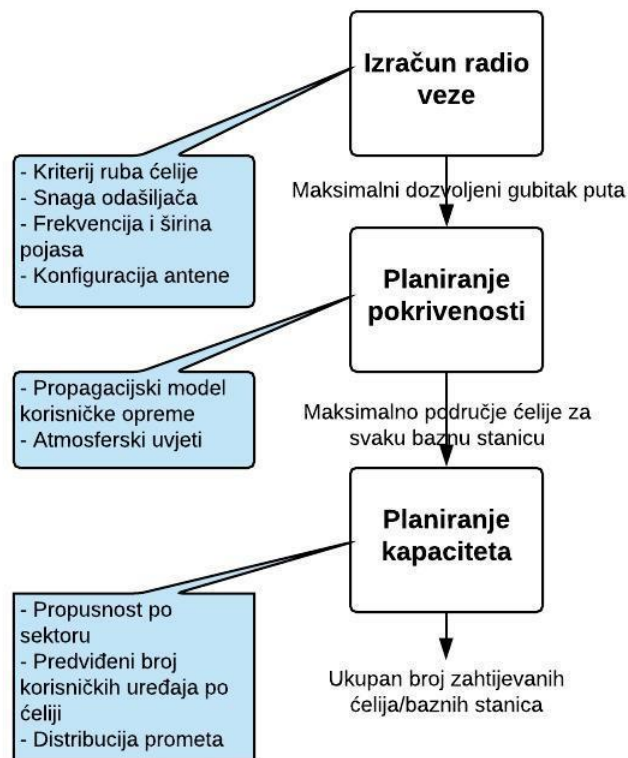
Izlazni parametri su već neizravno raspravljeni u prethodnom odjeljku, a oni predstavljaju rezultate faze dimenzioniranja koji se nadalje koriste za procjenu izvedivosti i troškova mreže. Dobiveni rezultati se mogu nadalje koristiti u detaljnom mrežnom planiranju i planiranju jezgrene mreže. Dimenzionirana LTE mreža može pomoći timu koji radi na planiranju jezgrene mreže kako bi mogli odrediti određene popravke koje su potrebne u početnoj fazi planiranja mreže.

Veličina ćelije predstavlja glavni izlazni parametar kod dimenzioniranja mreže. Dvije procjene veličine ćelije se uzimaju u obzir, jedna od procjene pokrivenosti, a druga od procjene kapaciteta. Kao konačni izlazni parametar uzima se manja veličina. Nakon toga, veličina ćelije služi kako bi se odabrao broj mogućih posluženih korisnika. Dimenzioniranje sučelja je posljednji korak pri dimenzioniranju LTE mreže.

4.3. Proces dimenzioniranja LTE mreže

Proces dimenzioniranja započinje sa izračunavanjem RLB-a kako bi se odredio maksimalni gubitak puta. Rezultat ovog koraka ovisi o korištenom propagacijskom modelu. Procjena veličine ćelije koja se određuje u ovom koraku, ovisi o maksimalnoj dozvoljenoj veličini ćelije. Ovaj parametar se koristi kako bi se izračunao broj baznih stanica u području u kojem se planiranje izvodi.

Računanje kapaciteta prati proces koji se odnosi na planiranje pokrivenosti, te ako parametar pokrivenosti odgovara procjeni kapaciteta, onda nema potrebe izmjenama u prethodnom koraku. Kapacitet baznih stanica je sljedeći korak koji upotpunjava proces dimenzioniranja mreže. Na slici 8 prikazan je redoslijed dimenzioniranja mreže koji je opisan u prethodnim rečenicama.



Slika 8. Proces dimenzioniranja mreže

Izvor: [14]

Na slici 8 se može vidjeti da se kod dimenzioniranja mreže prvo određuje radioveza s obzirom na kriterij ruba ćelije, odašiljačke snage, frekvencije, *bandwidth-a*, te konfiguracije antene kako bi se dobio maksimalno dozvoljeni gubitak puta. Nakon toga se određuje, odnosno procjenjuje pokrivenost za svaku baznu stanicu s obzirom na ulazne parametre i propagaciju korisničke opreme. Naposljetku, određuje se planirani kapacitet, odnosno ukupan broj potrebnih baznih stanica.

Točnije, dimenzioniranje u LTE mreži ide prema sljedećih pet koraka, a to su:

1. Analiza podataka i prometa – prvi korak kod LTE dimenzioniranja koji uključuje prikupljanje podataka. Analiziraju se podaci i zahtjevi operatora kako bi se utvrdila najbolja konfiguracija sustava.

2. Analiza vrsta prometa – u ovoj fazi se razmatraju vrste prometa koje se najčešće prenose u LTE mreži, a to su: VoIP, prijenos videa uživo, te pretraživanje.
3. Planiranje pokrivenosti – najvažniji korak u planiranju mreže gdje u središtu ostaje RLB pomoću kojeg se testira gubitak puta i zahtijevane vršne brzine podataka u odnosu na ciljanu razinu pokrivenosti. Na taj način se dobiva učinkovit raspon ćelija za izradu baznih stanica.
4. Planiranje kapaciteta – s obzirom na procjenu veličine ćelije i broja mjesta za bazne stanice, provodi se i provjera analize pokrivenosti za potreban kapacitet. Jedan od glavnih parametara za određivanje kapaciteta je i odnos signal-šum u ćeliji. Osim toga, na kapacitet utječu i ostali čimbenici: implementacija alata za planiranje paketa, konfiguracija antena i razina smetnji.
5. Dimenzioniranje prijenosnih kapaciteta - dimenzioniranje prijenosnih kapaciteta se bavi dimenzioniranjem sučelja između različitih mrežnih elemenata. U LTE mreži, S1 (koji se nalazi između bazne stanice i *gatewaya*) i X2 (koji se nalazi između dvije bazne stanice) predstavljaju dva sučelja koja se dimenzioniraju, [12].

Najvažniji koraci kod planiranja i dimenzioniranja LTE mreže su treći i četvrti korak, a to su planiranje pokrivenosti i kapaciteta koji se detaljnije obrađuju u sljedećem poglavlju.

5. Planiranje pokrivenosti i kapaciteta LTE mreže

Jedan od najbitnijih koraka prilikom planiranja mobilne mreže predstavlja planiranje radijske mreže. Proces planiranja mreže može biti doista kompleksan, te zahtijevati i više vremena. Glavni cilj je osigurati da je planirano područje u potpunosti pokriveno. Svaka mobilna mreža zahtijeva planiranje područja smještaja baznih stanica unutar ćelije, kako bi se osigurala potpuna pokrivenost, te maksimalni zahtjevi po pitanju kapaciteta i izbjegavanje interferencije.

Planiranje ćelija, te same mreže zahtijeva različite procese koji zajedno čine uspješno isplaniranu i optimiziranu mrežu. Planiranje i optimizacija LTE mreže može biti podijeljena u sljedeće tri faze prema [14]:

1. Faza dimenzioniranja – u ovoj fazi određuje se odgovarajući broji baznih stanica kako bi se svi zahtjevi kvalitete usluge ispunili. Prije nego se odredi pokrivenost, kapacitet i kvaliteta usluge, potrebno je odrediti kriterij planiranja i odabrati parametre.
2. Faza planiranja i implementacije – ova faza započinje terenskim testiranjima postavljanja bazne stanice s obzirom na područje implementacije, te su ovakva planiranja veoma korisna kada se izvršava verificiranje ponašanja sustava u stvarnom okruženju. Ova faza omogućava dobitak točne pozicije bazne stanice i veličine svih parametara.
3. Faza optimizacije – ova faza optimizacije obuhvaća analiziranje mrežnih performansi, te se shodno toj analizi postavljaju parametri poput snage antene, visine na kojoj se nalazi i sl. Kada se postignu zadovoljavajući uvjeti, ovaj proces više se ne ponavlja. Prilikom optimizacije u obzir se uzima i da različite usluge zahtijevaju različitu kvalitetu.

Planiranje radijske mreže je jedan od najbitnijih koraka u planiranju mreže, te on obuhvaća najvažnije faze i analize pokrivenosti, kapaciteta, frekvencija i radijskog linka. Upravo zbog toga, ovo poglavlje objašnjava planiranje pokrivenosti i kapaciteta kao najvažnije faze procesa planiranja mreže.

5.1. Planiranje pokrivenosti LTE mreže

Prilikom planiranja mreže, planiranje pokrivenosti prvi je korak u procesu dimenzioniranja koji daje procjene resursa koji su potrebni kako bi se pružile usluge sa danim parametrima sustava na tom području implementacije. Također, planiranje

pokrivenosti se testira kako bi se sa sigurnošću potvrdilo da nema „rupa“ u pokrivenosti (npr. da se ne dogodi da je korisnička oprema bez usluga u području pokrivenom uslugama).

Osim toga, planiranje pokrivenosti ne uzima u obzir kvalitetu usluge niti korisničko iskustvo unutar ćelije. Krajnji cilj je osigurati odgovarajuće resurse i broj baznih stanica unutar ćelije kako bi se omogućila dobra pokrivenost. Planiranje pokrivenosti sastoji se od procjene silazne i uzlazne radijske veze. Izračunava se maksimalni gubitak na putu (*path loss*) na temelju SINR (*Signal to Interference plus Noise Ratio*) razine na prijemu uzimajući u obzir interferenciju nastalu zbog prometa, [12].

Pomoću proračuna radio veze i proračuna gubitaka na putu uspješno se izvršava planiranje pokrivenosti. Proračun radio veze objašnjava i slijedi metode koje su korištene za izračun potrebnog SINR-a, efekta interferencije i konačno izračuna broja baznih stanica na temelju pokrivenosti.

5.1.1. Proračun radio veze

RLB se izračunava kako bi se procijenio dozvoljeni gubitak na putu. Transmisijaska snaga, dobitci antene, gubitci sustava, dobitci zbog raznolikosti itd uključeni su u proračun radio veze. RLB daje maksimalni dopušteni gubitak puta s obzirom na koji se računa veličina ćelije koristeći za to prikladan model. Proračun se izvodi u oba smjera i za silaznu i za uzlaznu vezu, a radijus ćelije izračunava se ili za kapacitet ili za pokrivenost u oba smjera i odabire se minimalan radijus. Proračun radio veze ovisi o različitim parametrima na kraju odašiljača ili prijemnika koji doprinose efektivnom proračunu gubitka puta, kao što je prikazano u jednadžbi prema [12]:

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

Gdje je:

- $PathLoss_{dB}$ = ukupni gubici na putu nastali na putu od odašiljača do prijemnika (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 prijemnika (dB)
- $RxNoise_{dB}$ = šum na prijemniku (dBm)

Jednadžba 1 prikazana je u jedinicama decibela radi jasnoće, međutim, ona se može napisati i na sljedeći način:

$$PathLoss = \frac{TxPower \times TxGains \times RxGains}{TxLosses \times RequiredSINR \times RxLosses \times RxNoise} \quad (2)$$

U ovom slučaju, mjerna jedinica je *watt* (W). U LTE mrežama osnovni pokazatelj učinka predstavlja potrebni SINR, te se maksimalni dopušteni gubici računaju prema [12]:

$$SINR \geq RequiredSINR$$

$$SINR = \frac{AveRxPower}{Interference + RxNoise} = \frac{AveRxPower}{OwnCellInterference + OtherCellInterference + RxNoise} \quad (3)$$

Gdje je:

- $SINR$ = *Signal to Interference and Noise Ratio*
- $AveRxPower$ = prosječna snaga na prijemniku (W)
- $Interference$ = snaga interferencije (W)
- $OwnCellInterference$ = snaga interferencije vlastite ćelije (W)
- $OtherCellInterference$ = snaga interferencije nastale zbog susjednih ćelija (W)

U silaznoj vezi, pretpostavljajući da je maksimalno dostupna snaga transmisije podijeljena jednako, prosječna snaga na prijemnoj strani ($AveRxPower_{DL}$) alocirana korisniku računa se prema [12]:

$$AveRxPower_{DL} = \frac{AveTxPower}{LinkLoss_{DL}} = \frac{MaxNodeBTxPower}{CellBandwidth} \times \frac{AllocatedBandwidth}{LinkLoss_{DL}} \quad (4)$$

Gdje je:

- $AveTxPower$ = prosječna snaga transmisije (W)
- $LinkLoss_{DL}$ = ukupni gubitci na putu na silaznoj vezi (W)

- $MaxNodeBTxPower$ = maksimalna snaga koju transmitira bazna stanica (W)
- $CellBandwidth$ = alocirana pojasna širina ćelije u LTE mreži (MHz)
- $AllocatedBandwidth$ = pojasna širina kanala preko kojeg se šalje signal (MHz)

$MaxNodeBTxPower$ kod LTE mreže ovisi o širini pojasa koji može biti u rangu veličine od 1,25 do 20 MHz. Za pojasnu širinu od 5 MHz $MaxNodeBTxPower$ iznosi 20 Watt-a, a 40 W preko tog ograničenja.

U uzlaznoj vezi, pretpostavljajući da nema kontrole snage, prosječna primljena snaga ($AveRxPowerUL$) iznosi:

$$AveRxPowerUL = \frac{MaxUETxPower}{LinkLossUL} \quad (5)$$

Gdje je:

- $MaxUETxPower$ = maksimalna snaga transmisije korisničke opreme (W)
- $LinkLossUL$ = ukupan gubitak na putu u uzlaznoj vezi (W)

$MaxUETxPower$ može biti ili 0,125W ili 0,25 W. Gubitak na vezi uključuje i gubitak na putu koji ovisi o udaljenosti i ostalim gubicima na predajniku i prijamniku. Gubitak veze može se još opisati i kao prema [12]:

$$LinkLoss = \frac{RxGains \times TxGains}{PathLoss \times RxLosses \times TxLosses \times OtherLosses} \quad (6)$$

Gdje je:

- $OtherLosses$ = uključuje sve gubitke koji nisu pokriveni RLB terminom

S obzirom na prethodno prikazane formule, u sljedećoj može se dobiti rezultat za maksimalno dozvoljenih put gubitaka:

$$SINR = \frac{AveRxPwr(own)}{I+N} = \frac{AveRxPwr(own)}{I_{other}+N} = \frac{\frac{AveTxPwr(own)}{LinkLoss(own)}}{\sum_{k \neq own} \frac{AveTxPwr(k)}{LinkLoss(k)} + N} \quad (7)$$

Korištenjem parametara iz jednadžbe dobivaju se sljedeće za $SINR$:

$$SINR = \frac{\frac{1}{LinkLoss(own)}}{\sum_{k \neq own} \frac{1}{LinkLoss(k)} + \frac{CellBW}{MaxTxPwr} \times ThermalNoiseDensity \times RxNoiseFigure} \quad (8)$$

Nadalje, sada zahtjev izgleda ovako:

$$SINR \geq RequiredSINR \quad (9)$$

Koristeći prethodnu jednadžbu, dobivamo sljedeće za gubitak puta:

$$PathLoss(own) \leq \frac{1}{(\sum_{k \neq own} \frac{1}{PathLoss(k)} + NoiseComponent) \times RequiredSINR} \quad (10)$$

U prethodno navedenim formulama, prikazano je kako se izračunava gubitak puta i o kojim parametrima sve ovisi i da se taj izračun dobiva iz proračuna radijskog linka kako je i navedeno.

5.1.2. Interferencija

Interferencija je jedan od glavnih problema u radijskom dijelu mreže, te zbog toga različiti sustavi koriste dodijeljeni spektar frekvencija kako bi izbjegli koliziju signala, odnosno interferenciju, [15]. Nakon izračunavanja maksimalnih gubitaka na putu koji se dobivaju iz jednadžbi za radiovezu, uključuje se i efekt interferencije kako bi se dobio točniji izračun.

Jednadžba za interferenciju za silaznu vezu iznosi prema [12]:

$$i = \sum_{k \neq own} \frac{PathLoss(own)}{PathLoss(k)} \quad (11)$$

Predstavljajući ovu interferenciju unutar jednadžbe iznad, dobiva se:

$$\frac{1}{i + NoiseComponent \times PathLoss(own)} \leq RequiredSINR \quad (12)$$

Nakon toga dobiva se:

$$MaxPathLoss = \frac{1 - i_{MaxPathLoss} \times RequiredSINR}{NoiseComponent \times RequiredSINR} \quad (13)$$

Prethodna jednadžba pokazuje maksimalni gubitak puta za LTE mrežu. Jako je važno primijetiti da su komponente RLB unutar *Noise Component*. *Noise Component* predstavlja inverziju od konvencionalnog gubitka puta.

5.1.3. Zahtijevani SINR

Zahtijevani SINR predstavlja jednu od glavnih performansi za LTE mrežu. Rub ćelije definiran je s obzirom na zahtijevani SINR za danu propusnost ćelije. Zahtijevani SINR ovisi o:

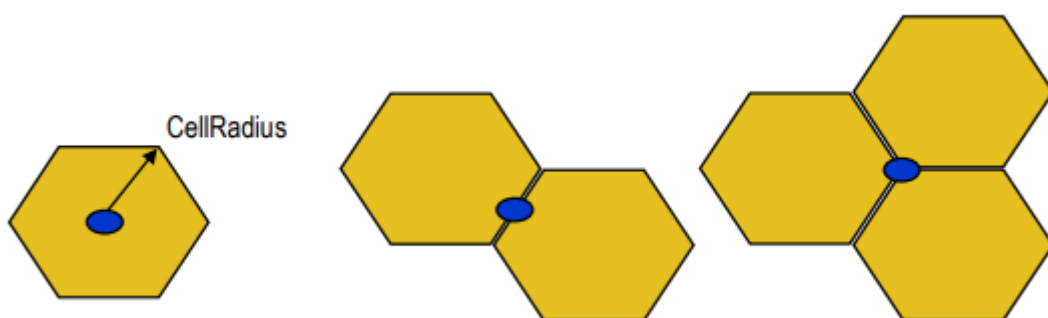
- modulacijskim i shemama kodiranja (*Modulation and Coding Schemes - MCS*)
- propagacijski model.

Što se više koristi MCS, veći je potreban SINR i obratno. Potreban SINR može se procijeniti pomoću dvije različite metode prema [12]:

- pomoću tablica 'Propusnost vs. Prosječni odnos signal-šum' (*Signal to Noise Ratio - SNR*). Te tablice se dobivaju kao rezultat simulacije razine veze, te su za svaku vrstu propagacijskog modela i vrste antena potrebne drugačije tablice. Važno je naglasiti da se u ovom slučaju koristi SNR umjesto SINR.
- korištenjem Alpha-Shannonove formule pruža se aproksimacija rezultata razine veze, te u ovom području nisu potrebne stvarne simulacije.

5.1.4. Broj stanica na temelju pokrivanja

Maksimalno dozvoljeni gubitak puta može se koristiti za izračunavanje radijusa stanice koristeći propagacijski model. Za određivanje radijusa ćelije koristi se COST231 model za gubitak puta. Koristi se za frekvencijske nositelje između 1500 i 2000 MHz, a može se koristiti i za frekvencije od 2600 MHz s obzirom da je poznato da se gubici kompenziraju sa gubicima na antenama kod visokih frekvencija. S obzirom na radijus ćelije, područje pokrivanja ćelije ovisi o konfiguraciji ćelije. Bazne stanice, odnosno antene mogu biti omni-usmjerene, dvo-usmjerene, te tro-usmjerene kako je i prikazano na slici 9.



Slika 9. Prikaz različitih vrsta ćelija, [12]

Broj mjesta za implementaciju može se lako izračunati pomoću unosa vrijednosti *CellArea* i *DeploymentArea*:

$$NumSitesCoverage = \frac{DeploymentArea}{SiteArea} \quad (14)$$

Gdje je:

- *NumSitesCoverage* = broj baznih stanica za potpunu pokrivenost
- *DeploymentArea* = područje implementacije
- *SiteArea* = područje bazne stanice

5.2. Planiranje kapaciteta LTE mreže

Kapacitet bazne stanice označava maksimalan broj korisnika koje bazna stanica može opskrbiti željenom kvalitetom usluge ili maksimalnom propusnošću koja može biti pružena u datom trenutku. Povećanje kapaciteta označava povećanje korisnika koji mogu biti posluženi od strane ćelije, odnosno bazne stanice. Planiranje kapaciteta, kao i planiranje pokrivenosti ima za cilj dati procjenu broja resursa ili baznih stanica potrebnih za određeno područje. Međutim, kod planiranja kapaciteta, kvaliteta usluge je ključan parametar, [14].

Planiranje kapaciteta izvodi se pomoću alata za simulaciju koji uzima različite parametre i crta SINR graf za korisničku opremu na različitoj udaljenosti od odašiljača, te se njima dobivaju rezultati:

- prosječna propusnost za korisnike koji se nalaze u blizini bazne stanice
- prosječna propusnost za korisnike koji se nalaze na srednjoj udaljenosti od bazne stanice
- prosječna propusnost za korisnike koji se nalaze daleko od bazne stanice
- broj korisničke opreme koja se može smjestiti u ćeliju sa propusnošću koja je prihvatljiva za svaki uređaj.

Uz ove rezultate i procjenu ukupnog broja korisnika, može se izračunati ukupan broj ćelija. Tijekom faze ispitivanja neki od testova mogu se ponavljati.

5.2.1. Izračun prosječne propusnosti ćelije

Cilj planiranja kapaciteta je dobiti procjenu broja korisnika unutar ćelije s obzirom na dobiveni parametar kapaciteta. Zahtjeve za kapacitet utvrđuju mrežni operatori s obzirom na njihov predviđeni promet. Prosječna propusnost ćelija je potrebna kako bi se izračunao potreban kapacitet. Najtočnija mjera kapaciteta dobiva se pokretanjem različitih simulacija i propusnošću pod određenim ograničenjima.

Prema [12], procjena kapaciteta zahtijeva sljedeće rezultate simulacija:

- prosječna tablica distribucije SINR-a (rezultat na razini sustava)
- prosječna propusnost ili spektralna učinkovitost u odnosu na prosječnu tablicu SINR-a.

Na ove rezultate također utječu i različita okruženja i konfiguracija antena. Upravo zbog toga su potrebne višestruke tablice, npr. za urbana, prigradska i ruralna područja. SINR vjerojatnost računa se pomoću vjerojatnosti pojave određene SINR vrijednosti na rubu ćelije. Brzine bita za svaki MCS izvedeni su iz OFDM parametara za LTE. Tada SINR vrijednosti za podršku MSC-u su izvedene iz glavnih tablica traženja (*lookup*) koje su generirane od simulacija za razinu linka. Nakon toga, MCS se odabire iz najniže izračunate SINR vrijednosti. Time se pruža odgovarajuća brzina podataka za svaki MCS. Na taj način dobiva se brzina podataka koja odgovara svakoj SINR vrijednosti za određeni scenarij. Za urbano gradsko područje i fiksnu udaljenost od 1732 m, propusnost u silaznoj vezi za LTE mrežu prikazana je u sljedećoj tablici:

Tablica 1. Prosječna propusnost u silaznoj vezi za LTE mrežu

MCS	SINR(min) (dB)	Propusnost u silaznoj vezi (Mb/s)
QPSK 1/3	-0,75	4,00
QPSK 1/2	1,50	6,00
QPSK 2/3	3,50	8,00
16QAM 1/2	7,00	12,00
16QAM 2/3	9,50	16,01
16QAM 4/5	11,50	19,20
64QAM 1/2	11,50	21,0
64QAM 2/3	14,7	24,01

Izvor: [12]

Kada se sve vrijednosti izračunaju pomoću tablice traženja, propusnost ćelija se izvodi na sljedeći način:

$$CellThroughput = \sum_{allSINRvalues} (SINR_Occurrence_Probability \times AveThroughputSINR) \quad (15)$$

Gdje je:

- $SINR_{OccurrenceProbability}$ = vjerojatnost pojave određene SINR vrijednosti na rubu ćelije dobivene simulacijama

- $AveThroughputSINR$ = prosječna propusnost koja odgovara SINR vrijednosti

5.2.2. Analiza prometa

S obzirom na to da određena širina pojasa može isporučiti samo određenu količinu kapaciteta, potrebno je razumjeti prometne zahtjeve. Kompleksan dio predstavlja analiza različitih vrsta korisnika i generiranog prometa u vršnom satu. Zahtijevani rezultat predstavlja OBF (*Overbooking factor*) koji predstavlja ukupan broj korisnika koji mogu dijeliti određeni kanal ili kapacitet, [12].

Jedinica kanal upotrijebljena u dimenzioniranju je vršna brzina prijenosa podataka. Tako da, ako pretpostavimo da je kanal 100% opterećen, onda je OBF jednak omjeru između vršne i prosječne brzine. Međutim, nije sigurno dimenzionirati mrežu sa stopostotnim opterećenjem. Shodno tome, uvodi se faktor iskorištenosti. U većini mreža, taj faktor iznosi manje od 85% kako bi se uspješno zajamčila kvaliteta usluge. Dakle, što veći taj parametar, duže će biti prosječno vrijeme čekanja za korisnike koji pristupaju kanalu. Tako se OBF izvodi na sljedeći način:

$$OverbookingFactor = PeakToAverageRatio \times UtilisationFactor \quad (16)$$

Gdje je:

- $OverbookingFactor$ = ukupan broj korisnika koji mogu dijeliti određeni kanal ili kapacitet
- $PeakToAverageRatio$ = omjer između vršne i prosječne brzine
- $UtilisationFactor$ = faktor iskorištenosti

5.2.3. Izračun kapaciteta

Uz pomoć analize prometa i parametara vezanih za istu, ukupna potrebna brzina može se izračunati. Ukupna brzina prijenosa podataka za izračun kapaciteta jest:

$$OverallDataRate = \frac{NumberOfUsers \times PeakDataRate}{OverbookingFactor} \quad (17)$$

Gdje je:

- $OverallDataRate$ = ukupna brzina prijenosa podataka
- $NumberOfUsers$ = broj korisnika
- $PeakDataRate$ = vršna brzina prijenosa podataka

Broj baznih stanica koje su potrebne da podrže prethodnu formulaciju mogu se izračunati na sljedeći način:

$$NumSitesCapacity = \frac{OverallDataRate}{SiteCapacity} \quad (18)$$

Gdje je:

- $NumSitesCapacity$ = broj baznih stanica
- $SiteCapacity$ = produkt propusnosti ćelije i broja ćelija po baznoj stanici

Računanje broja baznih stanica vrši se i kod planiranja pokrivenosti i kod planiranja kapaciteta mreže. Broj baznih stanica obično bude veći kod planiranja kapaciteta kako bi to bila potpuno funkcionalna mreža. U stvarnim mrežama prošlih godina taj broj je iznosio puno manje, jer je bio manji broj korisnika. No, kako se povećava potražnja, na taj način povećava se i kapacitet, [12].

6. Pregled i analiza alata i modela za planiranje i optimizaciju LTE mreže

S obzirom da je planiranje LTE mreže veoma kompleksno, postoje različiti alati i modeli pomoću kojih se mogu izvršiti mjerenja. Shodno tome, u ovom poglavlju bit će prikazani neki od tih alata i modela, te njihove funkcionalnosti.

6.1. Excel alat za LTE dimenzioniranje

Alat za LTE dimenzioniranje predstavlja softver koji je utemeljen na Excelu i razvijen za provođenje dimenzioniranja LTE mreža. U ovom poglavlju biti će prikazani različiti dijelovi ovog alata, kao i njegova struktura i sadržaj, te prednosti i ograničenja.

Ovaj alat je dizajniran za obavljanje proračuna i pokrivenosti i kapaciteta LTE mreže. Excel predstavlja aplikaciju sa proračunskim tablicama sa posebnim značajkama pomoću kojih se izvode proračuni i različite grafike i to ga čini jednim od najpopularnijih i najraširenijih alata, [12].

Alat za dimenzioniranje baziran na Excelu strukturiran je na način da se jasno vide razdvojeni ulazni parametri od izlaznih parametara, radnog odjeljka, te konačnih rezultata. Prema [12], sastoji se od sedam stranica, a to su:

- ulazni parametri
- tablice
- proračun za radio vezu (RLB)
- procjena kapaciteta
- prognoza prometa
- dimenzioniranje
- verzija i povijest promjena.

Ulazni parametri definiraju sve potrebne ulaze za dimenzioniranje mreže i definiraju se unutar tri skupine, a to su:

- ulazni parametri sustava
- ulazni parametri za planiranje pokrivenosti
- ulazni parametri za planiranje kapaciteta.

Ulazni parametri su veoma važni, jer su na jednom mjestu skupljeni svi mogući ulazi i to je sasvim drugačiji pristup u usporedbi sa drugim dostupnim alatima za dimenzioniranje. Da bi se jasno napravila razlika između parametara sustava,

pokrivenosti i kapaciteta, organiziraju se unutar dva stupca. To omogućava korisniku kontrolu rezultata pokrivenosti i kapaciteta.

Ulazni parametri sustava su frekvencija nositelja, širina pojasa i područje implementacije. Parametri pokrivenosti su RLB i propagacijski model. U RLB parametre se podrazumijevaju snaga antene, pojačanja i gubitci sustava. Parametri kapaciteta odnose se na prognozu prometa (s obzirom na vrstu prometa), faktor iskorištenosti, te geografska raspršenost korisnika. Geografska raspršenost korisnika daje uvid u postotak korisnika koji trebaju biti pokriveni mrežom s obzirom na područje implementacije. Vrste područja su: gradsko (urbano), prigradsko, te ruralno. Na slikama 10 i 11 su prikazani ulazni parametri pokrivenosti i kapaciteta u Excel tablici.

System			
Bandwidth (MHz)	10		
Carrier Frequency (MHz)	2000		
Coverage Estimation			
Link Budget	Transmitter	DL	UL
	Transmitter Power (dBm)	46	23
	Antenna Gain (dBi)	14	8
	System Losses (dB)		
	Antenna Diversity Gain (dB)		
	Body Loss (dB)		
	Thermal Noise Density (dBm/Hz)		
Receiver			
	Antenna Gain (dBi)		
	Noise Figure (dB)		
	Diversity Gain (dB)		
	Receiver Losses (dB)		
Interference			
	Neighbour Cell Loading (dB)		
Shadow Fading			
	Std Dev. Of Shadow Fading (dB)		
	Coverage Probability (%)		
Propagation Model			
	Path Loss Exponent		

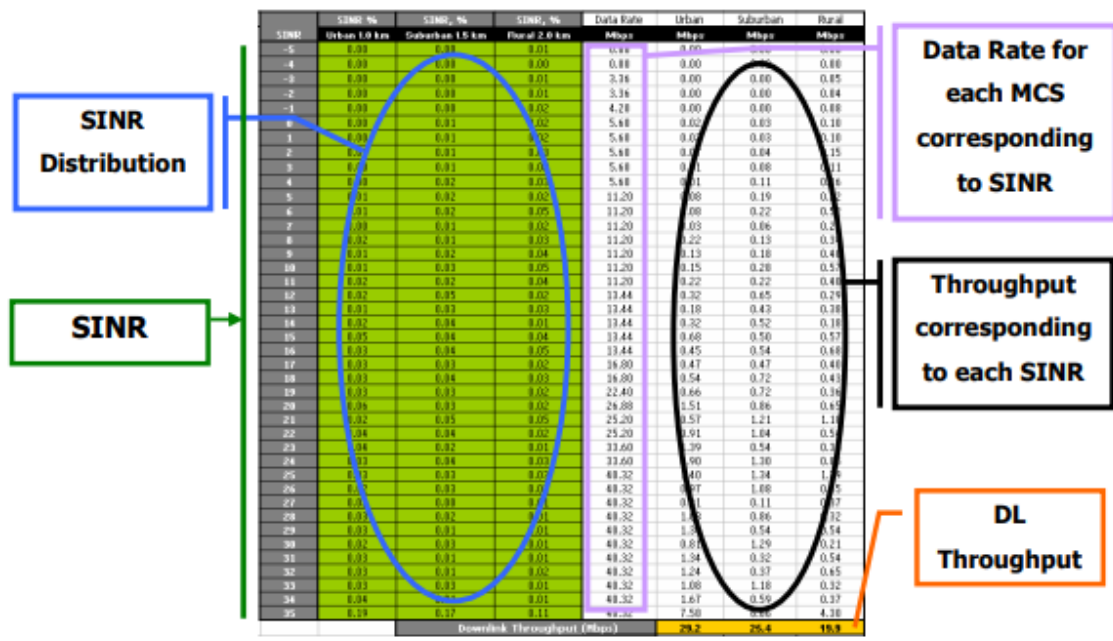
Slika 10. Ulazni parametri kapaciteta, [12]

System			
Bandwidth (MHz)	10		
Carrier Frequency (MHz)	2000		
Coverage Estimation			
Link Budget	Transmitter	DL	UL
Transmitter Power (dBm)	46	23	
Antenna Gain (dB)	14	8	
System Losses (dB)			
Antenna Diversity Gain (dB)			
Body Loss (dB)			
Thermal Noise Density (dBm)			
Receiver			
Antenna Gain (dB)			
Noise Figure (dB)			
Diversity Gain (dB)			
Receiver Losses (dB)			
Interference			
Neighbour Cell Loading (%)			
Shadow Fading			
Std Dev. Of Shadow Fading (dB)			
Coverage Probability (%)			
Propagation Model			
Path Loss Exponent			

Slika 11. Ulazni parametri pokrivenosti, [12]

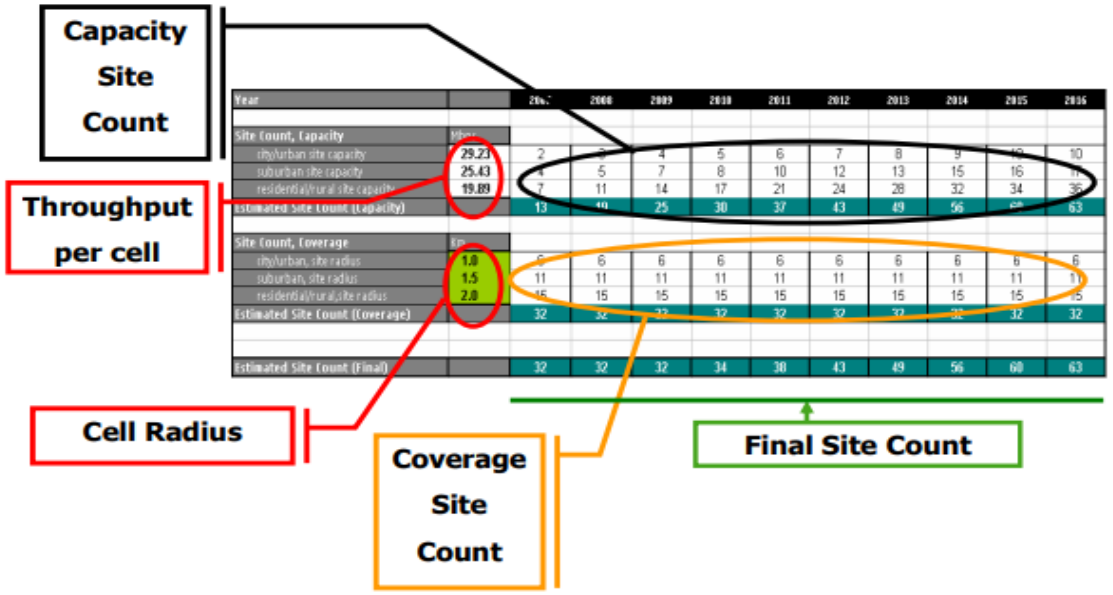
Tablice na kojima se nalaze ulazni parametri podijeljene su u tri dijela što se može vidjeti i na slikama 10 i 11. Prvi dio sadrži ulazne parametre sustava, drugi dio odnosi se na parametre pokrivenosti na osnovu kojih se dobivaju parametri kapaciteta.

Radni list koji se odnosi na procjenu kapaciteta izračunava maksimalnu propusnost ćelije za određeno područje ćelije. Na taj način prikazuje se kapacitet jedne bazne stanice u LTE mreži. Izračun maksimalne propusnosti ćelije zasniva se na SINR distribucijskim tablicama koje se dobiju na razini sustava simulacijom LTE mreže. Na slici 12 prikazano je kako u Excelu izgleda kada se izvršava izračun kapaciteta pomoću SINR distribucije.



Slika 12. Izračun kapaciteta, [12]

Na slici 12 prikazana je SINR distribucija koja se izvodi pomoću SINR i MCS parametara gdje za svaki MCS brzina bita odgovara određenom SINR parametru. Također, propusnost je isto prethodno definirana za svaki MCS i SINR što je i prikazano na slici 12 na osnovu čega je dobivena ukupna propusnost u silaznoj vezi.



Slika 13. Izlazni parametri, [12]

Na slici 13 prikazani su konačni izlazni parametri kojima su dobiveni željeni rezultati izvedeni planiranjem mreže. Na slici 13 je prikazano prema godinama kapacitet,

pokrivenost i ukupan broj baznih stanica u ćelijama s obzirom na izračunatu propusnost, te i radijus ćelije.

Prednosti korištenja ovog alata su u tome što prikazuje na svakoj zasebnoj stranici parametre koji su važni za dimenzioniranje i planiranje LTE mreže što omogućava lakšu preglednost i jednostavnost korištenja. Međutim, nedostatak je što su nepouzdana mrežni simulatori za planiranje kapaciteta. Rezultati su dostupni samo za određene konfiguracije i vrste antena.

6.2. Infovista alat – Planet

Ujedinjeno planiranje i optimizacija mreže predstavljaju skup novih mogućnosti unutar najnovijeg Infovista⁹ softverskog rješenja za planiranje mreža koje se brzo razvijaju, kakva LTE mreža i jest. Alat Planet omogućava pristup uživo emitiranim podacima, kao što su geolociranje poziva, konfiguracija mreže i parametara, izvedba mreže, te to pruža inženjerima točan prikaz trenutnog stanja mobilne mreže (procjenu prometnih zahtjeva, trenutne probleme u mreži), [16].

Planet predstavlja inovativnu platformu za planiranje, dizajniranje i optimiziranje mreže. Ovaj alat omogućava sljedeće, što predstavlja njegove prednosti:

- potpune 3D mogućnosti - potpora za 3D mapiranje prometa temelji se na njihovoj 3D tehnologiji.
- vizualizacija – vizualizacija pokrivenosti i u zatvorenim i otvorenim prostorima, kao i određivanja kapaciteta.
- multi-tehnologija - jedinstvenim ciljevima za poboljšanje spektralne učinkovitosti
- predviđanje mrežnog prometa – izvodi se na temelju razvoja mrežnog prometa omogućujući inženjerima prepoznavanje žarišta i smještaj manjih baznih stanica.
- upravljanje scenarijima – kao i 'šta ako' analize.
- integracija sa VistaNEO – omogućava bilježenja podataka uživo za mogućnosti analize mreže.

⁹ Infovista predstavlja jednu od vodećih tvrtaka u suvremenim mrežnim performansama koja omogućava različita rješenja vezana za radio mreže, te pruža potpunu kontrolu mreže i aplikacija.

- izrada sloja podataka – analiza mreže, matrica interferencije, te precizne karte prometa temeljene na zapisima poziva.
- napredne prometne karte – zasnivaju se na kombinaciji predviđanja prometa, geolokaciji poziva, te praćenim podacima o korištenju društvenih mreža.
- izravan pristup mreži u realnom vremenu – grafičke i statističke vizualizacije za otklanjanje problema vezanih za otklanjanje problema i optimizaciju mobilne mreže.



Slika 14. Prikaz podataka u realnom vremenu koji mogu biti korišteni pomoću Planet alata, [17]

Na prethodnoj slici prikazane su mogućnosti prikupljenih podataka u realnom vremenu koji se automatski prikupljaju pomoću Planet alata. Osim toga, pomoću Planet alata olakšava se planiranje mreže mobilnim operatorima. Lakše mogu odrediti potreban kapacitet mreže, kao i korisničko iskustvo očekivano pruženom mrežom.

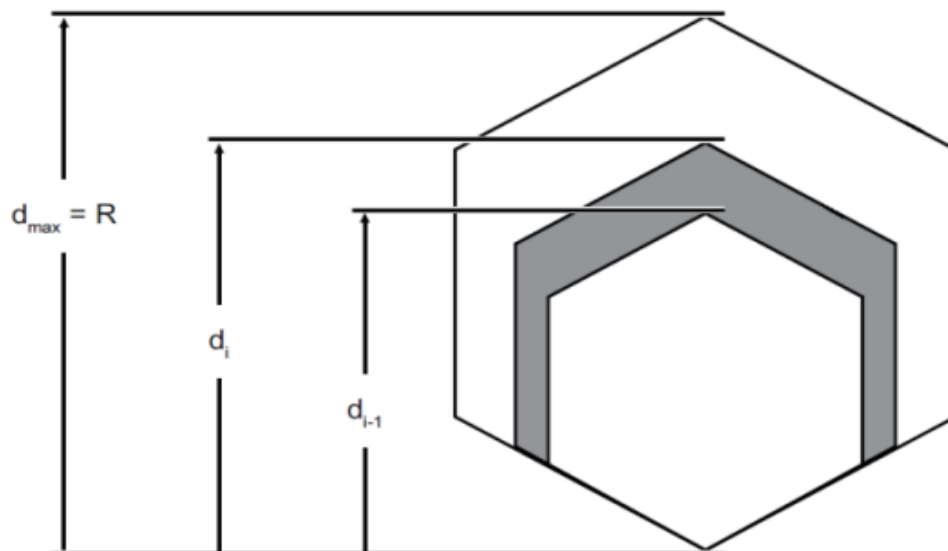
6.3. Prsten metoda

U ovom poglavlju prikazano je kako su iz tvrtke Ericsson koristili prsten metodu u silaznoj vezi pomoću koje su računali potreban kapacitet u ćeliji. Prsten metoda u silaznoj vezi stvara krivulje propusnosti u odnosu na gubitke na putu i pruža alternativnu metodu izračuna propusnosti ćelije.

Računanje se vrši u sljedećim koracima prema [18]:

1. Prigušenje signala za svaki prsten
2. Izračun kuta nagiba
3. SINR za svaki prsten
4. Prosječna propusnost ćelije
5. Propusnost za svaki prsten

Prsten metoda temelji se na uspješnim proračunima za definirane regije kojima su ćelije u obliku prstena. Općeprihvaćen oblik ćelijskog modela je šesterokut. Ideja prsten metode jest da se površina ćelije podijeli na N broj prstenova gdje je broj korisnika direktno proporcionalan površini prstena. Odnosno, korisnici su ravnomjerno raspoređeni po području ćelije. Koncept metode prstena prikazan je na sljedećoj slici:



Slika 15. Prsten metoda, [19]

U slučaju šesterokutnog modela ćelije područje prstena može se lako izračunati iz definicije šesterokutne površine:

$$S_i = \frac{3\sqrt{3}}{2} \times \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \quad (19)$$

Gdje d_i predstavlja promjer vanjskog raspona prstena i . Ciljana površina prstena (osjenčani dio) može se izračunati kao:

$$S_{target} = S_i - S_{i-1} \quad (20)$$

Maksimalni promjer vanjskog raspona prstena d_{max} predstavlja zapravo ćelijsku granicu koja je R . Kao što je već navedeno, broj korisnika u prstenu izravno je

proporcionalan površini prstena. Stoga, omjer između ciljanog područja prstena i područja cijele ćelije odgovara omjeru između broja korisnika u ciljanom području prstena i broja korisnika u cijeloj ćeliji. Shodno tome, udio korisnika u prstenu i , p_{user} definira se prema sljedećem:

$$p_{user,i} = \frac{S_{target}}{S_{max}} = \frac{S_i - S_{i-1}}{S_{max}} \quad (21)$$

Gdje S_{max} predstavlja područje cijele ćelije (promjer prstena d_{max}). Povezujući formule (19), (20) i (21), p_{user} može da se izrazi i kao:

$$p_{user,i} = \frac{d_i^2 - d_{i-1}^2}{d_{max}^2} \quad (22)$$

Kako bi se izračunala propusnost za svaki prsten, parametri kao što su gubitak na putu, prigušenost signala i SINR u svakom prstenu moraju biti određeni. Gubitak na putu, kao i prigušenost signala je direktno povezana sa RSRP (*Reference Signal Received Power*)¹⁰ detektiranim od strane korisničke opreme. Znajući RSRP i snagu signala s obzirom na poziciju korisničke opreme dobiva se informacija o baznoj stanici i korisničkoj opremi. Relacija koja povezuje te parametre je:

$$RSRP = P_{tx,RS} - L_{sa} \quad [dBm] \quad (23)$$

Gdje $P_{tx,RS}$ [dBm] predstavlja snagu referentnog signala, a L_{sa} [dB] predstavlja prigušenje signala. Veza između prigušenja signala i gubitaka na putu je dobiveno relacijom:

$$L_p = L_{sa} - L_{BL} - L_{CPL} - L_{BPL} + G_a - L_j \quad [dB] \quad (24)$$

Gdje je, prema [19]:

- L_p = gubitak na putu zbog širenja signala u zraku
- L_{BL} = *body loss*
- L_{CPL} = gubitak signala s obzirom na auta
- L_{BPL} = gubitak signala s obzirom na zgrade
- G_a = zbroj maksimalne dobiti u smjeru antene bazne stanice i antene korisničke opreme

¹⁰ U mobilnim mrežama, korisnička oprema kada prelazi iz jedne ćelije u drugu mjeri jačinu signala drugih ćelija. U slučaju LTE mreže, korisnička oprema mjeri dva parametra signala, od kojih je jedan RSRP. RSRP definira se kao snaga LTE referentnih signala raspoređenih po cijeloj širini pojasa.

- L_j = gubitci zbog smetnji instaliranih između antene i referentne točke RX

Na temelju tih odnosa, gubitak na putu može biti izračunat za svaki prsten. Gubici na putu $L_{p,i}$ za svaki položaj u prstenu su jednaki. Isto vrijedi i za $L_{sa,i}$, odnosno signal prigušenja. Prstenovi u ćeliji mogu se modelirati na temelju udaljenosti ili na temelju gubitaka na putu. Korištenjem nekih od propagacijskih modela, vrijednosti jednog parametra mogu se lako transformirati u vrijednosti drugog.

Slično kako je modelirano za signal prigušenja i gubitak na putu, isto tako može biti i za parametar SINR koji se jednako modelira za svaki prsten unutar ćelije. SINR parametar može se mjeriti zasebno u svakom prstenu ili se može odrediti na osnovu ostalih parametara. U svakom slučaju, ideja je izračunati prosječnu propusnost ćelije na temelju raspodjele korisnika po ćeliji, [19].

Imajući u vidu da je SINR određen u svakom prstenu i približno jednak u cijelom području prstena, propusnost za svaki prsten može biti izračunata koristeći neke od prihvaćenih modela kanala (EPA5, EVA70 ili ETU300). Propusnost prstena za svaki prsten može biti izravno izračunata iz udjela korisnika $p_{user,i}$ i propusnosti R_i za taj promatrani prsten. Shodno tome, ukupna propusnost predstavlja sumu propusnosti svih prstena:

$$R_{user,ave} = \sum_i p_{user,i} \times R_i$$

Oslanjajući se na prethodne procjene, ćelija će biti podijeljena u prstenove od kojih svaki ima RSRP koji iznosi 5 dB. Korištenjem formule (23), granice prstena transformiraju se u signal slabljenja. Nakon toga, računa se gubitak na putu (24). U ovom slučaju, mjerna oprema nalazila se u autu, te je jako važno uračunati gubitak penetracije u autu koji iznosi 6 dB. Ostali gubici mogu se zanemariti. Zbroj maksimalnog dobitka u smjeru antene bazne stanice i antene korisničke opreme iznosi 18,5 dBi, [19].

Gubitak puta na daljinu temelji se na Okamura Hata propagacijskom modelu. Za definirani rub ćelije (d_{max}), udio korisnika $p_{user,i}$ može da se izračuna. Također, definicija ruba ćelije ovisi i o gustoći mjesta. U ovom testu, mjerenja su vršena na različitim udaljenostima koje imaju različite gustoće naseljenosti i gdje je rub ćelije drugačiji, odnosno iznosi prema [19]:

- rub ćelije definiran RSRP-om = - 120 dB
- rub ćelije definiran RSRP-om = - 100 dB
- rub ćelije definiran RSRP-om = - 80 dB

Prstenovi ćelija definirani na ovaj način odgovaraju RSRP rasponima, tako da su svi uvjeti u područjima prstena isti kao unaprijed definirani RSRP rasponi. Dakle, SINR u svakom prstenu/RSRP raspon već je poznat i koristi se za izračunavanje propusnosti što je prikazano u sljedećoj tablici:

Tablica 2. Propusnost u silaznoj vezi određena RSRP-om s obzirom na opterećenje mreže

RSRP omjer (dBm)	Propusnost u silaznoj vezi (kb/s)			
	$Q_{DL} = 5\%$	$Q_{DL} = 10\%$	$Q_{DL} = 20\%$	$Q_{DL} = 50\%$
[-130, -125)	5286,42	4957,90	4511,61	3413,85
[-125, -120)	9965,03	8336,40	6276,86	3608,57
[-120, -115)	19379,11	17267,44	14352,46	9847,881
[-115, -110)	31757,07	27976,82	23088,08	16024,25
[-110, -105)	45420,39	39257,92	31975,05	22218,22
[-105, -100)	57578,17	48962,6	39552,47	27603,03
[-100, -95)	59869,94	49117,72	38543,68	26140,81
[-95, -90)	69091,76	57735,74	46309,86	32471,78
[-90, -85)	69119,64	57362,81	45757,79	31899,25
[-85, -80)	73730,66	62012,55	50166,78	35667,25
[-80, -75)	81108,99	69941,47	58038,26	42717,76
[-75, -70)	84024,21	73216,94	61404,49	45849,86
[-70, -65)	84040,74	73226,51	61409,52	45851,77
[-65, -60)	88638,7	78669,06	67211,11	51452,32
[-60, -55)	94461,86	86211,75	75755,57	60218,17
[-55, -50)	101295,2	99657,95	94443,59	83012,62

Izvor: [19]

Ti rezultati su dodatno prošireni studijom koja je rađena za opterećenja mreže od 5% (pod što se podrazumijeva neopterećena mreža) do 100% (potpuno opterećena mreža). Konačni rezultati dobiveni su uključivanjem izračunatih propusnosti i broja korisnika unutar svakog prstena. Sljedeća tablica prikazuje očekivanu propusnost za različita opterećenja mreže:

Tablica 3. Prosječna propusnost korisnika s obzirom na opterećenja mreže i rub ćelije

Prosječna propusnost (kb/s)			
Opterećenje mreže (Q_1)	Rub ćelije definiran za RSRP = - 80 dB	Rub ćelije definiran za RSRP = - 100 dB	Rub ćelije definiran za RSRP = - 120 dB
5%	81906,39	66150,98	32886,37
10%	71475,59	55005,59	28444,53
15%	64858,44	48446,36	25424,69
20%	60064,32	43894,93	23166,27
25%	56336,14	40464,56	21382,89
30%	53305,35	37740,74	19925,95
35%	50765,27	35502,85	18702,23
40%	48587,26	33614,10	17653,93
45%	46688,37	31990,88	16743,74
50%	45010,49	30574,65	15945,69
55%	43511,12	29322,63	15233,50
60%	42157,65	28202,44	14592,95
65%	40927,00	27193,98	14018,37
70%	39802,80	26282,50	13491,85
75%	38766,46	25444,86	13013,01
80%	37808,33	24680,18	12570,96
85%	36919,58	23971,97	12164,28
90%	36088,53	23316,92	11786,12
95%	35312,92	22705,76	11434,53
100%	34583,48	22138,02	11106,13

Izvor: [19]

Prema prethodnoj tablici možemo vidjeti da kada se jednom izračuna prosječna propusnost za određeno opterećenje mreže, kapacitet ćelije može se izračunati jednostavnom jednadžbom:

$$T_{cell,ave} = Q_L \times R_{user,ave} \quad (25)$$

Gdje je:

$T_{cell,ave}$ = kapacitet ćelije

Q_L = opterećenje mreže

$R_{user,ave}$ = prosječna propusnost korisnika

Recimo, za urbano područje koje ima manju udaljenost između baznih stanica gdje je RSRP -80 dBm, prosječna propusnost korisnika iznosi 45 Mbps kada je opterećenje mreže 50%. To znači da je kapacitet ćelije jednak 22.5 Mbps.

6.4. Cost 231 Hata Model

Pomoću ovog modela može se procijeniti gubitak puta između signala koji bazna stanica šalje korisničkoj opremi. Najčešće se koristi kada su u pitanju gradska i prigradska područja gdje su udaljenosti kraće od 5 km (iako je kreiran i za veće omjere), kao i za dvije različite metode širenja signala: u vidljivom području (*Line of Sight* – LoS) i u nevidljivom području (*Non-Line of Sight* - NLoS), [20]. Ovaj model koristi se prilikom planiranja pokrivenosti mreže, te služi kao podloga za planiranje kapaciteta mreže.

Cost 231 Hata model, prema [21], [22] je kreiran za sljedeće omjere:

- frekvencija (f) = 1500-2000 MHz
- visina antene bazne stanice (H_b) = 30-200 m
- visina antene mobilnog uređaja (H_m) = 1-10 m
- udaljenost = 1-20 km.

Nadalje se pretpostavlja da su visine antene bazne stanice iznad krovne razine zgrada u blizini baznih stanica.

U urbanom području, gubitak puta iznosi:

$$L_u(dB) = 46.3 + 33.9 \log(f) - 13.82 \log(H_b) - a(H_m) + [44.9 - 6.55 \log(H_b)] \times \log(d) + C_m \quad (26)$$

Gdje je $a(H_m)$ za visinu antene na automobilu:

$$a(H_m) = [1.1 \log(f) - 0.7] \times H_m - [1.56 \times \log(f) - 0.8] \quad (27)$$

Za srednji-manji grad (urbano područje): $C_m = 0$

Za veći grad (jako urbano područje): $C_m = 3$

U predgradskom području, gubitak puta iznosi, prema [21]:

$$L_{su}(dB) = L_u - 2 \times [\log(\frac{f}{28})]^2 - 5.4 \quad (28)$$

U ruralnom području koje nije potpuno otvoreno, gubitak puta iznosi:

$$L_{qo}(dB) = L_u - 4.78 \times [\log(f)]^2 + 18.33 \times \log(f) - 35.94 \quad (29)$$

U ruralnom otvorenom području, gubitak puta iznosi:

$$L_{ro} = L_u - 4.78 \times [\log(f)]^2 + 18.33 \times \log(f) - 40.94 \quad (30)$$

6.5. Okumura-Hata Model

Okumura-Hata model predstavlja najpopularniji model koji se najviše koristi u urbanim prostorima. Idealan je za korištenje u gradovima koji nemaju previše zgrada i urbanih struktura. Prvotno je osmišljen i kreiran za urbana područja, nakon čega je poslužio kao baza za ostale koji su za predgradsko i ruralno područje. Koristi se za proučavanje ruralnih, predgradskih i urbanih sredina koje imaju udaljeosti veće od 5 km, [22]. Ovaj model služi za planiranje pokrivenosti mreže, kao i prethodno navedeni, te upravo Okumura-Hata model predstavlja podlogu za druge alate i modele koji služe planiranju mreže.

Prema [21], ovaj model se koristi za sljedeće omjere:

- frekvencija (f) = 1500-2000 MHz
- visina antene bazne stanice (H_b) = 30-200 m
- visina antene mobilnog uređaja (H_m) = 1-10 m
- udaljenost (d) = 1-20 km.

Kao i kod prethodnog modela pretpostavlja se da su visine antene bazne stanice iznad krovne razine zgrada u blizini baznih stanica.

U urbanom području, gubitak na putu računa se prema:

$$L_u(dB) = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(H_b) - a(H_m) + [44.9 - 6.55 \log(H_b)] \times \log(d) \quad (31)$$

Gdje je $a(H_m)$ za visinu antene na automobilu i za manji-srednji grad iznosi:

$$a(H_m) = [1.1 \log(f) - 0.7] \times H_m - [1.56 \times \log(f) - 0.8] \quad (32)$$

Za jako urbano područje iznosi:

$$\begin{aligned} a(H_m) &= 8.29 \times [\log(1.54 \times H_m)]^2 - 1.1 \text{ za } f \leq 200 \text{ MHz} \\ a(H_m) &= 3.2 \times [\log(17.75 \times H_m)]^2 - 4.97 \text{ za } f \geq 400 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (33)$$

Za predgradsko područje, gubitak puta iznosi:

$$L_{su}(dB) = L_u - 2 \times [\log(\frac{f}{28})]^2 - 5.4 \quad (34)$$

Za ruralno područje koje nije potpuno otvoreno, gubitak puta iznosi:

$$L_{qo}(dB) = L_u - 4.78 \times [\log(f)]^2 + 18.33 \log(f) - 35.94 \quad (35)$$

Za ruralno područje koje je otvoreno, gubitak puta iznosi:

$$L_{ro}(dB) = L_u - 4.78 \times [\log(f)]^2 + 18.33 \log(f) - 40.94 \quad (36)$$

7. Analiza prometa za određivanje kapaciteta LTE ćelije

Kao što je već ranije spomenuto, planiranje mreže nije jednostavno. Jedan od važnijih koraka je svakako određivanje kapaciteta mreže u kojem se određuje propusnost ćelije i prosječna propusnost korisnika u ćeliji. Kapacitet mreže ovisi o broju baznih stanica unutar ćelije koji se može dobiti nakon što se odredi propusnost i broj korisnika na promatranom području.

U ovom poglavlju prikazana je analiza prometa u silaznoj vezi koja je izvršena korištenjem formula iz potpoglavlja 5.2.2. Analiza prometa. Kako bi se izračunao potreban kapacitet LTE mreže, važno je prvo izračunati OBF faktor prema formuli (16). Unutar formule navedene su vršna i prosječna brzina prijenosa podataka LTE mreže, te faktor iskorištenosti.

Kako bi analiza bila što točnija, provedena su istraživanja o vršnim i prosječnim brzinama u LTE mreži u više izvora. Prema [23], postoje dva različita tipa brzina: teorijske i stvarne brzine. Teorijske brzine se dobivaju u laboratorijskom okruženju koje ima savršene uvjete, dok su stvarne brzine one koje se zaista mogu očekivati prilikom korištenja mobilne mreže. U tablicama 4 i 5 prikazane su teorijske i realne brzine 4G LTE i 4G LTE-A (*Long Term Evolution - Advanced*) mreže u silaznoj i uzlaznoj vezi.

Tablica 4. Maksimalne teorijske brzine ćelije

Tip mreže	Brzina silazne veze (Mb/s)	Brzina uzlazne veze (Mb/s)
4G LTE	150	50
4G LTE-A	300	150

Izvor: [23]

Tablica 5. Stvarne brzine ćelije

Tip mreže	Brzina silazne veze (Mb/s)	Brzina uzlazne veze (Mb/s)
4G LTE	20	10
4G LTE-A	42	25

Izvor: [23]

Prema [24], LTE-A mreža ima definirane različite klase LTE mreže s obzirom na korištenu tehnologiju i opremu, te je shodno tome prikazana i brzina u silaznoj i uzlaznoj vezi. U tablici 6 vidljive su brzine prema kategoriji i mogućnostima agregacije nositelja.

Tablica 6. Brzine prijenosa prema kategorijama LTE-A

Kategorija	Brzina	Mogućnosti agregacije
Kategorija 12	600 Mb/s – silazna veza 100 Mb/s – uzlazna veza	3 x 20MHz – silazna veza 2 x 20MHz – uzlazna veza
Kategorija 10	450 Mb/s – silazna veza 100 Mb/s – uzlazna veza	3 x 20MHz – silazna veza 2 x 20MHz – uzlazna veza
Kategorija 9	450 Mb/s – silazna veza 50 Mb/s – uzlazna veza	3 x 20MHz – silazna veza
Kategorija 7	300 Mb/s – silazna veza 100 Mb/s – uzlazna veza	2 x 20MHz – silazna veza 2 x 20MHz – uzlazna veza
Kategorija 4	150 Mb/s – silazna veza 50 Mb/s – uzlazna veza	2 x 10MHz – silazna veza

Izvor: [24]

Velike brzine ostvaruju se korištenjem agregacije nositelja (*Carrier Aggregation*) kako bi se omogućilo povećanje širine pojasa, pa tako onda i brzine prijenosa. Agregacijom nositelja može združiti maksimalno pet nositelja koji mogu imati ukupnu širinu od 100 MHz. Osim agregacijom nositelja, povećanje brzine u LTE-A mreži može se postići i korištenjem kombinacije tradicionalnih makro ćelija ili uvelike poboljšanih malih ćelija.

Međutim, iako su prethodno definirane moguće brzine u LTE-A mreži, ne pružaju svi telekomunikacijski operatori jednaku brzinu. Nadalje, prema istraživanju [25] koje je izvršeno u Sjevernoj Americi, pojedini operatori mogu ostvariti prosječne brzine od 50 Mb/s u silaznoj vezi, dok neki ne postižu ni 10 Mb/s. U tablici 7 prikazane su prosječne ostvarene brzine ćelija različitih operatora.

Tablica 7. Ostvarene prosječne brzine prijenosa u silaznoj i uzlaznoj vezi kod različitih operatora u SAD-u

Operator	Prosječna brzina silazne veze (Mb/s)	Prosječna brzina uzlazne veze (Mb/s)	Prosječno vrijeme preuzimanja aplikacije
Verizon	53,3	17,5	0:28
AT&T	37,1	12,9	0:35
T-Mobile	36,3	16,4	0:50
Metro iz T-Mobile	32,8	13	1:22
Sprint	32,5	4	0:57
Straight Talk	31,1	15,6	1:06
Cricket	6,5	5,8	1:00
Boost	29,4	3,7	1:29

Izvor: [25]

Osim brzine ćelije, važno je spomenuti i prosječne brzine koje korisnik ostvaruje unutar ćelije. Brzine se razlikuju u ćeliji s obzirom na udaljenost od bazne stanice, te je veoma važno omogućiti svim korisnicima garantirane brzine bez obzira jesu li na rubu ćelije ili u samom središtu. Shodno tome, svi korisnici ne mogu imati jednake brzine, ali raspon brzina koje ostvaruju iznosi od 12-36 Mb/s u ovisnosti o kojem operatoru je riječ. Verizon svojim korisnicima omogućava minimalnu brzinu od 15 Mb/s, dok Sprint i AT&T omogućavaju 11 Mb/s. Kada je o maksimalnim brzinama riječ, one mogu ići i preko 36 Mb/s, ako se korisnik nalazi u većem gradu gdje je i veća pokrivenost, [26].

Prema tome, ako se u obzir uzmu sva prethodna istraživanja, može se reći da su prosječne brzine korisnika u rasponu od 15-100 Mb/s. Shodno tome, proračun je izveden prema formuli (16) i prikazan u tablici 8. Prema formuli (16), potrebni podatci za izračun su: vršna/maksimalna brzina ćelije, prosječna brzina korisnika, te faktor iskorištenosti.

Tablica 8. Izračun OBF-a za silaznu vezu za različite vrijednosti faktora iskorištenja i prosječnih brzina

Maksimalna brzina u ćeliji (Mb/s)		300				
Prosječna brzina (Mb/s)	Faktor iskorištenosti (UF1)	Faktor iskorištenosti (UF2)	Faktor iskorištenosti (UF3)	Faktor iskorištenosti (UF4)	Faktor iskorištenosti (UF5)	Faktor iskorištenosti (UF6)
	1	0,9	0,85	0,75	0,6	0,5
15	20,00	18,00	17,00	15,00	12,00	10,00
20	15,00	13,50	12,75	11,25	9,00	7,50
25	12,00	10,80	10,20	9,00	7,20	6,00
30	10,00	9,00	8,50	7,50	6,00	5,00
35	8,57	7,71	7,29	6,43	5,14	4,29
40	7,50	6,75	6,38	5,63	4,50	3,75
45	6,67	6,00	5,67	5,00	4,00	3,33
50	6,00	5,40	5,10	4,50	3,60	3,00
55	5,45	4,91	4,64	4,09	3,27	2,73
60	5,00	4,50	4,25	3,75	3,00	2,50
65	4,62	4,15	3,92	3,46	2,77	2,31
70	4,29	3,86	3,64	3,21	2,57	2,14
75	4,00	3,60	3,40	3,00	2,40	2,00
80	3,75	3,38	3,19	2,81	2,25	1,88
85	3,53	3,18	3,00	2,65	2,12	1,76

90	3,33	3,00	2,83	2,50	2,00	1,67
95	3,16	2,84	2,68	2,37	1,89	1,58
100	3,00	2,70	2,55	2,25	1,80	1,50

U tablici 8 prikazan je izračun OBF-a koji predstavlja ukupan broj korisnika koji mogu dijeliti određeni kanal ili kapacitet (poglavlje 5.2.2). Podatak koji je korišten za maksimalnu, odnosno vršnu brzinu ćelije preuzet je iz tablice 4 gdje je navedeno da teorijska brzina ćelije u LTE-A mreži iznosi 300 Mb/s. Nadalje, prosječne brzine korisnika su također pretpostavljene na osnovu [26] u rasponu 15-100 Mb/s. Faktor iskorištenosti može biti maksimalno 1 što predstavlja opterećenje ćelije od 100%. Za izračun je korišten omjer od 0,5-1 što predstavlja opterećenost ćelije od 50-100%. Kod planiranja kapaciteta ćelije ili bazne stanice (*site*) nikada se ne uzima vrijednost za iskorištenje 100%.

Prema izračunu vidljivo je da što je veći faktor iskorištenosti, veći je i broj korisnika koji se istovremeno može poslužiti na istom kanalu za istu vrijednost prosječne brzine prijenosa na silaznoj vezi.. Međutim, što je opterećenje ćelije veće, to znači da je kvaliteta usluga za korisnike manja. Odnosno, za veći faktor iskorištenosti veći je i OBF za istu brzinu prijenosa podataka i obratno. Također, u tablici 8 je vidljivo da što je veća prosječna brzina prijenosa podataka na silaznoj vezi da je manji broj korisnika koji se može poslužiti istovremeno na istom kanalu, za istu vrijednost faktora iskorištenja..

Na osnovu prethodnog izračuna putem kojeg je dobiven OBF, moguće je dobiti ukupnu brzinu prijenosa podataka koja je potrebna za izračun kapaciteta ćelije. U ovom izračunu, korištena je formula (17) u kojoj su potrebni podatci: ukupni broj korisnika, vršna brzina prijenosa podataka, te OBF. Svi potrebni podatci su izračunati u tablici 8, a pretpostavljen broj korisnika je 1 000 000. Na osnovu tih podataka, izračunata je i ukupna brzina prijenosa podataka prikazana u tablici 9.

Tablica 9. Izračun ukupne brzine prijenosa podataka u Mb/s

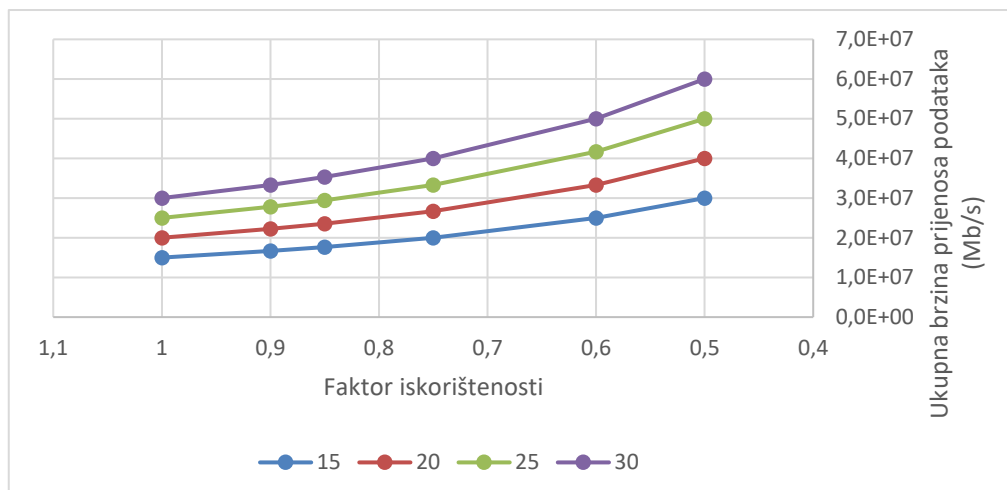
Broj korisnika	1000000
Maksimalna brzina u ćeliji (Mb/s)	300

Prosječna brzina (Mb/s)	Faktor iskorištenosti (UF1)	Faktor iskorištenosti (UF2)	Faktor iskorištenosti (UF3)	Faktor iskorištenosti (UF4)	Faktor iskorištenosti (UF5)	Faktor iskorištenosti (UF6)
	1	0,9	0,85	0,75	0,6	0,5
15	15 000 000	16 666 666,7	17647058,82	20 000 000	25 000 000	30 000 000
20	20 000 000	22 222 222,2	23529411,76	26 666 667	33 333 333	40 000 000
25	25 000 000	27 777 777,8	29411764,71	33 333 333	41 666 667	50 000 000
30	30 000 000	33 333 333,3	35294117,65	40 000 000	50 000 000	60 000 000
35	35 000 000	38 888 888,9	41 176 470,59	46 666 667	58 333 333	70 000 000
40	40 000 000	44 444 444,4	47 058 823,53	53 333 333	66 666 667	80 000 000
45	45 000 000	50 000 000	52 941 176,47	60 000 000	75 000 000	90 000 000
50	50 000 000	55 555 555,6	58 823 529,41	66 666 667	83 333 333	1E+08
55	55 000 000	61 111 111,1	64 705 882,35	73 333 333	91 666 667	1,1E+08
60	60 000 000	66 666 666,7	70 588 235,29	80 000 000	1E+08	1,2E+08
65	65 000 000	72 222 222,2	76 470 588,24	86 666 667	1,08E+08	1,3E+08
70	70 000 000	77 777 777,8	82 352 941,18	93 333 333	1,17E+08	1,4E+08
75	75 000 000	83 333 333,3	88 235 294,12	1E+08	1,25E+08	1,5E+08
80	80 000 000	88 888 888,9	94 117 647,06	1,07E+08	1,33E+08	1,6E+08
85	85 000 000	94 444 444,4	100 000 000	1,13E+08	1,42E+08	1,7E+08
90	90 000 000	100 000 000	105 882 352,9	1,2E+08	1,5E+08	1,8E+08
95	95 000 000	105 555 556	111 764 705,9	1,27E+08	1,58E+08	1,9E+08
100	100 000 000	111 111 111	117 647 058,8	1,33E+08	1,67E+08	2E+08

U tablici 9 prikazane su vrijednosti za ukupne brzine prijenosa podataka za 1 000 000 korisnika, za različite vrijednosti prosječnih brzina i faktora iskorištenja. Iz podataka u tablici 9 može se zaključiti da što je veći OBF, to je potrebna manja ukupna brzina prijenosa podataka.

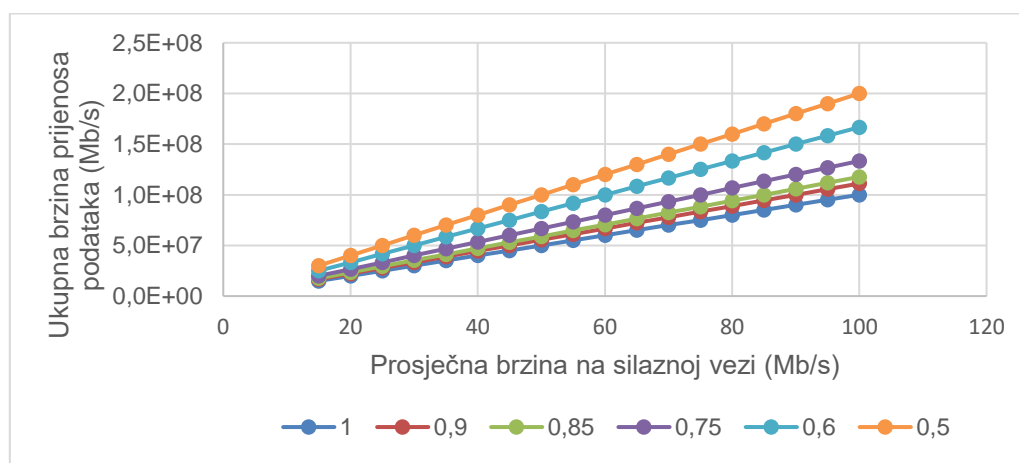
Npr. ako se planira kapacitet mreže za 1 000 000 korisnika na način da prosječna prosječna brzina u ćeliji iznosi 15 Mb/s uz maksimalno opterećenje ćelije (dakle, OBF je 20 – tablica 8), ukupna potrebna brzina prijenosa podataka je 15 Tb/s. Ako je prosječna brzina 20 Mb/s, a vrijednosti svih ostalih parametara ostaju nepromijenjeni (dakle, OBF je 15 – tablica 8), tada, je potrebna ukupna brzina prijenosa podataka od 20 Tb/s.

Na grafikonu 1 prikazana je usporedba potrebnih ukupnih brzina prijenosa podataka za 1 000 000 korisnika ovisno o faktoru iskorištenja i OBF-u.



Grafikon 1. Odnos ukupne brzine prijennosa podataka, prosječne brzine i faktora iskorištenosti

Grafikon 1 pokazuje da se ukupna brzina prijennosa podataka povećava kako se smanjuje vrijednost faktora iskorištenosti za istu prosječnu brzinu. Iz toga proizlazi da ako se postavi kriterij kod planiranja kapaciteta da iskorištenje ćelije treba biti manje u tom slučaju će potreban broj ćelija/baznih stanica biti veći kako bi se zadovoljile potrebe određenog broja korisnika. Iz grafikona 1 se također može vidjeti da za veće prosječne brzine pri istom opterećenju bi također trebalo više instaliranih ćelija/baznih stanica kako bi se zadovoljile potrebe korisnika. Na grafikonu 2 prikazan je odnos ukupne brzine prijennosa podataka i prosječne brzine na silaznoj vezi.



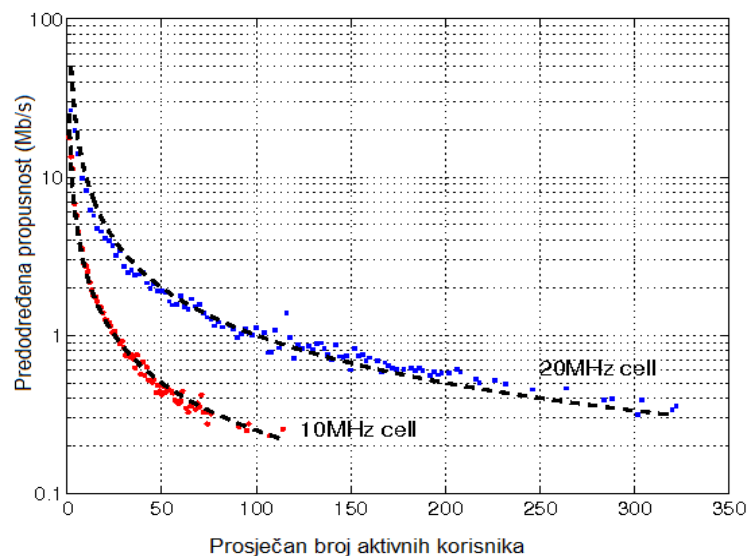
Grafikon 2. Odnos ukupne brzine prijennosa podataka, prosječne brzine na silaznoj vezi i faktora iskorištenja

Grafikon 2 prikazuje da se zahtijevana ukupna brzina prijennosa (za definirani broj korisnika) podataka povećava sa povećanjem prosječne brzine na silaznoj vezi.za isti

faktor iskorištenosti. Također se iz prikazanog odnosa na grafikonu 2 može vidjeti da ukoliko se želi postići ista prosječna brzina na silaznoj vezi da će trebati veća zahtijevana ukupna brzina prijenosa podataka, a time i veći broj baznih stanica, ako se definira (dozvoli) manje iskorištenje ćelije/bazne stanice.

Korištenjem prethodnih parametara dobiveni su izračuni koji su potrebni za daljnje planiranje kapaciteta LTE mreže. Na osnovu dobivenih podataka, kao što je prethodno rečeno moguće je izračunati broj potrebnih baznih stanica, za područje na kojem se planira mreža. Također, prilikom planiranja mreže važno je uzeti u obzir koliko je neaktivnih korisnika u mreži jer oni dodatno opterećuju mrežu. Prema [27] propusnost ćelije se može predodrediti s obzirom na broj aktivnih korisnika.

Iz grafikona 3, na kome je prikazan odnos broja aktivnih korisnika u ćeliji i propusnosti po korisniku za različite širine pojasa (10 i 29 Mhz), može se vidjeti da je propusnost opada eksponencijalno s porastom broja aktivnih korisnika po ćeliji. Također se može vidjeti da u slučaju korištenja veće širine pojasa u ćeliji prosječna propusnost po korisniku sporije opada s porastom broja aktivnih korisnika.



Grafikon 3. Odnos propusnosti i broja aktivnih korisnika

Izvor: [27]

Npr., ako je u ćeliji 100 aktivnih korisnika, prosječna propusnost po korisniku iznositi će oko 1 Mb/s, ako se radi o ćeliji sa širinom pojasa od 20 MHz, a ako se radi o ćeliji sa širinom pojasa od 10 MHz, onda će ta brzina biti znatno manja i iznositi će oko 0,25 Mb/s.

8. Zaključak

LTE mreža predstavlja optimiziranu radio pristupnu tehnologiju sa niskim kašnjenjem i pruženom velikom širinom pojasa. Zamjenjuje prethodne generacije mreža, jer je puno pouzdanija i brža. Većina telekomunikacijskih operatora u posljednjih nekoliko godina ulaže u tehnologiju kako bi se omogućila poboljšanja mreže, te s tim i zadovoljstvo korisnika.

Shodno tome, važno je dobro planiranje mreže kako bi se postigla što bolja pokrivenost i osiguravanje potrebnog kapaciteta u ćeliji. Različite metode i alati se koriste kako bi se postigla što točnija procjena. Većina ih se temelji na sličnim parametrima koji su najbitniji prilikom planiranja. Nakon što se odredi pokrivenost područja, važno je osigurati potrebne brzine prijenosa podataka svim korisnicima na tom području.

Upravo zbog toga, prilikom planiranja kapaciteta mreže, potrebno je odrediti broj korisnika na tom području, posebice aktivnih koji najviše opterećuju mrežu, kao i dopušteno opterećenje koje će omogućiti svim korisnicima neometani pristup mreži. U ovom radu, prikazano je određivanje kapaciteta analizom prometa. Analizom prometa utvrđeno je da se broj kanala koji može dijeliti veći broj korisnika smanjuje što je manji faktor iskorištenosti u mreži. Međutim, na taj način se omogućava korisnicima veća kvaliteta usluge koja predstavlja jednu od glavnih performansi kada je u pitanju LTE mreža.

Temeljna svrha ovog rada je prikazati načine planiranja kapaciteta mreže kako bi se svi potrebni parametri prilikom planiranja mreže uspješno razmatrali. Jedan od glavnih ciljeva je analizirati promet s obzirom na broj korisnika u ćeliji, te zadane vršne i prosječne brzine prijenosa podataka. Potrebno je uzeti u obzir prosječne brzine korisnika, jer je izuzetno važno prilikom planiranja mreže promatrati korisnike na rubu ćelije i kakav domet signala oni imaju.

Nadalje, time je pokazano da određivanje kapaciteta ovisi i o kapacitetu kanala koji može biti dijeljen između korisnika, kao i o faktoru iskorištenosti ćelije. Na osnovu izvršenih izračuna moguće je odrediti optimalan i potreban broj baznih stanica na promatranom području. Ako se prilikom planiranja omogući kvalitetna usluga i garantirana brzina prijenosa podataka i najudaljenijim korisnicima na području ćelije, onda je planiranje uspješno izvršeno.

Literatura

- [1] Mrvelj Š. *LTE*. Autorizirana predavanja. Fakultet prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu; 2017.
- [2] Alcatel. *The LTE Network Architecture*. Alcatel Lucent. 2009. Preuzeto sa: http://www.cse.unt.edu/~rdantu/FALL_2013_WIRELESS_NETWORKS/LTE_Alcatel_White_Paper.pdf [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [3] RCR Wireless News. *Master LTE with the Help of an LTE Network Diagram*. RCR Wireless. 9. Svibanj 2014. Preuzeto sa: <https://www.rcrwireless.com/20140509/evolved-packet-core-epc/lte-network-diagram>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [4] *LTE Network Architecture*. Preuzeto sa: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [5] Kumar Singh R., Singh R. *4G LTE Cellular Technology: Network Architecture and Mobile Standards*. *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*. 2016; 5(12): 4-5. Preuzeto sa: <https://pdfs.semanticscholar.org/b2ab/1c503c76a4b3870feaec5c3a6a157972a555.pdf>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [6] Sesia S, Toufik I, Baker M. *The UMTS Long Term Evolution*. From Theory to Practice Second Edition. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. 2011. Preuzeto sa: http://www.aldraji.com/download/The_UMTS_Long_Term_EvolutionB.pdf. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [7] RCR Wireless News. *LTE MMEA Core Connector for LTE*. RCR Wireless. 9. Svibanj 2014. Preuzeto sa: <https://www.rcrwireless.com/20140509/diameter-signaling-controller-dsc/lte-mme-epc>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [8] Rohde & Schwarz. *Mobile Network Testing*. *Smart macro network enhancements 4x4 MIMO*. Preuzeto sa: <https://blog.mobile-network->

- testing.com/capacity-enhancements/4x4-mimo/. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [9] Motorola Inc. *Realistic LTE Performance*. 2009. Preuzeto sa: https://www.apwpt.org/downloads/realistic_lte_experience_wp_motorola_aug2009.pdf. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [10] *All about Wired and Wireless Technology*. Preuzeto sa: <http://www.simpletechpost.com/2012/05/default-bearer-dedicated-bearer-what.html>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [11] *LTE QoS parameters*. Preuzeto sa: <https://www.netmanias.com/en/post/blog/5933/lte-qos/lte-qos-part-2-lte-qos-parameters-qci-arp-gbr-mbr-and-ambr>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [12] Abdul Basit S. *Dimensioning of LTE Network; Description of Models and Tool, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution radio interface*. Master Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Masters of Science in Technology. Helsinki University of Technology. 2009. Preuzeto sa: <https://pdfs.semanticscholar.org/00df/2dea56011eea83255434c8f7594c49da60c5.pdf>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [13] Kukushkin A. *Introduction to Mobile Network Engineering u GSM, 3G-WCDMA, LTE and The Road to 5G.*, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2018. Preuzeto sa: <https://www.wiley.com/en-us/Introduction+to+Mobile+Network+Engineering%3A+GSM%2C+3G+WCDMA%2C+LTE+and+the+Road+to+5G-p-9781119484226>. [Pristupljeno: srpanj 2019.].
- [14] Venkataraman Krishnamurthy T., Shetty R. *4G: Deployment Strategies and Operational Implications*. Apress. Preuzeto sa: https://content.schweitzer-online.de/static/catalog_manager/live/media_files/representation/zd_std_orig__zd_schw_orig/013/739/493/9781430263265_content_pdf_1.pdf. [Pristupljeno: kolovoz 2019.].

- [15] Viavi. *Interference in Cellular Networks*. Viavi Solutions Inc. 2015. Preuzeto sa: <https://www.viavisolutions.com/en-us/literature/interference-cellular-networks-intermodulation-and-frequency-refarming-white-paper-en.pdf> [Pristupljeno: kolovoz 2019.]
- [16] Infovista. *The Unified Planning and Optimization Process*. Infovista. Preuzeto sa: https://www.infovista.com/sites/default/files/resources/2018-07/sb_infovista_unified_planning_and_optimization_process.pdf. [Pristupljeno kolovoz 2019.]
- [17] Infovista. *Planet*.
Preuzeto sa: https://www.infovista.com/sites/default/files/resources/2018-09/ds_infovista_planet.pdf. [Pristupljeno: kolovoz 2019.]
- [18] Ericsson. *Coverage and Capacity Dimensioning*. 2015. Ericsson. Preuzeto sa: https://www.academia.edu/30352479/Lte_capacity_and_coverage. [Pristupljeno: kolovoz 2019.]
- [19] Tomić I. A., Davidović M. S., Bjeković S. M. *On the downlink capacity of LTE cell*. Ericsson. 2015. p.182-186. Preuzeto sa: https://www.researchgate.net/publication/284732779_On_the_downlink_capacity_of_LTE_cell. [Pristupljeno: kolovoz 2019.]
- [20] Barreiros de Alcobia A. B. *LTE radio network deployment design in urban environments under different traffic scenarios*. Thesis to obtain the Master of Science Degree in Electrical and Computer Engineering. Tecnico Lisboa. 2017. Preuzeto sa: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1970719973966365/Thesis_AntonioA_70070_v20170522.pdf. [Pristupljeno: kolovoz 2019.]
- [21] Acakpovi A., Tahirou I., Gnahore M. C., Fifatin F. X. *Dimensioning Tool for 3GPP Long Term Evolution (LTE) Radio Access Network*. *International Journal of Mobile Communication & Networking*. 2014; 5(1): 15-28. Preuzeto sa: https://www.researchgate.net/profile/Amevi_Acakpovi/publication/328135174_Dimensioning_Tool_for_3GPP_Long_Term_Evolution_LTE_Radio_Acce

- ss_Network/links/5bba8438a6fdcc9552d92d6c/Dimensioning-Tool-for-3GPP-Long-Term-Evolution-LTE-Radio-Access-Network.pdf. [Pristupljeno: kolovoz 2019].
- [22] Singh Y. *Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength. International Journal of Computer Applications.* 2012; 59(11): 37-38. Preuzeto sa: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.303.4057&rep=rep1&type=pdf&fbclid=IwAR09sm67CT6EABLPwpoWJN7Be9-EVAu8cw9VkNXt9cFafMVZf2_5PRB9rw. [Pristupljeno: kolovoz 2019].
- [23] *How fast is 4G?* Preuzeto sa: <https://www.4g.co.uk/how-fast-is-4g/>. [Pristupljeno: rujan 2019.].
- [24] Triggs R. *4G vs LTE – what is the difference?* Android Authority. Preuzeto sa: <https://www.androidauthority.com/4g-vs-lte-274882/>. [Pristupljeno: rujan 2019.].
- [25] Tom's Guide. *Fastest Wireless Network 2019: It's Not Even Close.* 2019. Preuzeto sa: <https://www.tomsguide.com/us/best-mobile-network,review-2942.html>. [Pristupljeno: rujan 2019.].
- [26] *How Fast Is 4G LTE Wireless Service?* Preuzeto sa: <https://www.lifewire.com/how-fast-is-4g-wireless-service-577566>. [Pristupljeno: rujan 2019.].
- [27] Salo J. *LTE Radio Load versus User Throughput.* 2016. Preuzeto sa: <https://www.semanticscholar.org/paper/LTE-Radio-Load-versus-User-Throughput-Salo/d092d92b8050349bcc58d2c42ee860585f2d9558>. [Pristupljeno: rujan 2019.].

Popis kratica

AMBR	Aggregate Maximum Bit Rate
APN	Access Point Name
ARP	Allocation and Retention Priority
AuC	Authentication Centre
CPE	Customer-premises equipment or customer-provided equipment)
HSPA+	Evolved High Speed Packet Access
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
E-SMLC	Evolved Serving Mobile Location Centre
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
GMLC	Gateway Mobile Location Centre
GPRS	General Packet Radio Service
GBR	Guaranteed Bit Rate
HSS	Home Subscriber Server
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
IP	Internet Protocol
LoS	Line of Sight
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution - Advanced
MBR	Maximum Bit Rate
MME	Mobility Management Entity
MCS	Modulation and Coding Schemes
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NAS	Non-Access Stratum
NAS	Non-Access Stratum

NLoS	Non-Line of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OBF	Overbooking Factor
PDN	Packet Data Network
P-GW	PDN Gateway
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
QCI	QoS Class Identifier
64QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
RAT	Radio Access Technology
RLB	Radio Link Budget
RSRP	Reference Signal Received Power
S-GW	Service Gateway
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
3GPP	Third Generation Partnership Project
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UE	User Equipment
UE-AMBR	User Equipment-Aggregate Maximum Bit Rate
VoIP	Voice over Internet Protocol
Wi-Max	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Popis slika

Slika 1. Prikaz EPS arhitekture, [3]	3
Slika 2. Prikaz E-UTRAN arhitekture, [4]	4
Slika 3. Prikaz jezgrene mreže, [5]	6
Slika 4. MIMO sustav 4x4, [8]	9
Slika 5. Primjer propusnosti na različitoj udaljenosti od bazne stanice, [9]	11
Slika 6. Prikaz prosječne propusnosti različitih tehnologija, [9]	12
Slika 7. Proces planiranja mreže	16
Slika 8. Proces dimenzioniranja mreže	20
Slika 9. Prikaz različitih vrsta ćelija, [12]	27
Slika 10. Ulazni parametri kapaciteta, [12].....	33
Slika 11. Ulazni parametri pokrivenosti, [12]	34
Slika 12. Izračun kapaciteta, [12]	35
Slika 13. Izlazni parametri, [12].....	35
Slika 14. Prikaz podataka u realnom vremenu koji mogu biti korišteni pomoću Planet alata, [17].....	37
Slika 15. Prsten metoda, [19].....	38

Popis tablica

Tablica 1. Prosječna propusnost u silaznoj vezi za LTE mrežu	29
Tablica 2. Propusnost u silaznoj vezi određena RSRP-om s obzirom na opterećenje mreže	41
Tablica 3. Prosječna propusnost korisnika s obzirom na opterećenja mreže i rub ćelije	42
Tablica 4. Maksimalne teorijske brzine ćelije.....	46
Tablica 5. Stvarne brzine ćelije.....	46
Tablica 6. Brzine prijenosa prema kategorijama LTE-A.....	47
Tablica 7. Ostvarene prosječne brzine prijenosa u silaznoj i uzlaznoj vezi kod različitih operatora u SAD-u.....	47
Tablica 8. Izračun OBF-a za silaznu vezu za različite vrijednosti faktora iskorištenja i prosječnih brzina	48
Tablica 9. Izračun ukupne brzine prijenosa podataka u Mb/s	49

Popis grafikona

Grafikon 1. Odnos ukupne brzine prijenosa podataka, prosječne brzine i faktora iskorištenosti.....	51
Grafikon 2. Odnos ukupne brzine prijenosa podataka, prosječne brzine na silaznoj vezi i faktora iskorištenja	51
Grafikon 3. Odnos propusnosti i broja aktivnih korisnika.....	52