

Analiza ključnih pokazatelja uspješnosti 4G mobilne mreže

Danilović, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:942110>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-20**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**ANALIZA KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI
4G MOBILNE MREŽE**

Diplomski rad

Nikola Danilović

Osijek 2024.

Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ime i prezime pristupnika:	Nikola Danilović
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Komunikacije i
Mat. br. pristupnika, god.	D-1286, 14.10.2020.
JMBAG:	0165073109
Mentor:	prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	doc. dr. sc. Denis Vranješ
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drlje
Član Povjerenstva 2:	prof. dr. sc. Mario Vranješ
Naslov diplomskog rada:	Analiza ključnih pokazatelja uspješnosti 4G mobilne mreže
Znanstvena grana diplomskog rada:	Radiokomunikacije (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	TEMS Investigation program omogućava analizu parametara mobilnih mreža važnih za kvalitetu pri prijenosu govornog signala i IP usluga. U radu je potrebno opisati funkcionalnosti programa te parametre 4G mreže koje program može analizirati uključujući ključne pokazatelje uspješnosti (KPI - Key Performance Indicators). U praktičnom dijelu rada potrebno je napraviti statističku analizu KPI parametara 4G mobilne mreže na temelju provedenih mjerenja. Rezervirano za studenta Nikolu Danilovića
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	06.09.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	20.09.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	20.09.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 20.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Nikola Danilović
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Komunikacije i informatika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1286, 14.10.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza ključnih pokazatelja uspješnosti 4G mobilne mreže**

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

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED ISTRAŽIVANJA KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI 4G MOBILNE MREŽE	3
3. RAZVOJ I KARAKTERISTIKE 4G MOBILNIH MREŽA	5
3.1. Razvoj mobilnih mreža od 1G do 4G	5
3.1.1. Prva generacija mobilnih mreža (1G)	5
3.1.2. Druga generacija mobilnih mreža (2G)	5
3.1.3. Treća generacija mobilnih mreža(3G)	6
3.1.4. Počeci razvoja četvrte generacije mobilnih mreža (4G)	7
3.2. Arhitektura LTE mreže	7
3.2.1. Korisnički uređaj (UE)	8
3.2.2. Radijska pristupna mreža (E-UTRAN)	8
3.2.3. Jezgrena mreža (EPC)	13
3.3. Ključni pokazatelji uspješnosti	16
3.3.1. KPI vezani za EPC	16
3.3.2. KPI vezani za E-UTRAN	18
3.3.3. Dodatni KPI-ovi za E-UTRAN	19
4. ANALIZA KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI 4G MOBILNE MREŽE POMOĆU TEMS INVESTIGATION PROGRAMSKOG ALATA	25
4.1. Rad u TEMS Investigation programskom alatu	25
4.2. Statistička analiza	31
4.2.1. Analiza parametara za mrežu MM1	32
4.2.2. Analiza parametara za mrežu MM2	42
4.2.3. Analiza parametara za mobilnu mrežu MM3	52
4.2.4. Usporedba statističkih podataka za mreže MM1, MM2 i MM3	58

5. ZAKLJUČAK	62
LITERATURA.....	63
SAŽETAK.....	65
ABSTRACT.....	65
PRILOZI.....	66
ŽIVOTOPIS.....	69

1. UVOD

Prva generacija mreža mobilne telefonije (1G) razvila se osamdesetih godina prošlog stoljeća. Prva takva mreža implementirana je u Tokyo-u u Japanu od strane tvrtke Nippon Telegraph and Telephone godine 1979. Ova se tehnologija proširila po cijelom Japanu, a zatim i SAD-u i Kanadi. Slijedila je nakon toga 2G generacija mobilnih mreža koja je donijela bolju kvalitetu telefonskog signala, veću sigurnost i pouzdanost, bolju zaštitu privatnosti korisnika, te povećanje kapaciteta mreže zahvaljujući digitalnoj tehnologiji. Veće mogućnosti što se tiče podatkovnog prometa su uvedene s trećom generacijom mobilnih mreža, što je dovelo internet na mobilne uređaje. Povećanjem potražnje i potrebe za bržim podatkovnim prometom dovelo je do razvoja 4G mobilne mreže. Takvo povećanje potražnje je uzrokovano sve većim razvojem interneta, mobilnih aplikacija, internetskih usluga, društvenih mreža i sl. Četvrta generacija mobilnih mreža (4G) je prvi put komercijalno uvedena 2009. godine u Norveškoj. S minimalnih 12.5 Mbit/s je mogla pružiti gledanje visoko kvalitetnih videozapisa, relativno brz mobilni Internet i igranje online video igara.

Mobilne mreže u današnje vrijeme predstavljaju ključnu komunikacijsku infrastrukturu kako za privatne tako i za poslovne korisnike. Visoka razina složenosti mobilnih mreža te veliki broj usluga i korisnika postavljaju pred mrežne operatere težak zadatak konfiguracije i optimizacije parametara mreže koji će osigurati visoku iskustvenu kvalitetu za korisnike. Kako bi se kontrolirala kvaliteta rada mreže, a time i kvaliteta pružene usluge, koriste se ključni parametri uspješnosti (engl. *Key Performance Indicators* - KPI).

Brojni parametri i karakteristike su uvedene pri razvoju 4G mobilne mreže kojima se ocjenjuje stanje i kvaliteta signala i usluga mobilne mreže. Parametri koji su od velike važnosti pri ocjenjivanju kvalitete 4G mobilne mreže su ključni parametri i pokazatelji uspješnosti, te se oni opisuju i analiziraju u ovom diplomskom radu. U ovom su diplomskom radu opisani pokazatelji uspješnosti za jezgrenu i radijsku pristupnu mrežu, a u praktičnom dijelu rada analizirani su parametri koji se odnose na jakost i kvalitetu signala te propusnost. Razrađene su sličnosti i razlike kao i prednosti i nedostaci pojedinih parametara u određenim slučajevima te je na temelju toga donijeta ocjena karakteristika i performansi tri mobilne mreže u kojima je provedeno mjerenje parametara.

U drugom je poglavlju ovog rada dan pregled recentnih istraživanja koji se bave različitim aspektima unaprjeđenja mobilnih mreža četvrte generacije, a povezana su s ključnim pokazateljima uspješnosti. U trećem je poglavlju dan pregled razvoja i karakteristike 4G mobilne

mreže kako bi se dala šira slika područja kojim se ovaj rad bavi. Pregled pokazatelja uspješnosti koji se koriste u 4G mobilnoj mreži dan je u trećem poglavlju, a u četvrtom poglavlju je dana analiza izabranih ključnih pokazatelja uspješnosti za tri mobilne mreže napravljena na temelju izmjerenih podataka primjenom TEMS Investigation programskog alata.

2. PREGLED ISTRAŽIVANJA KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI 4G MOBILNE MREŽE

Od početka implementacije 4G mobilnih mreža provode se mjerenja i analize podataka koji su vezani za ključne pokazatelje uspješnosti mreže. Svrha ovih istraživanja je utvrđivanje performansi mreže te unaprjeđenje kvalitete korisničkog iskustva i optimizacije resursa.

Rezultati mjerenja i analize ključnih pokazatelja uspješnosti 4G mobilne mreže predstavljeni su u brojnim radovima koji se bave usporedbom performansi mreže različitih operatera [1-4], ili usporedbi performansi 4G i starijih 2G i 3G mreža. Najčešće mjereni i analizirani ključni pokazatelji uspješnosti u ovim radovima su RSRP (engl. *Reference Signal Received Power*), RSRQ (engl. *Reference Signal Received Quality*), RSSI (engl. *Received Signal Strength Indicator*) i SINR (engl. *Signal to Interference and Noise Ratio*).

Naprednije analize ključnih pokazatelja uspješnosti, koje uključuju i strojno učenje, provode se u svrhu razvoja novih algoritama za optimizaciju različitih procesa u 4G mreži i maksimizaciju ključnih pokazatelja. Tako je u [5] predstavljen optimizacijski algoritam za poboljšanje unutar frekvencijske predaje poziva (engl. *Inter-Frequency Handover*) u 4G i 5G mobilnim mrežama, utemeljen na sljedećim pokazateljima uspješnosti: prosječan broj PRB-a (engl. *Physical Resource Block*) korišten u silaznoj vezi (engl. *Down Link - DL*) ili uzlaznoj vezi (engl. *Up Link - UL*), prosječan RRC (engl. *Radio Resource Control*) spojenog korisničkog uređaja (engl. *User Equipment - UE*), prosječni CQI (engl. *Channel Quality Indicator*), prosječni SINR za PUSCH (engl. *Physical Uplink Shared Channel*), broj pokušaja međufrekvencijskih predaja poziva (engl. *HandOver - HO*), broj inter-RAT (engl. *Radio Access Technology*) HO, broj HO za preusmjeravanje te brzina prijenosa u DL ili UL za krajnjeg korisnika.

U [6] je predložen postupak utemeljen na strojnom učenju koji omogućava maksimiziranje određenih ključnih pokazatelja uspješnosti, kao što je SINR, te posljedično propusnost u LTE mreži. U prvom dijelu postupak predviđa ključne pokazatelje od interesa na temelju podataka za CIO (engl. *Cell Individual Offset*) i HOM (engl. *Handover Margin*), a zatim primjenom genetičkog algoritma pronalazi optimalnu kombinaciju CIO i HOM parametara za maksimiziranje vrijednosti SINR-a. Autori su za predikciju SINR-a testirali 5 modela strojnog učenja: linearna regresija, k-ti najbliži susjed (KNN), XGBoost (engl. *Extreme Gradient Boosting*), CatBoost (engl. *Categorical Boosting*), DNN (engl. *Deep Neural Network*). Utvrdili su da CatBoost model ostvaruje najbolje rezultate.

Analiza ključnih pokazatelja uspješnosti se provodi i u svrhu upravljanja performansama i konfiguracijom u LTE mreži. Tako je u [7] predstavljen sustav za praćenje QoS (engl. *Quality of Service*), odnosno kvalitete usluga koje pruža 4G LTE mobilna mreža malim ćelijama, zasnovan na TR-069 protokolu. U ovom sustavu, pomoću ključnih pokazatelja uspješnosti malih LTE ćelija, mehanizam praćenja QoS-a uspostavlja dinamični prag željene razine kvalitete usluga temeljen na težinskim pomičnim srednjim vrijednostima.

Kada su u pitanju velike količine ključnih pokazatelja uspješnosti generirane od strane velikog broja baznih postaja, potrebno je na pravilan način analizirati ključne pokazatelje. Upravo to pokušavaju postići autori u [8] na način da koriste *few-shot* strojno učenje temeljeno na prototipskim mrežnim algoritmom. Rezultati u tom radu ukazuju na to da navedena tehnika analize ključnih pokazatelja ima visoke performanse uz korištenje ograničene količine podataka.

U [9] je predstavljena metoda koja na temelju prikupljanja velike količine ključnih pokazatelja uspješnosti od samih korisnika mreže te uz pripadnu geografsku lokaciju procjenjuje performanse mreže na specifičnoj lokaciji. To je napravljeno kako bi se minimizirao broj testova u vožnji te da se postigne organizacija mreže pomoću pozitivne povratne veze. U predikciji jakosti signala koristi se neuronska mreža koja je pokazala dobre rezultate na način da smanjuje pogrešku procjene propusnosti signala i povećava točnost procjene mrežne pokrivenosti.

U radu [10] istražuje se kratkoročno predviđanje ključnih pokazatelja uspješnosti za ruralne LTE mreže. Rad jasno prikazuje da takvi ključni pokazatelji imaju kraću vremensku ovisnost u usporedbi s urbanim mobilnim mrežama. Također, rad ukazuje da u predviđanju ključnih pokazatelja Seq2Seq (engl. *Sequence-to-Sequence*) model ima bolje performanse od RNN (engl. *Recurrent Neural Network*) modela.

Nadalje, rad [11] predstavlja algoritam za detekciju anomalija za ruralne fiksne LTE mreže te ukazuje na težinu detekcije grešaka u takvim LTE mrežama. Rad predlaže hibridnu metodu detekcije anomalija koja koristi ključne pokazatelje uspješnosti, povijesna predviđanja ključnih pokazatelja, DBSCAN (engl. *Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise*) i statističku analizu. Dobiveni algoritam je premašio performanse postojećih osnovnih metoda detekcije anomalija i detektira greške u ruralnim fiksnim LTE mrežama prije nego alarmi već ugrađeni u te mreže.

3. RAZVOJ I KARAKTERISTIKE 4G MOBILNIH MREŽA

Kako bi se dobila šira slika 4G tehnologije i njenih ključnih pokazatelja uspješnosti potrebno je znati tehnološki kontekst iz kojega je proizašla takva tehnologija. To se odnosi na razvojne pojedinosti koje su prethodile 4G mreži, kao i tehnološke karakteristike i svojstva te mreže.

3.1. Razvoj mobilnih mreža od 1G do 4G

3.1.1. Prva generacija mobilnih mreža (1G)

Može se reći da razvoj mobilnih telekomunikacijskih mreža započinje razvojem prve generacije mobilnih mreža, odnosno 1G. Ta prva generacija se prvo razvila u Japanu i implementirala u Tokyu davne 1979. godine. U odnosu na današnje standarde, funkcionalnosti i usluge takve mreže bile su primitivne jer su se mogle samo prenositi glasovne informacije. Tek sredinom 80-ih godina prošlog stoljeća se ta tehnologija proširila na Sjedinjene Američke Države i Kanadu. Primjer jednog mobilnog uređaja iz tog perioda se može vidjeti na slici 3.1. [12]



Slika 3.1. Motorola DynaTac, 1G mobilni uređaj [12]

3.1.2. Druga generacija mobilnih mreža (2G)

Zbog veličine mobilnih uređaja i ograničenih funkcionalnosti prve generacije mobilnih mreža, pojavila se potreba za razvojem druge generacije mobilnih telekomunikacijskih mreža. Još

poznata i kao 2G mreža, druga generacija mobilnih telekomunikacijskih mreža implementirana je po prvi put ranih 90-ih godina prošlog stoljeća. U odnosu na 1G prijenos podataka, brzine oko 2,4 kbit/s, prijenos podataka 2G mobilne telekomunikacijske mreže je bio puno veći, oko 19.2 kbit/s. [13] To je i dalje iznimno sporo uspoređujući s današnjim standardima. Jedna od bitnijih tehnologija koja se razvila u sklopu 2G generacije mobilnih tehnologija jest GSM. GSM (engl. *Global System for Mobile communication*) je digitalna mobilna mreža te čini bitnu tehnologiju u evoluciji mobilnih mreža. Daljnji razvoj GSM mreže išao je u smjeru povećanja brzine prijenosa podataka pa su se razvile nove tehnologije HSCSD (engl. *High-Speed Circuit-Switched Data*), GPRS (engl. *General Packet Radio Service*) i EDGE (engl. *Enhanced Data GSM Environment*) [14].

Bitan napredak koji je 2G donio jest poboljšanje kvalitete mobilnih telefonskih razgovora i povećanje privatnosti i sigurnosti razgovora uvođenjem kriptiranih poziva. Zbog proširenja funkcionalnosti i smanjenja veličine uređaja uslijed napretka tehnologije, mobilni uređaji i pripadne usluge su postale sve popularnije. Tako je nastao cijeli niz mobilnih uređaja različitog dizajna, jedan od takvih se može vidjeti na slici 3.2. [12]



Slika 3.2. Primjer mobilnog uređaja koji koristi 2G mobilnu mrežu [12]

3.1.3. Treća generacija mobilnih mreža(3G)

Kako je 2G postajao popularniji i više korišten, to je potreba za bržom razmjenom podataka postajala veći imperativ. Mali korak prema trećoj generaciji mobilnih mreža je napravljen kada je napravljena 2.5G mreža (GPRS) [13], tj. poboljšana 2G mreža, s većim brzinama prijenosa podataka do 384 kbit/s. Sam prijelaz na 3G je ostvaren 2001. godine od strane NTT DoCoMo-a u

Japanu. 3G je napredniji od 2G i 2.5G u smislu većih brzina prijenosa podataka, većeg mrežnog kapaciteta i poboljšanih mrežnih usluga. Bitna 3G tehnologija koja je razvijena jest UMTS (engl. *Universal Mobile Telecommunication System*). UMTS je širokopolasna mobilna telekomunikacijska tehnologija napravljena kako bi poboljšala kapacitet i brzinu mobilnih mreža, [15]. Zbog spomenutih poboljšanja 3G-a u odnosu na 2G mobilne mreže, pametni telefoni (engl. *smartphone*) postaju jako popularni. To je bila odskočna daska za stvaranje potreba za još većim mrežnim kapacitetima i brzinama prijenosa podataka, odnosno za razvoj nove mobilne telekomunikacijske mreže, 4G. [12]

3.1.4. Počeci razvoja četvrte generacije mobilnih mreža (4G)

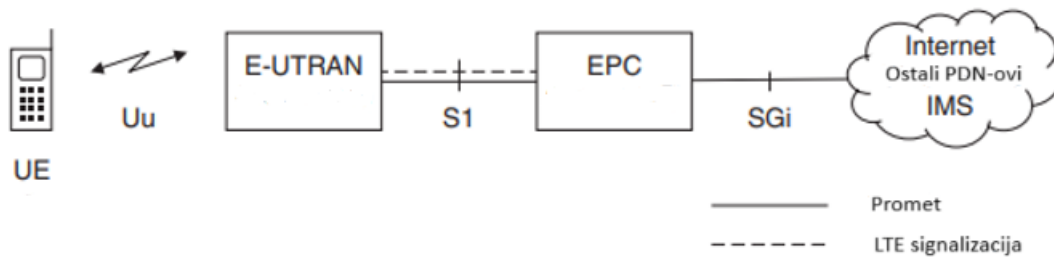
Prvobitno osmišljen od strane Agencije za napredne obrambene istraživačke projekte SAD-a (engl. *Defense Advanced Research Projects Agency*, DARPA), 4G tehnologija je bila način da se otklone slabosti 2G i 3G mobilnih telekomunikacijskih mreža. Da bi se određena mobilna mreža mogla nazvati mrežom četvrte generacije moraju se ispuniti određeni uvjeti i specifikacije. Neki od tih uvjeta odnosi se na spektralnu efikasnost ćelije, vršnu spektralnu efikasnost, frekvencijski pojas, kašnjenje, mobilnost i druge karakteristike koje određuju specifične vrijednosti po kojima se može reći da određena mobilna mreža upravo četvrte generacije, [16]. Početni naponi razvoja kulminirali su pokretanjem prve komercijalne mobilne mreže zasnovane na LTE (engl. *Long Term Evolution*) standardu 2009. godine u Oslu i Stockholmu, [17]. LTE standard za mobilne mreže je standard koji ne zadovoljava u potpunosti prethodno navedene zahtjeve koje trebaju ispunjavati 4G mobilne mreže, no u kasnijim poboljšanjima te nastankom LTE-Advanced tehnologije, ti zahtjevi su ispunjeni.

Navedeni LTE standard je standard na kojemu se temelji 4G tehnologija. Razvijen je od strane više standardizacijskih organizacija udruženih u 3GPP (engl. *3rd Generation Partnership Project*), [17].

3.2. Arhitektura LTE mreže

Arhitektura LTE-a obuhvaća tri dijela: mobilni uređaji (UE, engl. *User Equipment*), radijsku pristupnu mrežu (E-UTRAN, engl. *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) i mrežnu jezgru (EPC, engl. *Evolved Packet Core*). Jezgrena mreža komunicira sa PDN-om (engl.

Packet Data Network) kao što je naprimjer Internet. Veza između navedenih komponenti se može vidjeti na slici 3.3. [17]



Slika 3.3. Osnovni dijagram LTE arhitekture s pripadnim temeljnim komponentama [17]

3.2.1. Korisnički uređaj (UE)

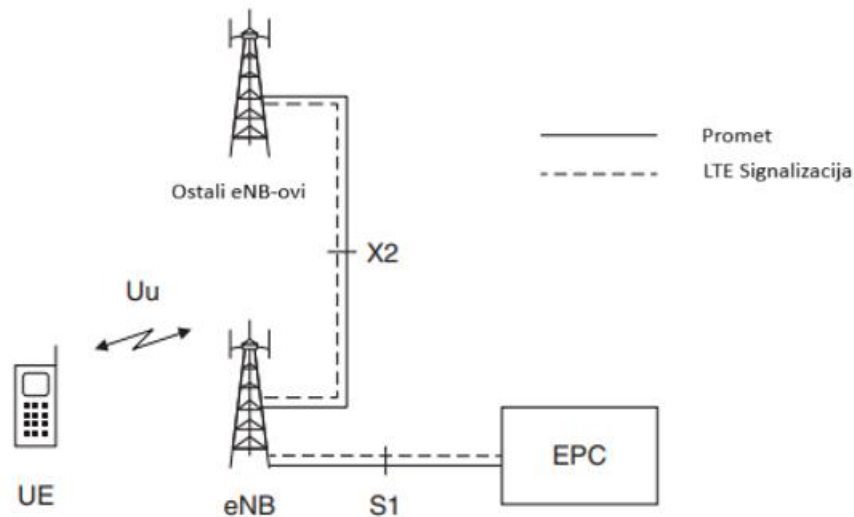
Unutarnja struktura mobilnog uređaja za LTE je ista kao i kod mobilnog uređaja u UMTS-u (engl. *Universal Mobile Telecommunications System*) ili GSM-u (engl. *Global System for Mobile Communications*). Glavni dijelovi mobilnog uređaja su:

1. MT (engl. *Mobile Termination*) održava sve komunikacijske funkcije.
2. TE (engl. *Terminal Equipment*) koristi se kao krajnja točka za transmisiju podataka.
3. USIM kartica (engl. *Universal Subscriber Identity Module*) za LTE uređaj, još se zove i UICC (engl. *Universal Integrated Circuit Card*). [17]

3.2.2. Radijska pristupna mreža (E-UTRAN)

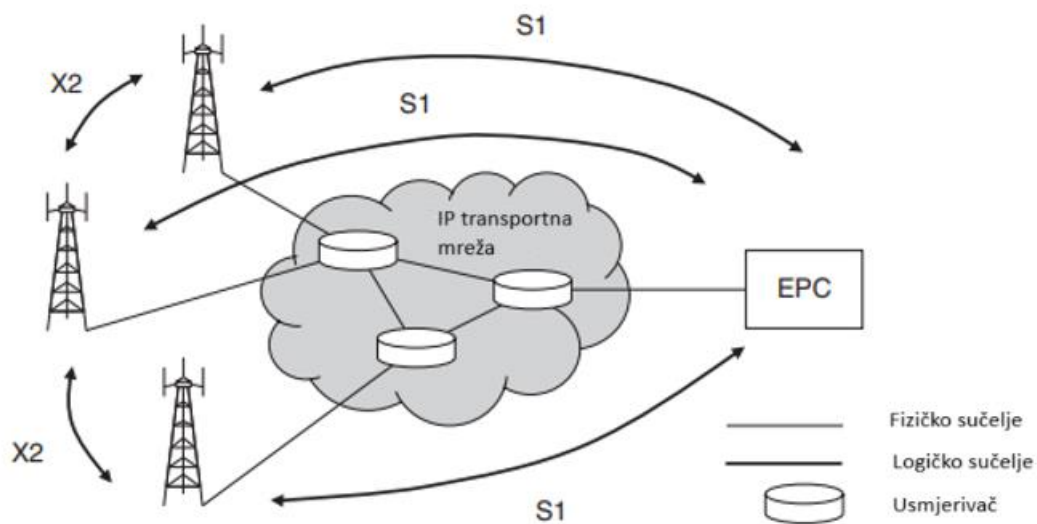
E-UTRAN je radijska pristupna mreža koja se koristi kao posrednik između mobilnog uređaja i EPC-a. E-UTRAN pristupna mreža ima više baznih postaja, eNB-a (engl. *eNodeB*), koje su zapravo mjesta na kojima mobilni uređaj pristupa LTE mreži, odnosno EPC-u. Drugim riječima, eNB pruža radijsko sučelje mobilnom uređaju. Bazna postaja eNB može slati i primiti radio signal do i od svih mobilnih uređaja u području koje pokriva. Promet signala kojim se to ostvaruje se može pokazati slikom 3.4. gdje se mogu primijetiti dva komunikacijska sučelja S1 i X2. S1 je sučelje između EPC-a i eNB-a, a X2 je sučelje između dva eNB-a, koje se koristi pri predaji veze drugoj eNB, odnosno *handoveru*. X2 sučelje je opcionalno na dva načina. Naime, samo obližnje bazne postaje trebaju imati zajedničku komunikaciju i sučelje jer one mogu sudjelovati u predaji veze, dok udaljene bazne postaje ne moraju biti na taj način spojene. U drugom slučaju, najbitnije

komunikacije X2 sučelja se mogu prenijeti kroz EPC koristeći dvije instance S1 sučelja. Kombinacija radijskog nositelja signala i S1 nositelja sučelja se zove E-RAB (engl. *Evolved Radio Access Bearer*). [17]



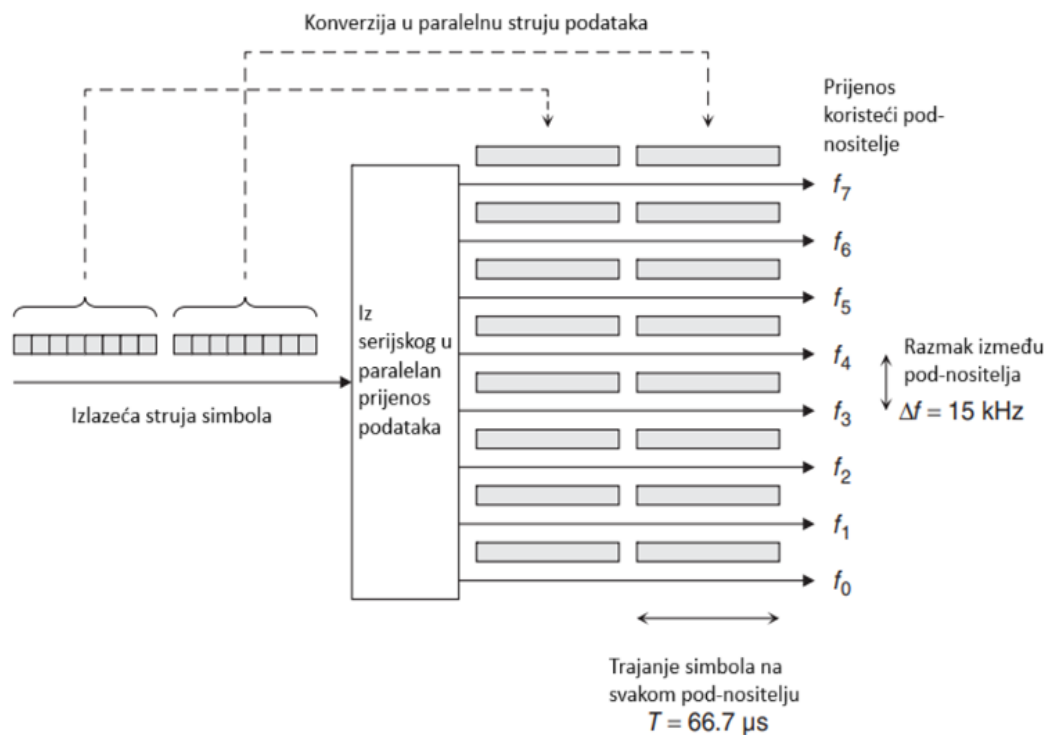
Slika 3.4. Položaj i sastav E-UTRAN-a unutar LTE arhitekture [17]

Ono što treba naglasiti jest da S1 i X2 nisu fizička sučelja već logička. To znači da se podatci šalju kroz IP transportnu mrežu na način kako je pokazano na slici 3.5.



Slika 3.5. Unutarnja struktura E-UTRAN prijenosne mreže [17]

Za prijenos informacija od bazne postaje prema mobilnom uređaju (silaznu vezu) E-UTRAN koristi OFDM (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) modulaciju i OFDMA (eng. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) pristupnu tehniku. OFDM predajnik uzima niz bitova informacija koju je potrebno prenijeti i pretvara ih u N paralelnih nizova koji moduliraju N tzv. podnositelja na različitim frekvencijama, kako je prikazano na slici 3.6. Ovisno o modulaciji, 2, 4 ili 6 bitova moduliraju jedan podnositelj, što čini jedan OFDM simbol. U LTE-u podnositelji su međusobno razmaknuti 15 kHz, a trajanje simbola na svakom podnositelju je 66,7 μ s. LTE koristi QPSK, 16QAM i 64QAM modulacije, a maksimalna širina kanala za OFDM signal može biti 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ili 20 MHz, a definira se za svaku baznu postaju (eNB).

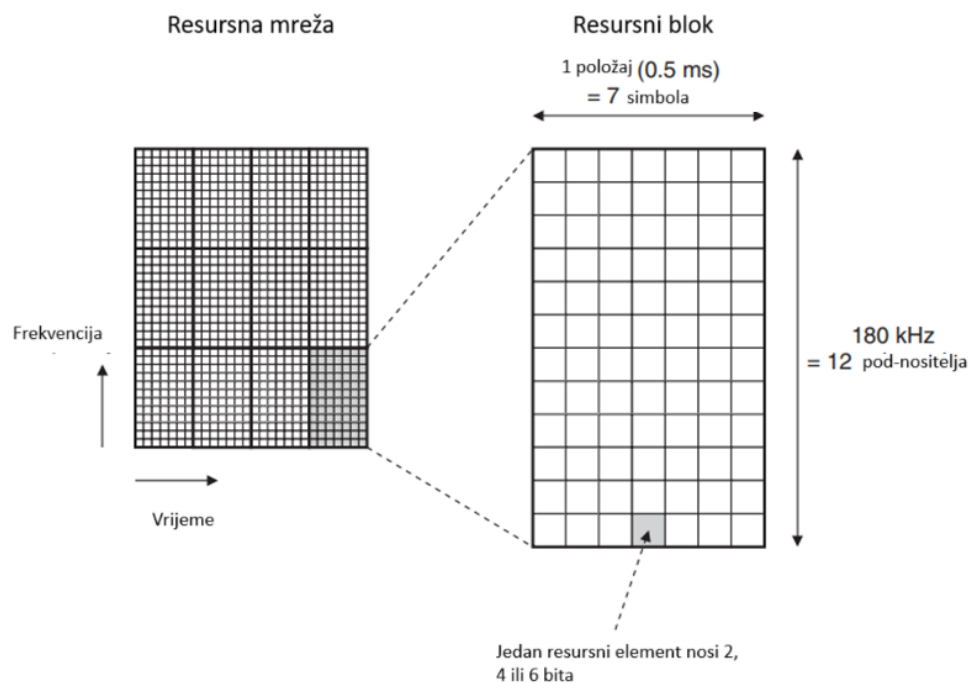


Slika 3.6. Rastavljanje niza simbola na pod-nositelje [17]

U LTE-u se korisnicima dodjeljuje određeni broj tzv. resursnih blokova, pri čemu se svaki blok sastoji od 12 podnositelja (ukupno 180 kHz širine pojasa) i 7 simbola (ukupnog trajanja 0,5 ms), odnosno 84 resursna elementa. Ta raspodjela se može vidjeti na slici 3.7. Broj resursnih blokova dodijeljenih nekom korisniku u nekom trenutku ovisi o opterećenosti mreže i broju resursnih blokova kojima mreža raspolaže u toj ćeliji (ovisi o širini kanala koji je određen za tu ćeliju), pri čemu ti blokovi nisu nužno jedan do drugog u spektru već se dodjeljuju resursni blokovi

na frekvencijama na kojima dani korisnik ima najbolji radijski kanal. Raspodjela i dodjela resursnih blokova se provodi svakih 1 ms tako da se ostvari prilagodba na promjenu mrežnih uvjeta (kao što su promjena opterećenja mreže i/ili promjena kvalitete radijskog kanala mobilnog korisnika).

Za uzlaznu vezu LTE koristi SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*), pristupnu tehniku koja se zasniva na OFDM s tim da se nakon OFDM modulacije na signal primjenjuje diskretna Fourierova transformacija (DFT) čime se postiže smanjenje omjera vršne i prosječne snage u odnosu na OFDM signal. Time se smanjuje i potrošnja energije, što je za uzlaznu vezu posebno važno jer mobilni uređaj najviše troši energije na odašiljanje.

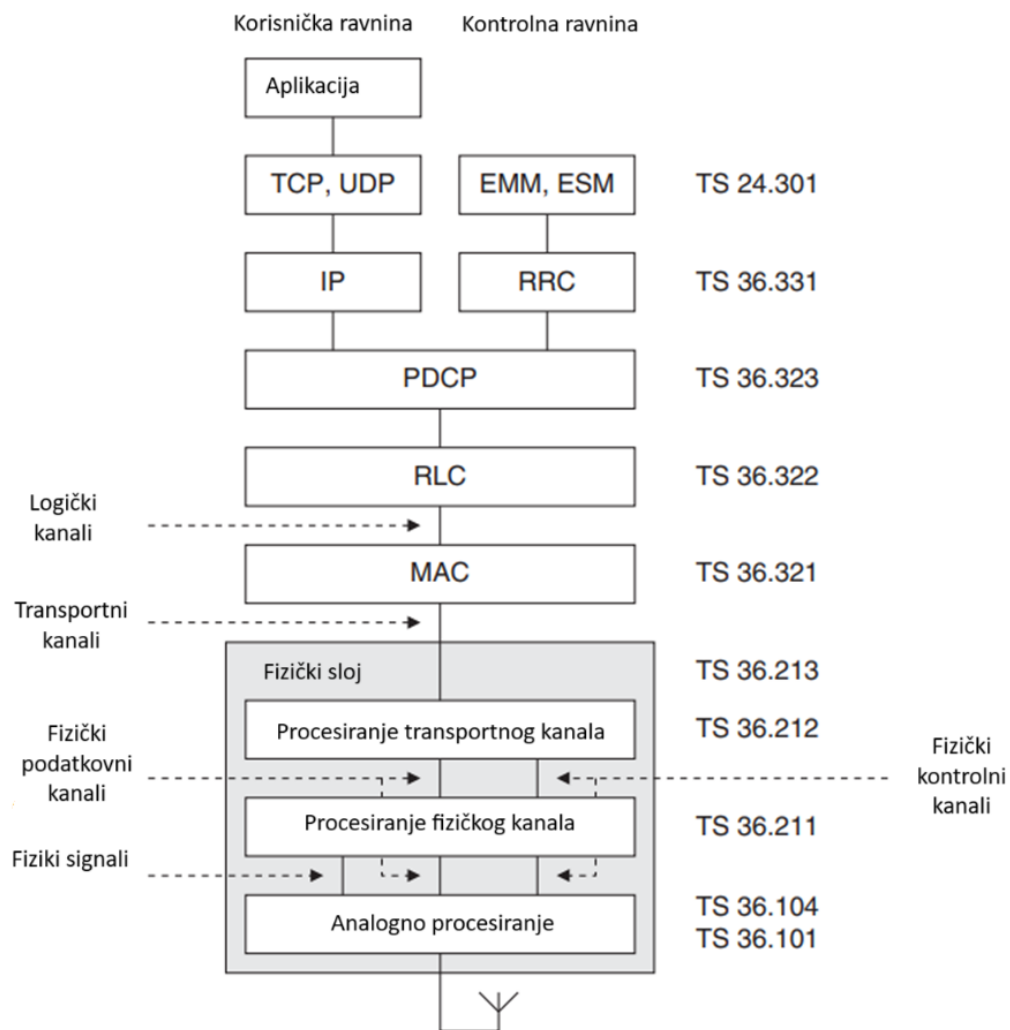


Slika 3.7. Resursni elementi i blokovi [17]

Kako bi se što uspješnije prenosili resursni blokovi uvedena je nova tehnologija poznata kao MIMO (engl. *Multiple-Input Multiple-Output*). MIMO je tehnologija koja koristi više antena koje prenose i primaju signal kako bi se moglo prenositi više podataka u isto vrijeme. Svi bežični uređaji koji podržavaju IEEE standard 802.11n mogu podržavati MIMO tehnologiju. Kako bi se MIMO optimalno mogao koristiti u pogledu performansi i dosega, moraju ga podržavati i mobilni uređaj i pristupna točka (bazna postaja). [18]

Za ostvarenje sigurnog i pouzdanog prijenosa informacije između UE i eNB, zračno sučelje koristi niz protokola, kako je prikazano slikom 3.8. Za protok informacije između različitih

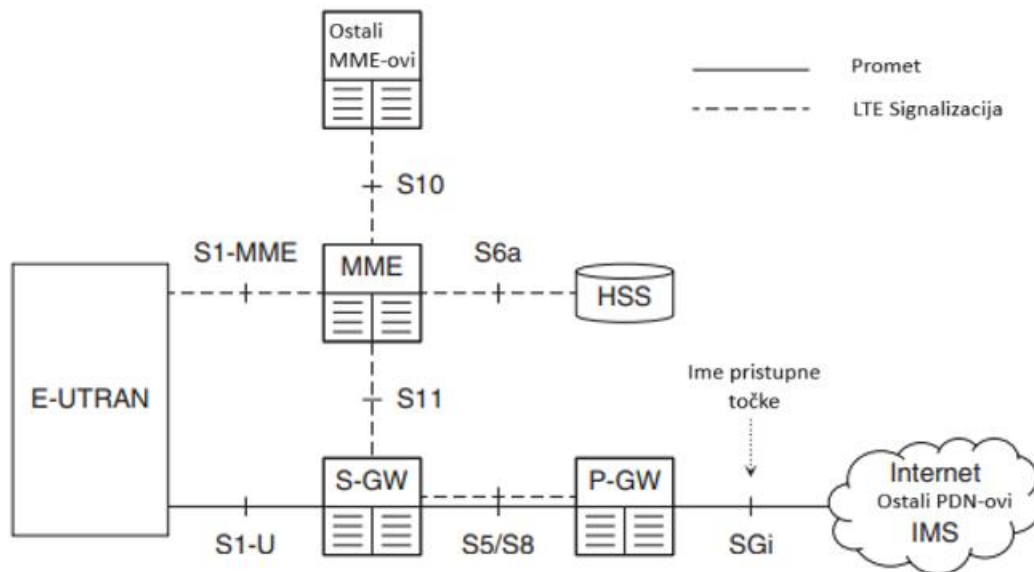
protokola koriste se kanali, i to logički, prijenosni (transportni) i fizički. Podatci i signalne poruke se prenose na logičkim kanalima između RLC (engl. *Radio Link Control*) i MAC protokola (engl. *Medium Access Control*), transportni kanali između MAC-a i fizičkog sloja, fizički podatkovni kanali između različitih razina fizičkog sloja. RLC protokol održava podatkovnu vezu između dva uređaja, a MAC protokol odrađuje kontrolu fizičkog sloja niske razine. Pripadni logički kanali mogu biti: DTCH (engl. *Dedicated Traffic Channel*), DCCH (engl. *Dedicated Control Channel*), CCCH (engl. *Common Control Channel*), PCCH (engl. *Paging Control Channel*), BCCH (engl. *Broadcast Control Channel*), MCCH (engl. *Multicast Control Channel*) i MTCH (engl. *Multicast Traffic Channel*). Nadalje, transportni kanali koji se koriste su: UL-SCH (engl. *Uplink Shared Channel*), RACH (engl. *Random Access Channel*), DL-SCH (engl. *Downlink Shared Channel*), PCH (engl. *Paging Channel*), BCH (engl. *Broadcast Channel*) i MCH (engl. *Multicast Channel*). Fizički podatkovni kanali su: PUSCH (engl. *Physical Uplink Shared Channel*), PRACH (engl. *Physical Random Access Channel*), PDSCH (engl. *Physical Downlink Shared Channel*), PBCH (engl. *Physical Broadcast Channel*) i PMCH (engl. *Physical Multicast Channel*). [17]



Slika 3.8. Arhitektura protokolnog stoga zračnog sučelja [17]

3.2.3. Jezgrena mreža (EPC)

Pojednostavljena arhitektura EPC-a se može vidjeti na slici 3.9. i na njoj su prikazane glavne komponente, dok su neke izostavljene radi jednostavnosti prikaza.



Slika 3.9. Pojednostavljeni prikaz EPC unutarnje arhitekture s pripadnim komponentama [17]

Na slici 3.9. PDN se odnosi na neku paketnu mrežu kao naprimjer Internet. S druge strane, pristupni eNB se odnosi na radijsku pristupnu mrežu (E-UTRAN). Jasnije naglašena veza između EPC-a i E-UTRAN-a se može vidjeti na slikama 3.3. i 3.4.. Unutarnje komponente EPC-a koje su prikazane na slici 3.9. su PGW (engl. *PDN Gateway*), SGW (engl. *Serving Gateway*), MME (engl. *Mobility Management Entity*) i HSS (engl. *Home Subscriber Server*).

MME je komponenta koja kontrolira operacije visoke razine mobilnog uređaja tako što mu šalje signalne poruke o sigurnosti i upravljanu podatkovnim strujanjima. PGW je čvorište koje povezuje LTE mrežu i PDN, a SGW preusmjerava korisničke podatke između eNB i PGW-a. SGW također služi kao točka po kojoj će se pratiti korisnički podatci mobilnog uređaja dok se taj isti mobilni uređaj kreće između različitih eNB-ova. To se radi kako bi se smanjili utjecaji na korisničke podatke pri kretanju mobilnog uređaja. I konačno, HSS je komponenta koja služi za skladištenje pretplatničkih informacija korisnika u mreži.

EPC u sebi sadrži još neke komponente koje nisu prikazane na slici 3.9., a to su CBC (engl. *Cell Broadcast Center*), CBS (engl. *Cell Broadcast Service*), ETWS (engl. *Earthquake and Tsunami Warning System*) i EIR (engl. *Equipment Identity Register*). [17]

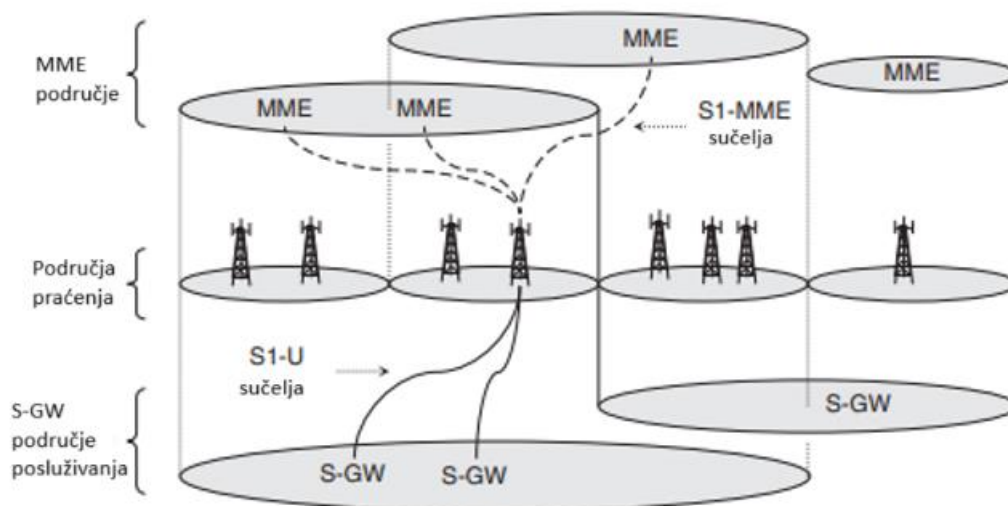
Uspoređujući s UMTS-om i GSM-om može se vidjeti da PGW ima istu ulogu kao i GGSN (engl. *Gateway GPRS Support Node*), dok s druge strane SGW i MME imaju slične funkcije rukovanja podatkovnim usmjeravanjem i signaliziranjem kao i SGSN (engl. *Serving GPRS*

Support Node). Razdvajanjem SGSN funkcionalnosti na dva dijela olakšava operateru skaliranje mreže pri povećanju prometa i broja mobilnih uređaja.

3.2.3.1. Mrežna područja

Pri analiziranju EPC-a i prijenosa veze važno je napomenuti i geografska mrežna područja koja su vezana uz pojedine EPC elemente. Jedno od takvih područja je MME područje (engl. *MME pool area*). To je područje kroz koje se mobilni uređaj može kretati bez da mijenja pripadajući MME koji ga opslužuje. Svako takvo područje može biti kontrolirano s jednim ili više MME-ova, dok je svaka bazna stanica spojena s svim MME-ovima koja se nalazi u pripadnom MME području putem S1-MME sučelja. Treba imati na umu da se MME područja mogu preklapati, što može biti namjerno dizajnirano zbog nošenja s povećanim prometom u gušće naseljenim sredinama.

Na sličan način djeluje i SGW područje posluživanja (engl. *SGW service area*) koje je zapravo područje posluživano od strane jednog ili više SGW-a. Kroz takvo područje mobilni uređaj može prolaziti bez da mijenja pripadajući SGW. Svaka bazna stanica je povezana s svim SGW-ovima u pripadnom području putem S1-U sučelja. MME područje i SGW područje posluživanja ne moraju se nužno preklapati te zajedno se mogu rastaviti na manje dijelove koji se ne preklapaju. Ti dijelovi se zovu područja praćenja (engl. *Tracking areas*) i koriste se za praćenje lokacije mobilnih uređaja i slična su lokacijskim i usmjerivačkim područjima iz UMTS-a i GSM-a. Prikaz navedenih područja se može vidjeti na slici 3.10. [17]



Slika 3.10. Prikaz veze između MME područja i SGW područja posluživanja [17]

3.3. Ključni pokazatelji uspješnosti

Kako bi se postavila i nadzirala 4G mreža te osigurala njena željena kvaliteta, potrebno je očitavati, mjeriti i katkad mijenjati pripadne ključne parametre uspješnosti (KPI, engl. *Key Performance Indicators*). Postoji više kategorija KPI-a, a u ovom dijelu diplomskog rada opisane su one KPI kategorije koje su usko vezane uz E-UTRAN i EPC dio 4G LTE mobilne mreže. Bit će spomenuti i neki drugi KPI-i koji se često koriste u mjerenjima i ocjenjivanjima kvalitete i jakosti signala i mreže.

3.3.1. KPI vezani za EPC

KPI-ovi koji se odnose na EPC dio LTE arhitekture 4G mreže se mogu podijeliti 3 skupine, a to su KPI-ovi pristupačnosti, mobilnosti i iskorištenosti, [19].

3.3.1.1. *EPS attach success rate*

Navedeni KPI se odnosi na EPS (engl. *Evolved Packet System*) te ukazuje na razinu uspješnosti spajanja na EPS. To je KPI koji spada u kategoriju opisa pristupačnosti sustava EPC-a te on opisuje omjer broja uspješno izvedenih spajanja EPS procedura i broja isprobanih spajanja EPS procedura za određenu EPC mrežu. Na taj način se ispituje pristupačnost osigurana EPS-om te se ispituju mrežne performanse.

3.3.1.2. *Dedicated EPS bearer creation success rate*

Ovo je KPI kojim se opisuje pristupačnost EPC dijela 4G LTE arhitekture. KPI pobliže opisuje omjer broja uspješno izvedenih procedura stvaranja namjenskog EPS nositelja od strane PGW-a i broja pokušaja ostvarivanja tih procedura. Koristi se kako bi se procijenila pristupačnost usluge koja je osigurana od strane EPS-a.

3.3.1.3. *Dedicated bearer set-up time by MME*

Ovo je KPI kojim se opisuje pristupačnost EPC dijela 4G LTE arhitekture. KPI odgovara srednjem vremenu postavljanja namjenskog nositelja od strane MME-a.

3.3.1.4. *Service request success rate*

Ovaj KPI se koristi za opisivanje razine uspješnosti zahtjeva za određenom uslugom unutar EPC dijela 4G LTE arhitekture te se njime procjenjuje pristupačnost EPS-a i mreže. Pomoću tog

KPI-a opisuje se omjer broja uspješno izvedenih zahtjeva za uslugom od strane korisničkog mobilnog uređaja i broja pokušaja izvođenja zahtjeva za uslugom.

3.3.1.5. Inter-RAT outgoing handover success rate (EPS -> GSM)

Ovaj KPI opisuje omjer broja uspješno izvedenih procedura odlazeće predaje poziva (engl. *Handover*) i broja pokušaja izvođenja ovih procedura kako bi se procijenila performansa procedura odlazeće predaje poziva između RAT-ova (engl. *Radio Access Technology*). To se odnosi na predaju poziva između EPS (LTE) i GSM-a. Ovaj KPI služi za ocjenu performanse mobilnosti danog EPC-a.

3.3.1.6. Inter-RAT outgoing handover success rate (EPS -> UMTS)

Ovaj KPI opisuje omjer broja uspješno izvedenih procedura odlazećih predaja i broja pokušaja izvođenja procedura odlazeće predaje između EPS-a i UMTS-a. Ovaj KPI služi za ocjenu performanse mobilnosti danog EPC-a.

3.3.1.7. Inter-RAT outgoing handover success rate (EPS -> CDMA2000)

Ovaj KPI opisuje omjer broja uspješno izvedenih procedura odlazeće predaje i broja pokušaja izvođenja procedura odlazeće predaje između EPS-a i CDMA2000. CDMA2000 (engl. *Code-Division Multiple Access*) je skup 3G standarda mobilne tehnologije koji se koriste za transmisiju podataka, govora i signalizacijskih podataka između mobilnih uređaja i ćelija. [17]

3.3.1.8. Inter-RAT incoming handover success rate (GSM -> EPS)

Ovaj KPI opisuje omjer broja uspješno izvedenih procedura dolazeće predaje poziva i broja pokušaja izvođenja ovih procedura između GSM-a i EPS-a. Svrha ovog KPI-a je ocjena performansi mobilnosti vezane za EPC.

3.3.1.9. Inter-RAT incoming handover success rate (UMTS -> EPS)

Ovaj KPI opisuje omjer uspješno izvedenih procedura dolazeće predaje poziva i broja pokušaja izvođenja ovih procedura između UMTS-a i EPS-a. I ovaj KPI daje ocjenu performansi mobilnosti vezane za EPC.

3.3.1.10. Inter-RAT incoming handover success rate (CDMA2000 -> EPS)

Ovaj KPI opisuje omjer broja uspješno izvedenih procedura dolazeće predaje poziva i broja pokušaja izvođenja ovih procedura između CDMA2000 i EPS-a. I ovaj KPI daje ocjenu performansi mobilnosti vezane za EPC.

3.3.1.11. Tracking area update success rate

Navedeni KPI pobliže opisuje svojstvo mobilnosti EPC-a na način da stavlja u omjer broj uspješno izvedenih procedura za ažuriranje područja praćenja i broj pokušaja izvođenja procedura za ažuriranje područja praćenja.

3.3.1.12. Mean active dedicated EPS bearer utilization

Ovaj KPI koristi se za ocjenu parametra iskoristivosti EPC-a na način da računa omjer srednjeg broja aktivnih EPS namjenskih nositelja i maksimalnog broja aktivnih namjenskih EPS nositelja. [19]

3.3.2. KPI vezani za E-UTRAN

KPI vezani za E-UTRAN pokrivaju razna područja od interesa za mjerenje i ocjenjivanje 4G LTE mreže, odnosno njenog E-UTRAN dijela. Neke od tih kategorija vezanih za specifična svojstva koja se žele testirati su pristupačnost, zadrživost (engl. *Retainability*), integritet, dostupnost, mobilnost i energetska efikasnost, [20].

3.3.2.1. E-RAB pristupačnost

E-RAB pristupačnost (engl. *E-UTRAN Radio Access Bearer Accessibility*) je KPI koji ukazuje na vjerojatnost da se korisniku osigura E-RAB kada se to od mreže zatraži. E-RAB je radijski pristupni nositelj koji se koristi u E-UTRAN-u za pristup istome. E-RAB pristupačnost računa se na način da se napravi omjer uspješnih i ukupnih pokušaja dobivanja E-RAB-a.

3.3.2.2. E-RAB zadrživost

E-RAB zadrživost (engl. *E-UTRAN Radio Access Bearer Retainability*) je KPI koji ukazuje koliko često krajnji korisnik neočekivano izgubi E-RAB dok se koristi njime.

3.3.2.3. E-UTRAN IP propusnost

E-UTRAN IP propusnost je KPI kojim se opisuje kakav utjecaj E-UTRAN ima na kvalitetu usluge koju dobiva krajnji korisnik. Računa se tako što se pronađe količina podataka koja se prenosi na IP razini po utrošenom vremenu za navedeni prijenos.

3.3.2.4. E-UTRAN IP kašnjenje

E-UTRAN IP kašnjenje je izmjerena vrijednost kojom se opisuje kako E-UTRAN utječe na kašnjenje koje se manifestira na uređaju krajnjeg korisnika.

3.3.2.5. E-UTRAN dostupnost ćelije

E-UTRAN dostupnost ćelije je KPI kojim se ukazuje na dostupnost E-UTRAN ćelije te se računa na način da se pronađe postotak vremena kada je određena ćelija dostupna. Odnosno, računa se na način da se nađe omjer vremena kada je ćelija dostupna i ukupnog vremena mjerenja.

3.3.2.6. E-UTRAN mobilnost

E-UTRAN mobilnost kao što samo ime kaže je KPI koji služi za određivanje i ocjenjivanje rada funkcionalnosti E-UTRAN mobilnosti. Pripadna izmjerena vrijednost će sadržavati i pripremu i fazu izvršavanja prijenosa veze. Priprema prijenosa veze je definirana kao točka u vremenu kada početni eNB pokuša pripremiti potrebne resurse za mobilni uređaj u susjednoj ćeliji. S druge strane, uspjeh faze izvršavanja je točka u vremenu kada početni eNB prima informaciju da je mobilni uređaj uspješno spojen na ciljanu ćeliju.

3.3.2.7. E-UTRAN podatkovna i energetska efikasnost

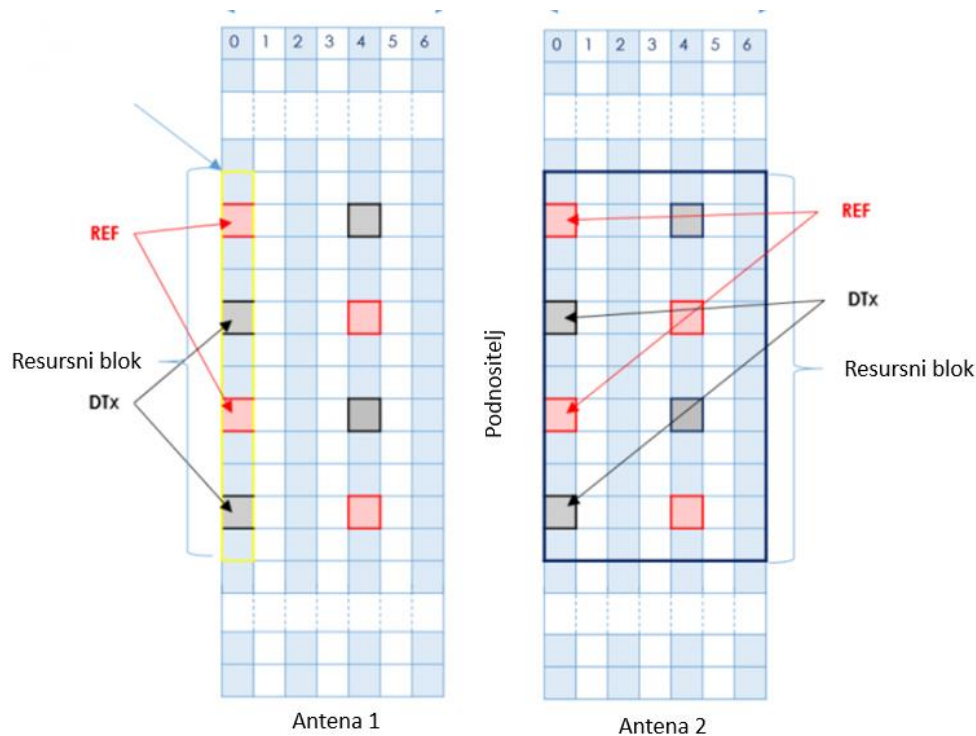
E-UTRAN podatkovna i energetska efikasnost je KPI koji opisuje energetska efikasnost prijenosa podataka u E-UTRAN-u koji se koristi. Dobiva se na način da se izračuna omjer količine podataka (DV, engl. *Data Volume*) i energetske potrošnje (EC, engl. *Energy Consumption*) promatranog mrežnog elementa. [20]

3.3.3. Dodatni KPI-ovi za E-UTRAN

Dodatni ključni pokazatelji uspješnosti koji se najčešće koriste za određivanje jakosti i kvalitete signala mobilne mreže su RSRP (engl. *Reference Signal Received Power*), SINR (engl. *Signal to Interference and Noise Ratio*), RSSI (engl. *Received Signal Strength Indicator*), RSRQ (engl. *Reference Signal Received Quality*). Također koriste se pokazatelji uspješnosti za tri tipa propusnosti, a to su: RLC DL propusnost (engl. *Radio Link Control Downlink Throughput*), PDCP DL propusnost (engl. *Packet data convergence protocol*) i PDSCH Phy propusnost (engl. *Physical downlink shared channel*).

3.3.3.1. RSSI

RSSI je vrijednost koja označava jakost signala primljenog na antenama uređaja, iskazana u dBm. Predstavlja ukupnu srednju snagu izmjerenu samo na onim OFDM simbolima koji prenose referentne signale za antenski ulaz 0 (to znači simboli 0 i 4) što se može vidjeti na slici 3.11. U modernim mrežama RSSI vrijednost ne ukazuje toliko na kvalitetu signala zato što uzima u obzir ne samo korisni dio signala, već i sekundarni signal koji nije koristan, a koji se nalazi u istom frekvencijskom pojasu. To znači da RSSI uzima u obzir signale poslužujuće ćelije (bazne postaje), signale susjednih baznih postaja, vanjsku interferenciju i šum. Zbog tih razloga RSSI indikator je najjednostavniji, ali i najmanje koristan pokazatelj, te može dati samo grubu procjenu kvalitete signala. Stoga RSSI nije jedan od najbitnijih pokazatelja uspješnosti 4G mobilne mreže, ali ga je bitno spomenuti zbog njegove jednostavnosti i zbog činjenice da se koristi za računanje nekih drugih pokazatelja uspješnosti 4G mobilne mreže, [4].



Slika 3.11. Prikaz pozicije OFDM simbola referentnog signala unutar resursnih blokova u vremenskoj domeni [21]

Kao što se može vidjeti u tablici 3.1., što je veći RSSI, to je jači signal, a i kvaliteta bi trebala biti dobra kada bi se mjerio samo koristan primarni signal bez šuma i interferencije.

Tablica 3.1. Ocjenjivanje jakosti signala u 4G mreži pomoću RSSI indikatora [4]

Ocjena kvalitete RSSI-a	RSSI – vrijednosti za 4G/LTE
Odlično	Iznad -79 dBm
Dobro	Od -80 dBm do -89 dBm
Na granici	Od -90 dBm do -100 dBm
Slabo	Manje od -100 dBm

3.3.3.2. RSRP

RSRP indikator je definiran u LTE specifikacijama i njime se procjenjuje snaga korisnog signala koja dolazi od trenutne bazne postaje, bez šuma i interferencije. Uvijek je manje vrijednosti od RSSI parametra zato što ne uključuje interferenciju koja može pojačati signal, ali je baš zato i korisniji od RSSI parametra. Drugim riječima, RSRP je definiran kao linearni prosjek doprinosa snage resursnog elementa koji nosi referentne signale za specifičnu ćeliju unutar mjerenog frekvencijskog pojasa. Mjeri ga UE (engl. *User Equipment*) i šalje ga baznoj postaji, te služi za odabir ćelije i pri *handoveru*. Može se mjeriti uskopojasno i širokopojasno. Ako je uskopojasno, uzimaju se u obzir 6 resursnih blokova, a za širokopojasno uzima se u obzir cijeli frekvencijski pojas. [21] Potrebna je minimalna SINR vrijednost od -20 dB kako bi se mogao RSRP detektirati. Raspon RSRP-a je definiran od -140 dBm do -44 dBm, [22]. U tablici 3.2. se može vidjeti raspon vrijednosti RSRP parametra te pripadno ocjenjivanje na temelju tih vrijednosti.

Tablica 3.2. RSRP ocjena i opis na temelju pripadnih vrijednosti za signal 4G mobilne mreže [4]

Ocjena kvalitete RSRP-a	RSRP - vrijednosti za 4G/LTE
Odlično	Iznad ili jednako -80 dBm
Dobro	Od -80 dBm do -90 dBm
Na granici	Od -90 dBm do -100 dBm
Slabo	Ispod 100 dBm

3.3.3.3. SINR

SINR indikator se koristi u 4G mrežama kao omjer korisnog signala te šuma i interferencije. Vrijednosti tog indikatora je skoro uvijek pozitivna, a kada je negativna obično 4G mobilna mreža ne radi na pripadnoj lokaciji. SINR vrijednost je zapravo definirana kao linearni prosjek doprinosa snage resursnog elementa koji nosi referentne signale koji su specifični za pojedinu ćeliju. Ti doprinosi snage se dijele s linearni prosjecima doprinosa snage šuma i interferencije za svaki resursni element u referentnom signalu specifične ćelije za isti frekvencijski pojas.[21] U tablici 3.3. mogu se vidjeti SINR vrijednosti za 4G mobilnu mrežu te pripadno ocjenjivanje na temelju tih vrijednosti.

Tablica 3.3. SINR ocjena i opis na temelju pripadnih vrijednosti za signal 4G mobilne mreže [4]

Ocjena kvalitete SINR-a	SINR - vrijednosti za 4G/LTE
Odlično	Iznad 20 dB
Dobro	Od 13 dB do 20 dB
Na granici	Od 0 dB do 13 dB
Slabo	Ispod 0 dB

3.3.3.4. RSRQ

RSRQ je parametar kojim se ocjenjuje kvaliteta 4G signala te se može dobiti formulom (3-1), gdje je N broj resursnih blokova po kojima se RSSI mjeri. Za njegovo računanje koriste se vrijednosti RSRP i RSSI parametara izmjerenih na istim resursnim blokovima. RSRQ vrijednosti se koriste radi pružanja dodatnih informacija kada RSRP vrijednost nije dovoljna da se napravi dobra odluka pri predaji poziva ili promjeni ćelije. Uz RSRP to je također jedan od parametara koji UE šalje baznoj postaji. U tablici 3.4. mogu se vidjeti RSRQ vrijednosti za 4G mobilnu mrežu te pripadno ocjenjivanje na temelju tih vrijednosti.

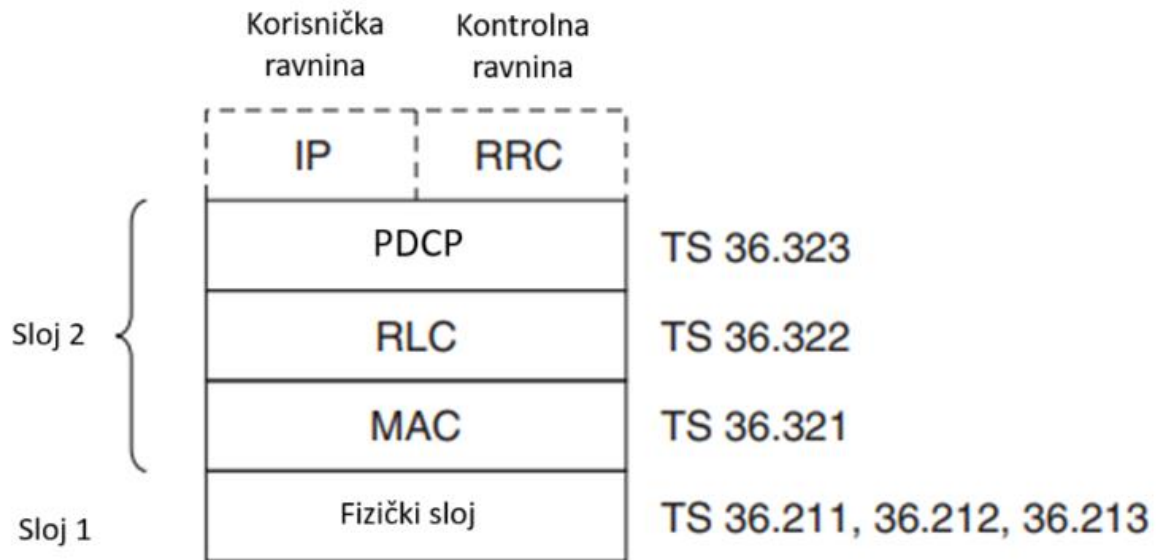
$$RSRQ = N * \frac{RSRP}{RSSI} \quad (3-1)$$

Tablica 3.4. RSRQ ocjena i opis na temelju pripadnih vrijednosti za signal 4G mobilne mreže [4]

Ocjena kvalitete RSRQ-a	RSRQ - vrijednosti za 4G/LTE
Odlično	Iznad -10 dB
Dobro	Od -10 dB do -15 dB
Na granici	Od -15 dB do -20 dB
Slabo	Ispod -20 dB

3.3.3.5. Propusnosti

RLC DL propusnost je veličina koja označava količinu podataka koju mobilna mreža može prenijeti u određenoj jedinici vremena u silaznoj vezi. U ovom radu ta veličina će biti izražena u kbit/s. Prema specifikacijama LTE sustav treba omogućiti minimalnu brzinu prijenosa od 100 Mbit/s u silaznoj vezi i 50 Mbit/s u uzlaznoj vezi. U LTE Advanced sustavima vršne brzine podatkovnog prometa su 300 Mbit/s za silaznu vezu i 75 Mbit/s za uzlaznu, [17]. Također je bitno spomenuti PDSCH Phy propusnost i PDCP DL propusnost. PDSCH je jedini fizički kanal koji može prilagoditi svoju modulaciju kao odgovor na promjene pripadnog SINR-a. S druge strane PDCP se odnosi na protokol koji može nositi transportne funkcije više razine koje su vezane za kompresiju i sigurnost zaglavlja. Razlika u propusnostima između navedenih kanala i protokola se može vidjeti na slici 3.12. Na toj slici se može primijetiti da je PDCP protokol najviše razine, zbog čega je PDCP propusnost niža od RLC i fizičke razine. To se može shvatiti na način da PDCP koristi najviše zaglavlja, što povećava podatkovni promet i smanjuje propusnost.

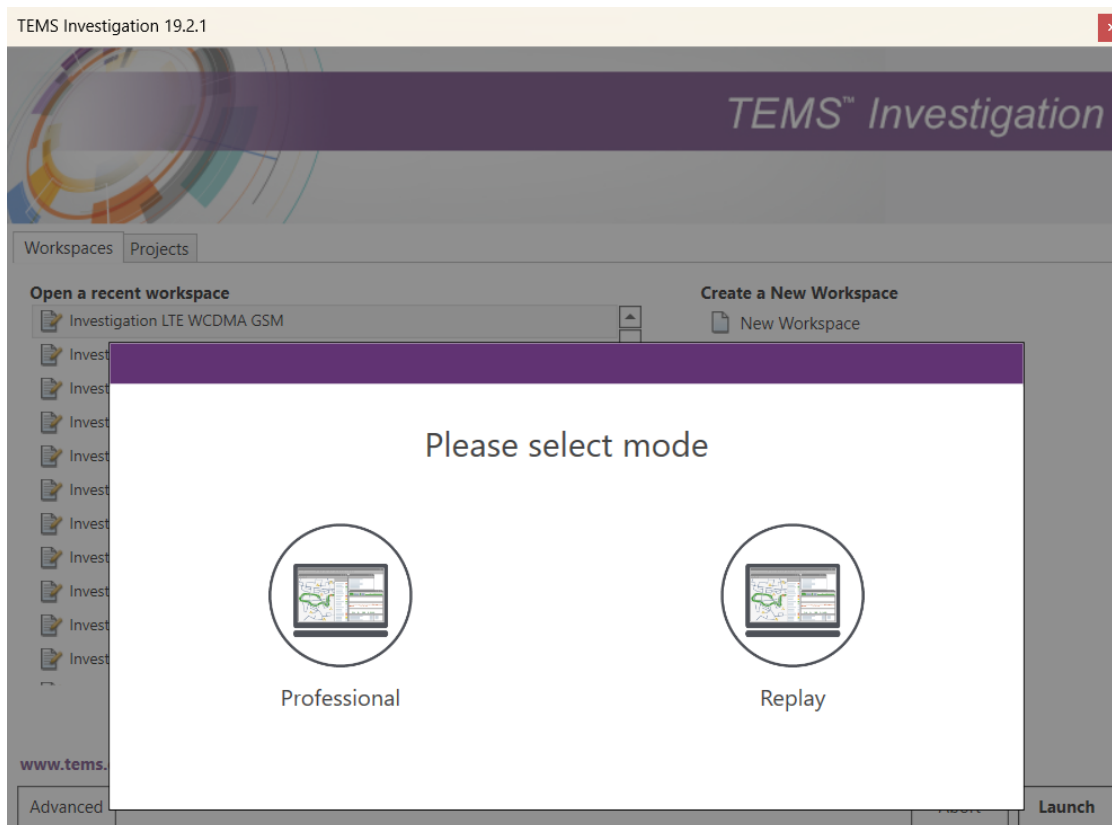


Slika 3.12. Odnosi navedenih tipova propusnosti RLC, PDCP i PDSCH [17]

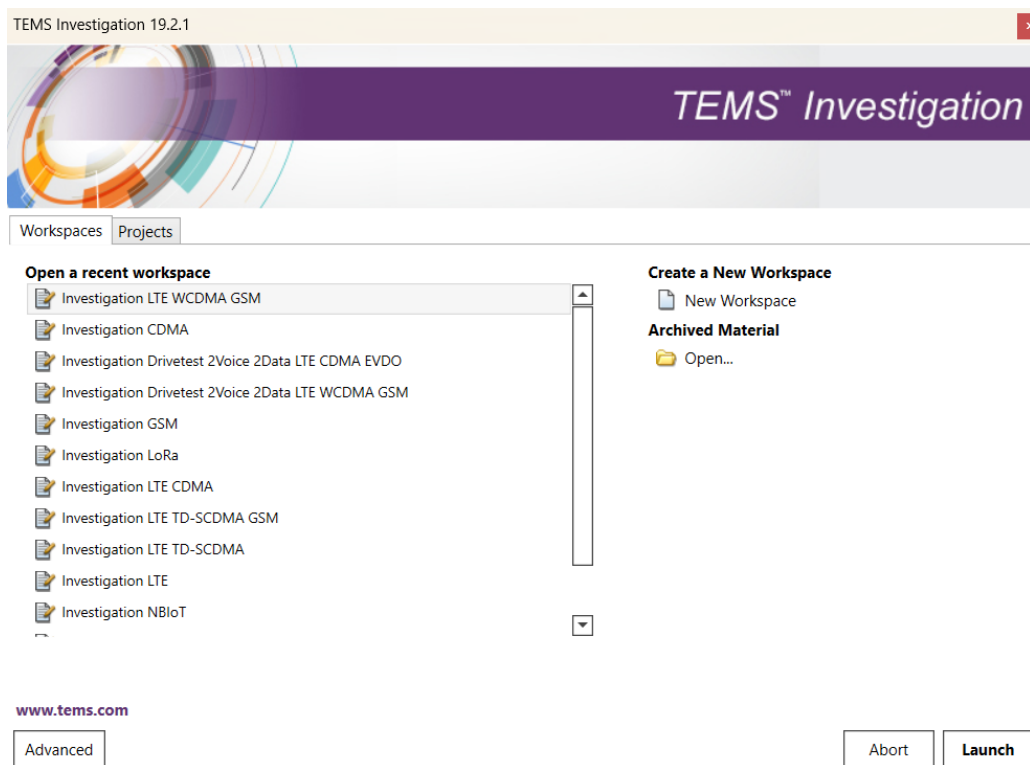
4. ANALIZA KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI 4G MOBILNE MREŽE POMOĆU TEMS INVESTIGATION PROGRAMSKOG ALATA

4.1. Rad u TEMS Investigation programskom alatu

Za analizu ključnih pokazatelja uspješnosti u ovom diplomskom radu korišten je TEMS Investigation programski alat te ovo poglavlje daje osnovne informacije o samom programu i funkcionalnostima koje nudi. Prije instalacije programa, potrebno je nabaviti licencu za program te provjeriti je li specifikacije računala zadovoljavaju minimalne zahtjeve programa. Pri samom pokretanju pojavljuje se početni prozor gdje se redom u izborniku odabiru *Professional* ili *Replay* te odgovarajući *Workspace*. Početni izbornici se mogu vidjeti na slikama 4.1. i 4.2.



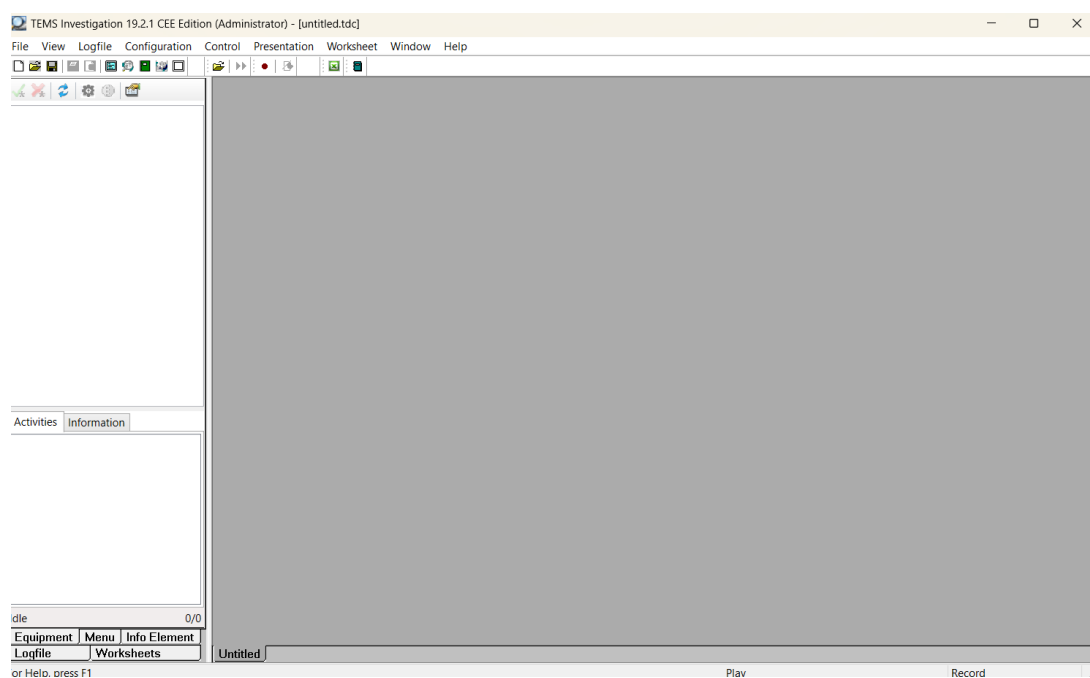
Slika 4.1. Početni izbornik gdje se odabire ikonica s nazivom *Professional*



Slika 4.2. Početni izbornik

Professional način rada omogućava skupljanje mjerenja, ponovno puštanje i analiziranje *logfile*-ova, stvaranje skripti, konfiguriranje uređaja i još puno toga. S druge strane, *Replay* način rada omogućava samo ponovno puštanje i analiziranje *logfile*-ova.

Nakon izbora program se konfigurira te se otvara glavni dio programa gdje su dostupne sve funkcionalnosti. Izgled glavnog prozora se može vidjeti na slici 4.3.

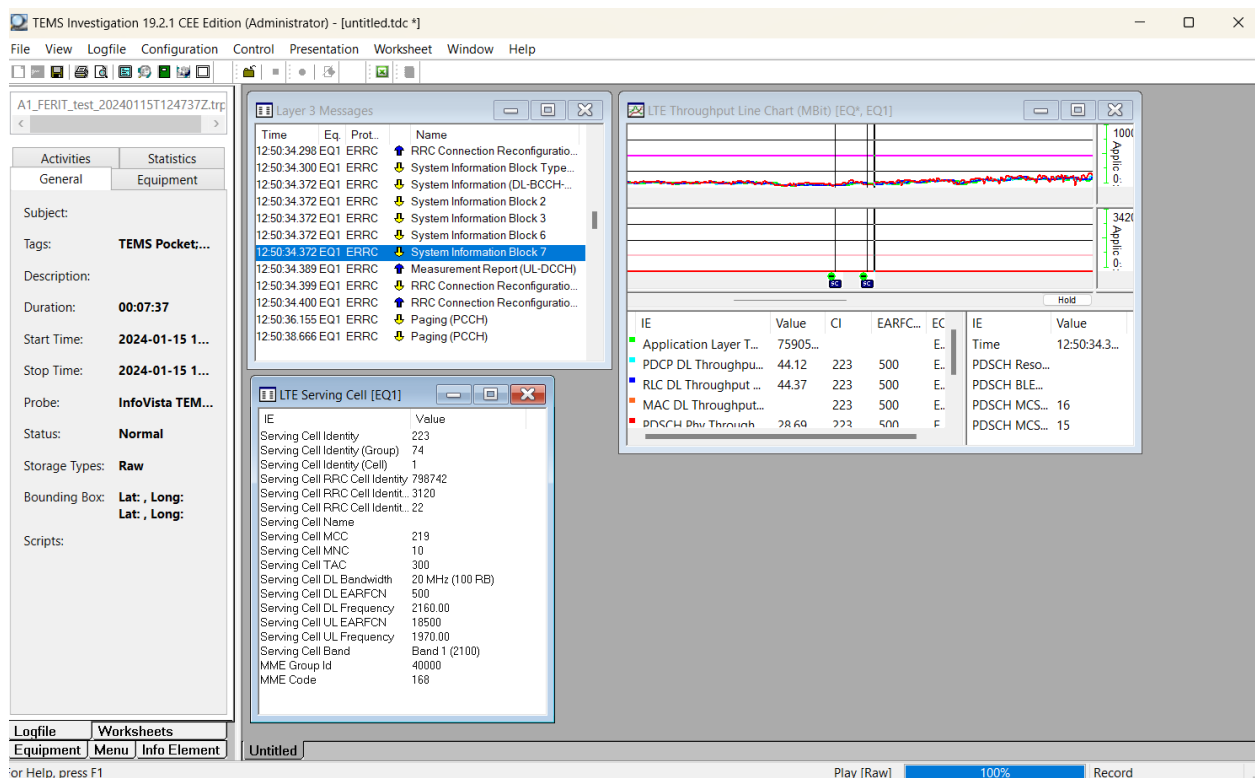


Slika 4.3. Izgled glavnog prozora TEMS Investigation programskog alata

Ako je potrebno mjeriti određeni promet na nekom mobilnom uređaju, treba spojiti taj mobilni uređaj, koji je kompatibilan s TEMS Investigation programskim alatom, s računalom na kojemu je instaliran taj program. Nakon što program registrira uređaj te se on pojavi unutar lijevog prozora označenog nazivom *Equipment*, može se početi snimati klikom na ikonicu označenu crvenim krugom koja se nalazi na alatnoj traci. Nakon snimanja se stvara *logfile* koji sadrži izmjerene podatke te koji će služiti u daljnjoj analizi.

S druge strane, ako su već obavljena mjerenja te treba samo otvoriti postojeći *logfile*, to se može napraviti odabirom *Logfile* izbornika na alatnoj traci te odabira „*Open Logfile...*“ unutar tog izbornika. Tada je potrebno pronaći konkretni *logfile* koji se želi analizirati, a on se može prepoznati po *.trp* sufiksu. Kada se učita *logfile*, lijevi prozor koji označava *logfile* se ažurira, te više nije prazan. Kako bi se pokrenulo analiziranje *logfilea* potrebno je stisnuti na ikonicu *Fast forward* koja se nalazi na alatnoj traci. Nakon što se u donjem desnom kutu glavnog prozora prikaže stopostotna analiziranost *logfilea* tada se mogu otvarati manji prozori unutar glavnog prozora programa koji će prikazivati pojedine analizirane vrste podataka. Da bi se to učinilo, potrebno je odabrati *Presentation* izbornik na alatnoj traci te unutar njega odabrati *LTE* podizbornik. Tu se mogu odabrati i neke druge tehnologije osim LTE-a, ali za potrebe ovog diplomskog rada, korišten je LTE podizbornik.

Pod LTE podizbornikom može se odabrati da se generiraju različiti prozori koji se pri odabiru prikazu na radnoj ploči, odnosno na sivom dijelu glavnog prozora sa slike 4.3. Kada se otvori nekoliko prozora to izgleda kao što je prikazano na slici 4.4. To je vrlo korisno svojstvo TEMS Investigation programskog alata jer se na istom mjestu mogu vidjeti različite vrste mjerenih podataka.



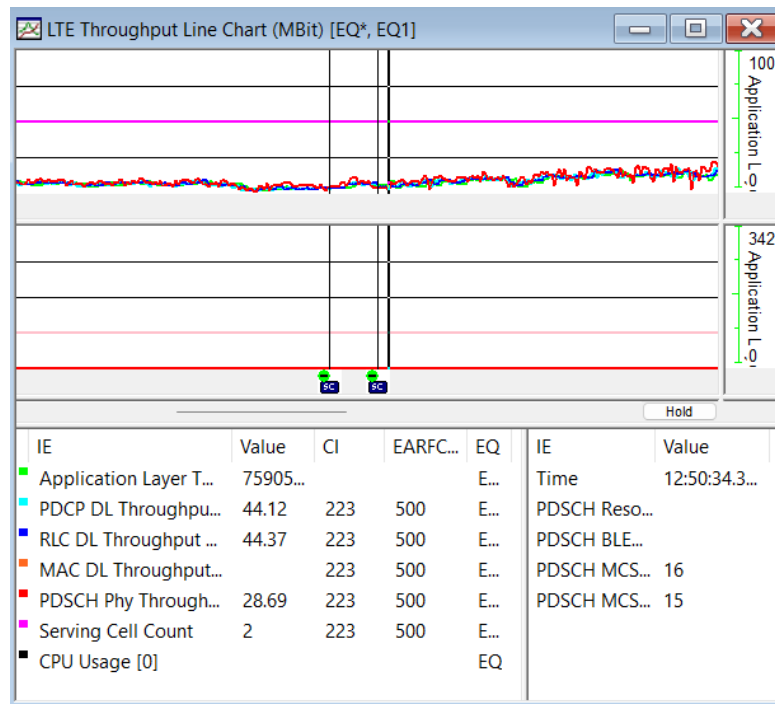
Slika 4.4. Prikaz manjih prozora otvorenih na radnoj ploči

U manjim prozorima koji se generiraju na radnoj ploči mogu se pratiti razna mjerenja, podatci i analize. Neki od bitnih podataka koji se mogu pratiti su signalizacija (slika 4.5.), linijski graf (slika 4.6.) podatci vezani za ćeliju koja opslužuje mobilni uređaji (slika 4.7). Praćenjem signalizacije se prate konkretne signalne poruke koje se razmjenjuju između mobilnog uređaja i bazne postaje. U prikazu signalizacijskih poruka posebno su naznačene *downlink* i *uplink* poruke sa strelicom prema dolje i prema gore, što može biti korisno pri analizi.

Time	Eq.	Prot..	Name
12:50:28.056	EQ1	ERRC	↓ RRC Connection Reconfiguratio...
12:50:28.056	EQ1	ERRC	↑ RRC Connection Reconfiguratio...
12:50:28.294	EQ1	ERRC	↓ System Information Block Type...
12:50:29.734	EQ1	ERRC	↓ Paging (PCCH)
12:50:32.262	EQ1	ERRC	↓ Paging (PCCH)
12:50:33.345	EQ1	ERRC	↓ RRC Connection Reconfiguratio...
12:50:33.347	EQ1	ERRC	↑ RRC Connection Reconfiguratio...
12:50:34.189	EQ1	ERRC	↑ Measurement Report (UL-DCCH)
12:50:34.215	EQ1	ERRC	↓ RRC Connection Reconfiguratio...
12:50:34.241	EQ1	ERRC	↑ RRC Connection Reconfiguratio...
12:50:34.277	EQ1	ERRC	↓ RRC Connection Reconfiguratio...
12:50:34.298	EQ1	ERRC	↑ RRC Connection Reconfiguratio...

Slika 4.5. Prikaz signalizacijskih poruka

Na linijskom grafu se mogu pratiti vrijednosti bitnih mjerenih podataka i njihove promjene u vremenu. Desnim klikom na graf i odabirom opcije *Properties*, pojavljuje se pomoćni prozor na kojem, odabirom opcije *Edit Chart*, može se odabirati ili brisati velik broj parametara i podataka za prikaz na grafu. Kada se odaberu željeni parametri, njihove vrijednosti se mogu pratiti u prozoru ispod grafa. Klikom na određeni dio grafa u donjem se prozoru ažuriraju vrijednosti odabranih parametara za specifičan trenutak u vremenu.



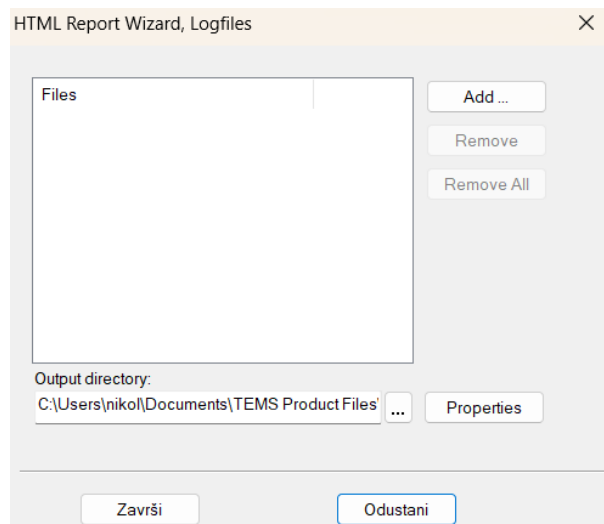
Slika 4.6. Linijski graf i pripadni parametri

Također treba imati na umu da odabirom na određenu točku u vremenu na grafu sa slike 4.6. ili odabirom na određenu signalizacijsku poruku sa slike 4.5 mijenjaju se i ažuriraju podatci u drugom prozoru. Također se mijenjaju podatci vezani za ćeliju koja opslužuje mobilni uređaj sa slike 4.7. U tim podacima se mogu naći identifikacijski broj ćelije i njene grupe, frekvencijski pojas i mnogi drugi bitni parametri. Time se može prikazati sveobuhvatna povezanost velikog broja prozora koji se mogu generirati što znači da konfiguracija i odabir na jednom prozoru može utjecati na specifičan prikaz podataka na drugom.

IE	Value
Serving Cell Identity	223
Serving Cell Identity (Group)	74
Serving Cell Identity (Cell)	1
Serving Cell RRC Cell Identity	798742
Serving Cell RRC Cell Identit...	3120
Serving Cell RRC Cell Identit...	22
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	219
Serving Cell MNC	10
Serving Cell TAC	300
Serving Cell DL Bandwidth	20 MHz (100 RB)
Serving Cell DL EARFCN	500
Serving Cell DL Frequency	2160.00
Serving Cell UL EARFCN	18500
Serving Cell UL Frequency	1970.00
Serving Cell Band	Band 1 (2100)
MME Group Id	40000
MME Code	168

Slika 4.7. Podatci vezani za ćeliju koja opslužuje mobilni uređaj

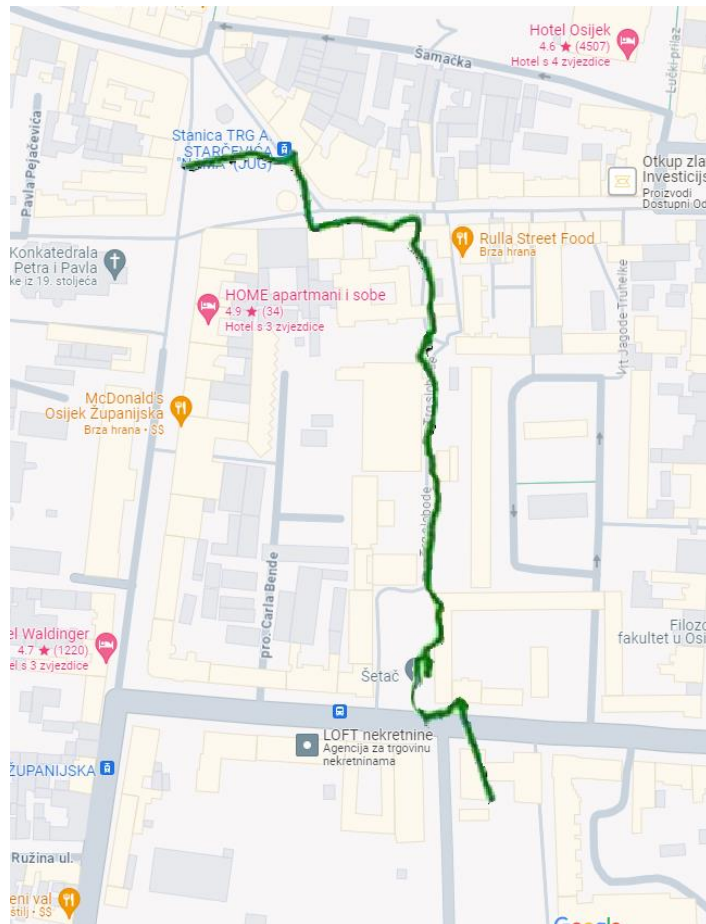
Navedeni pristup je koristan kada je potrebno promatrati pojedini parametar u određenoj točki u vremenu ili kada je potrebno izdvojiti određenu signalizacijsku poruku te proučiti podatke vezane za nju. No za vrijeme mjerenja može nastati tisuće podataka čija sveobuhvatna statistička analiza bi zahtijevala veliku količinu vremena ako bi se pristupalo svim tim podacima pojedinačno. Stoga TEMS Investigation programski alat nudi opciju da se takva sveobuhvatna analiza napravi na automatski i brži način. Sve što je u tom slučaju potrebno jest da se odabere *Logfile* u glavnom izborniku u gornjem lijevom kutu. U podizborniku je potrebno odabrati *HTML Report*. Tada se pojavi pomoćni prozor sa slike 4.8. te se klikom na odabir „Add...“ može odabrati *logfile* na kojemu se želi napraviti statistička analiza ključnih parametara uspješnosti. Nakon što se pričeka kraće vrijeme da se obavi analiza, generirat će se statističko izvješće na putanji koja je istaknuta na slici 4.8. pod nazivom *Output directory*.



Slika 4.8. Pomoćni prozor za odabir *logfilea* po kojemu se pravi statističko izvješće

4.2. Statistička analiza

U ovom dijelu diplomskog rada provedena je statistička analiza ključnih pokazatelja uspješnosti objašnjenih u trećem poglavlju (RSSI, RSRP, SINR ili CINR, RSRQ, RLC DL propusnost, PDCP DL propusnost i PDSCH Phy propusnost). Analiza je napravljena na temelju histograma i kumulativne funkcije distribucije izmjerenih vrijednosti. Mjerenje vrijednosti je provedeno sa mobilnim mrežama tri operatera, koje će u ovom radu biti nazvane mobilna mreža MM1, MM2 i MM3. Mjerenje je provedeno 15. siječnja 2024. godine u gradu Osijeku, na putanji označenoj na slici 4.9. Mjerenje su proveli stručnjaci iz tvrtke Ericsson Nikola Tesla za potrebe laboratorijskih vježbi na kolegiju Mobilne komunikacije. Kolegij se održava na drugoj godini sveučilišnog diplomskog studija Elektrotehnike, smjera Komunikacije i informatika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.



Slika 4.9. Putanja kojom je uređaj mjerio vrijednosti za 3 mobilne mreže

Na temelju izmjerenih podataka u ovom je radu napravljena usporedba statističkih pokazatelja za mreže različitih operatera.

4.2.1. Analiza parametara za mrežu MM1

Mjerenje parametara za mrežu MM1 započelo je 15. siječnja 2024. godine u 12:47:38, a završilo istog dana u 12:55:15. Pri tome su provedene aktivnosti slanja Get poruke HTTP protokola i skidanje datoteke pod imenom 10GB_testfile.txt. Na slici 4.10. mogu se vidjeti razni događaji u komunikaciji između mobilnog uređaja i bazne stanice kao što su *handoveri*.

Time	Eq.	Event	Info
12:47:37.823	EQ1	Dedicated Mode	
12:47:48.311	EQ1	HTTP Start	URI: http://85.114.36.205/10GB_testfile.bt URI Type: File download. Session I...
12:50:27.744	EQ1	EUTRAN Handov...	From EARFCN: 1749. From Cell Identity: 366. To Cell Identity: 223.
12:50:27.770	EQ1	EUTRAN Intra-fre...	Intra-frequency Handover (EARFCN 1749), from Cell Identity (366) to Cell Identit...
12:50:27.770	EQ1	Secondary Cell R...	SCell index: 1. Reconfiguration Duration: 22 ms.
12:50:27.770	EQ1	Secondary Cell A...	SCell index: 1. SCells: (6225-223). Reconfiguration Duration: 22 ms.
12:50:27.773	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:50:27.789	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 16 ms.
12:50:27.790	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 1 ms.
12:50:28.047	EQ1	EUTRAN RRC A1...	-88 <= RSRP < -87 dBm. -16 <= RSRQ < -15.5 dB. Threshold Eutra1. -127 <= R...
12:50:34.189	EQ1	EUTRAN RRC A5...	-88 <= RSRP < -87 dBm. -17.5 <= RSRQ < -17 dB. Neighbors. Cell ID: 223. -88...
12:50:34.215	EQ1	EUTRAN Handov...	From EARFCN: 1749. From Cell Identity: 223. To EARFCN: 500. To Cell Identi...
12:50:34.241	EQ1	EUTRAN Inter-fre...	Inter-frequency Handover (EARFCN 1749 to 500), from Cell Identity (223) to Cell...
12:50:34.241	EQ1	Secondary Cell R...	SCell index: 1. SCells: (6225-223). Reconfiguration Duration: 29 ms.
12:50:34.241	EQ1	Secondary Cell A...	SCell index: 1. SCells: (6225-223). Reconfiguration Duration: 29 ms.
12:50:34.241	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:50:34.267	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 26 ms.
12:50:34.267	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 0 ms.
12:50:34.389	EQ1	EUTRAN RRC A1...	-89 <= RSRP < -88 dBm. -12 <= RSRQ < -11.5 dB. Threshold Eutra1. -127 <= R...
12:53:04.972	EQ1	EUTRAN RRC A3...	-96 <= RSRP < -95 dBm. RSRQ < -19.5 dB. Neighbors. Cell ID: 224. -90 <= RS...
12:53:05.008	EQ1	EUTRAN Handov...	From EARFCN: 500. From Cell Identity: 223. To Cell Identity: 224.
12:53:05.025	EQ1	EUTRAN Intra-fre...	Intra-frequency Handover (EARFCN 500), from Cell Identity (223) to Cell Identity...
12:53:05.025	EQ1	Secondary Cell R...	SCell index: 1. SCells: (6225-223). Reconfiguration Duration: 29 ms.
12:53:05.025	EQ1	Secondary Cell A...	SCell index: 1. SCells: (6225-224). Reconfiguration Duration: 29 ms.
12:53:05.026	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:53:05.049	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 23 ms.
12:53:05.049	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 0 ms.
12:53:05.158	EQ1	EUTRAN RRC A1...	-89 <= RSRP < -88 dBm. -15 <= RSRQ < -14.5 dB. Threshold Eutra1. -127 <= R...
12:55:13.431	EQ1	HTTP Error	Cause: . Operation canceled. Session Identity: 0. Time based measurement ...
12:55:13.433	EQ1	HTTP End	Service Status: Stopped by User. Session Identity: 0. Time based measurem...

Slika 4.10. Događaji u komunikaciji između mobilnog uređaja i bazne postaje mrežu MM1

Na slici 4.10. se može vidjeti da se dogodilo 3 *handovera*, dva intra-frekvencijska i jedan inter-frekvencijski. Kod intra-frekvencijskog *handovera* frekvencija ostane ista, a promijeni se poslužujuća ćelija, odnosno njen identifikacijski broj, kao što se može vidjeti u razlici između slika 4.11. i 4.12. Zatim se događa inter-frekvencijski *handover*, gdje se mijenja frekvencija poslužujuće ćelije, ali identifikacijski broj ćelije ostaje isti, odnosno poslužujuća ćelija se ne mijenja. To se može vidjeti u razlici između slika 4.12. i 4.13. Te na kraju se opet događa intra-frekvencijski *handover*, gdje se mijenja poslužujuća ćelija, a frekvencija posluživanja ostaje ista. To se može vidjeti u razlici između podataka na slikama 4.13 i 4.14.

IE	Value
Serving Cell Identity	366
Serving Cell Identity (Group)	122
Serving Cell Identity (Cell)	0
Serving Cell RRC Cell Identity	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	
Serving Cell MNC	
Serving Cell TAC	
Serving Cell DL Bandwidth	20 MHz (100 RB)
Serving Cell DL EARFCN	1749
Serving Cell DL Frequency	1859.90
Serving Cell UL EARFCN	19749
Serving Cell UL Frequency	1764.90
Serving Cell Band	Band 3 (1800)
MME Group Id	
MME Code	

Slika 4.11. Vrijednosti vezane za poslužujuću ćeliju identifikacijskog broja 366 i frekvencije silazne veze od 1859.90 MHz.

IE	Value
Serving Cell Identity	223
Serving Cell Identity (Group)	74
Serving Cell Identity (Cell)	1
Serving Cell RRC Cell Identity	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	
Serving Cell MNC	
Serving Cell TAC	
Serving Cell DL Bandwidth	20 MHz (100 RB)
Serving Cell DL EARFCN	1749
Serving Cell DL Frequency	1859.90
Serving Cell UL EARFCN	19749
Serving Cell UL Frequency	1764.90
Serving Cell Band	Band 3 (1800)
MME Group Id	
MME Code	

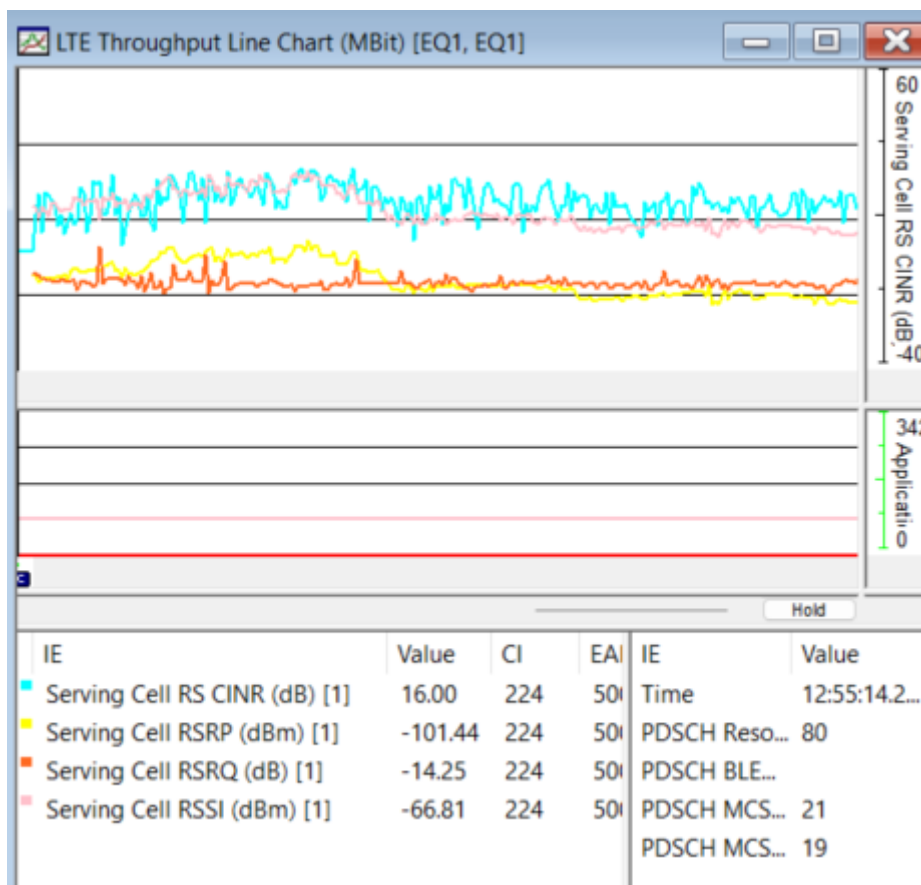
Slika 4.12. Vrijednosti vezane za poslužujuću ćeliju identifikacijskog broja 223 i frekvencije silazne veze od 1859.90 MHz.

IE	Value
Serving Cell Identity	223
Serving Cell Identity (Group)	74
Serving Cell Identity (Cell)	1
Serving Cell RRC Cell Identity	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	219
Serving Cell MNC	10
Serving Cell TAC	
Serving Cell DL Bandwidth	
Serving Cell DL EARFCN	500
Serving Cell DL Frequency	2160.00
Serving Cell UL EARFCN	18500
Serving Cell UL Frequency	1970.00
Serving Cell Band	Band 1 (2100)
MME Group Id	40000
MME Code	168

Slika 4.13. Vrijednosti vezane za poslužujuću ćeliju identifikacijskog broja 223 i frekvencije silazne veze od 2160.00 MHz.

IE	Value
Serving Cell Identity	224
Serving Cell Identity (Group)	74
Serving Cell Identity (Cell)	2
Serving Cell RRC Cell Identity	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	219
Serving Cell MNC	10
Serving Cell TAC	
Serving Cell DL Bandwidth	20 MHz (100 RB)
Serving Cell DL EARFCN	500
Serving Cell DL Frequency	2160.00
Serving Cell UL EARFCN	18500
Serving Cell UL Frequency	1970.00
Serving Cell Band	Band 1 (2100)
MME Group Id	40000
MME Code	168

Slika 4.14. Vrijednosti vezane za poslužujuću ćeliju identifikacijskog broja 224 i frekvencije silazne veze od 2160.00 MHz.

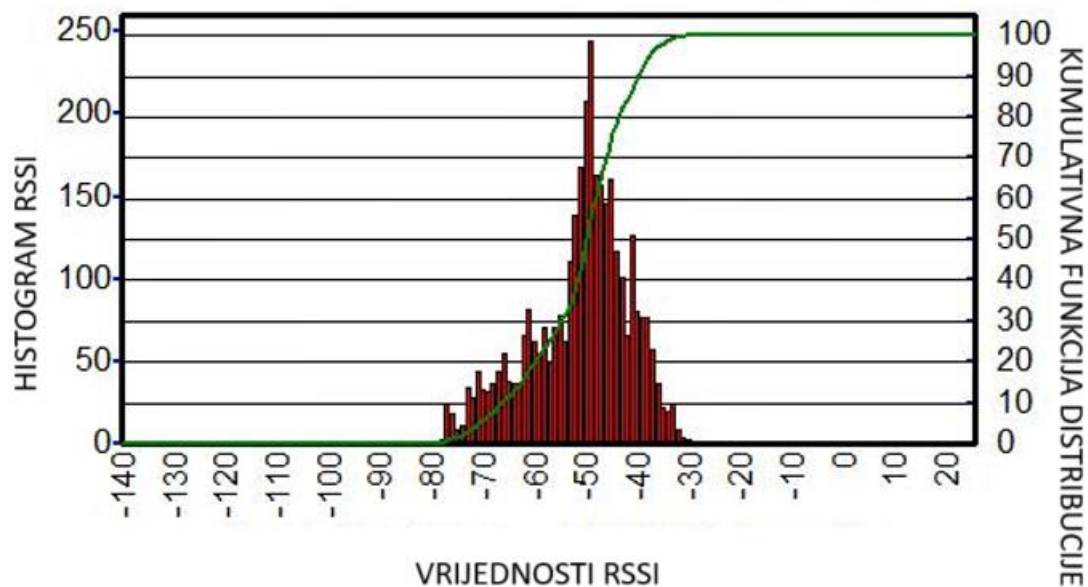


Slika 4.15. Vremenski prikaz SINR, RSRP, RSRQ i RSSI parametara

Također je bitno promotriti vremenski prikaz SINR (ili CINR), RSRP, RSRQ i RSSI parametra. To se upravo može vidjeti na slici 4.15. Na slici se može vidjeti da je upravo RSSI veći od RSRP i RSRQ parametara jer obuhvaća snagu cjelokupnog signala koji pristiže na antenu uključujući šum i interferenciju.

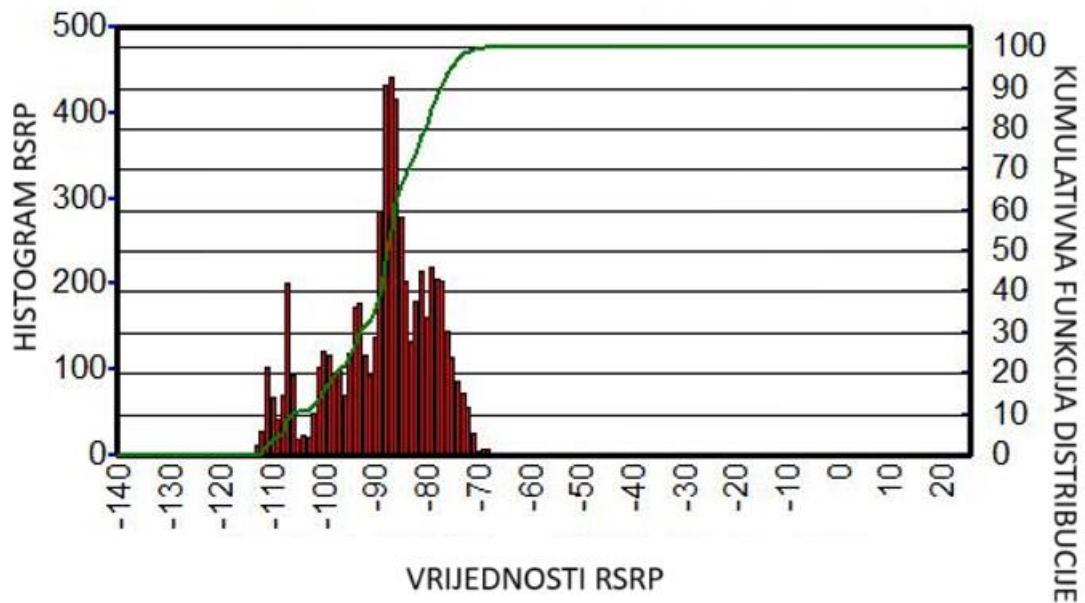
Na slici 4.16. prikazan je histogram (crveno) i kumulativna funkcija distribucije (zeleno) rezultata mjerenja parametra RSSI u mreži MM1. Na apscisi su prikazane vrijednosti RSSI parametra koje su grupirane u razredne intervale, a frekvencija pojavljivanja vrijednosti RSSI unutar pojedinog razreda prikazana je kao visina pripadnog stupca. Pri tome su na ordinati prikazane frekvencije ili broj pojavljivanja izmjerenih parametara unutar danog intervala. S desne strane grafa su označeni postotci za kumulativnu distribucijsku funkciju (od 0 do 100 %).

Iz kumulativne funkcije distribucije na slici 4.16. se može vidjeti da su gotovo sve izmjerene vrijednosti veće od -79 dBm, što prema tablici 3.1 znači da je RSSI u gotovo svim slučajevima odličan.



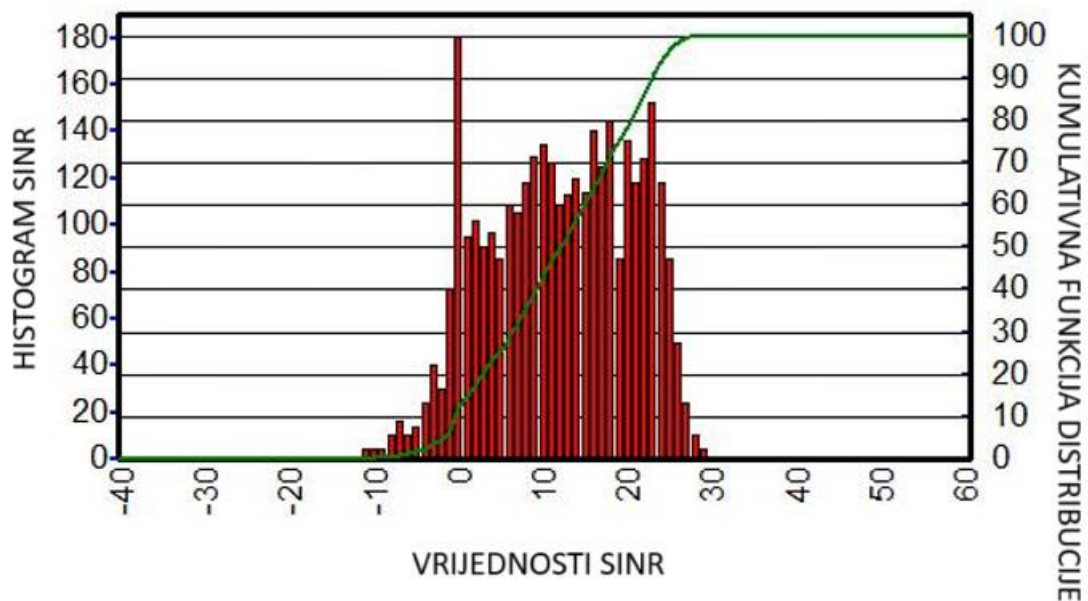
Slika 4.16. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RSSI signala u mreži MM1

Međutim, prema kumulativnoj funkciji distribucije RSRP-a, prikazanoj na slici 4.17., može se uočiti da je tek oko 25% izmjerenih signala iznad -80 dBm, što znači da se samo na 25% lokacija RSRP može ocijeniti kao odličan prema tablici 3.2. Također se može vidjeti da je oko 40% izmjerenih vrijednosti unutar pojasa od -90 dBm do -80 dBm, što znači da je velik broj RSRP mjerenja ocjenjeno dobrom ocjenom. Između -100 dBm i -90 dBm je oko 20% vrijednosti, dok je čak oko 15% vrijednosti RSRP-a ispod -100 dBm što je vrlo niska razina signala koja može uzrokovati prekid veze ili nemogućnost uspostavljanja veze. Razlog zašto je RSSI imao većinom odlične vrijednosti, dok kod RSRP-a to nije tako jest to što RSSI predstavlja jakost ukupnog signala, gdje je uz korisni signal i šum i interferencija pa rezultati ukazuju na visoku razinu šuma i interferencije.



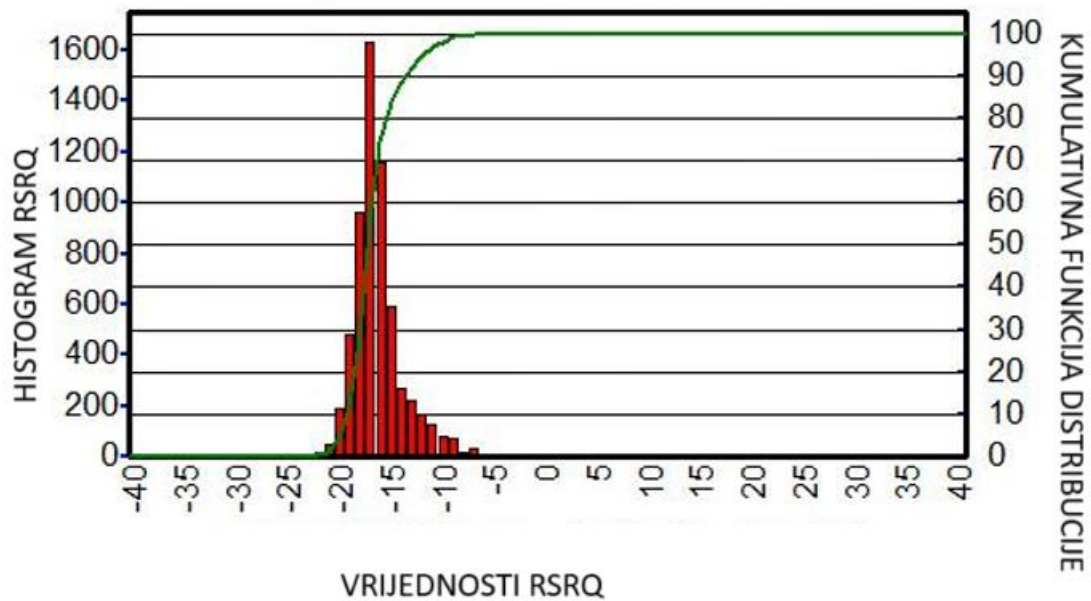
Slika 4.17. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RSRP signala u mrežu MM1

Na slici 4.18. se može vidjeti da je za oko 25% mjernih mjesta vrijednosti SINR-a iznad 20 dB što odgovara odličnoj kvaliteti signala, a sukladno je i rezultatima za RSRP vrijednosti. Ispod 0 dB je 6.8% SINR vrijednosti (Prilog 1), što odgovara slaboj kvaliteti signala.

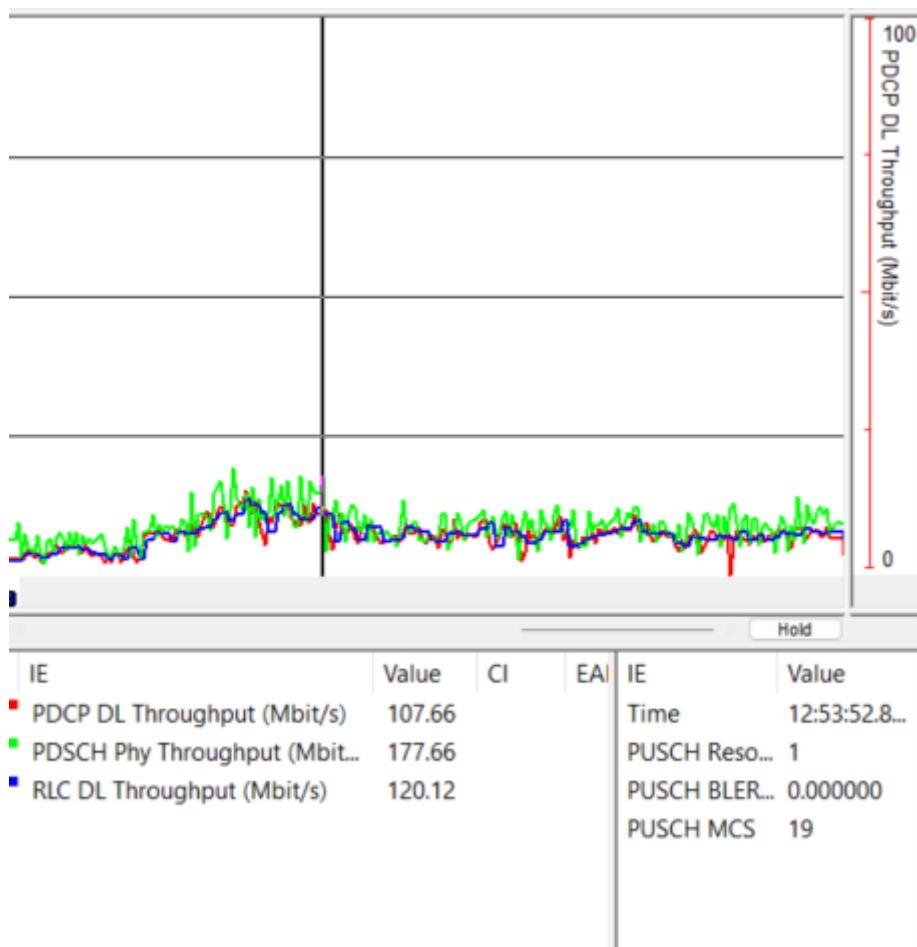


Slika 4.18. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja SINR-a (CINR-a) u mreži MM1

Na slici 4.19. prikazan je histogram izmjerenih vrijednosti RSRQ parametra iz kojeg se može primijetiti da je samo mali broj izmjerenih vrijednosti veći od -10 dB, odnosno, mali broj vrijednosti ima odličnu ocjenu. Nešto veći broj ima kvalitetu razine dobar, što se odnosi na vrijednosti između -15 dB i -10 dB. Najveći broj vrijednosti je između -20 dB i -15 dB, što odgovara graničnoj vrijednosti. Ukupno ispod -15 dB, što je donja granica za dobru kvalitetu je oko 70% izmjerenih vrijednosti SINR-a, što znači da je izuzetno veliki postotak mjernih točaka u kojima kvaliteta veze nije dobra.



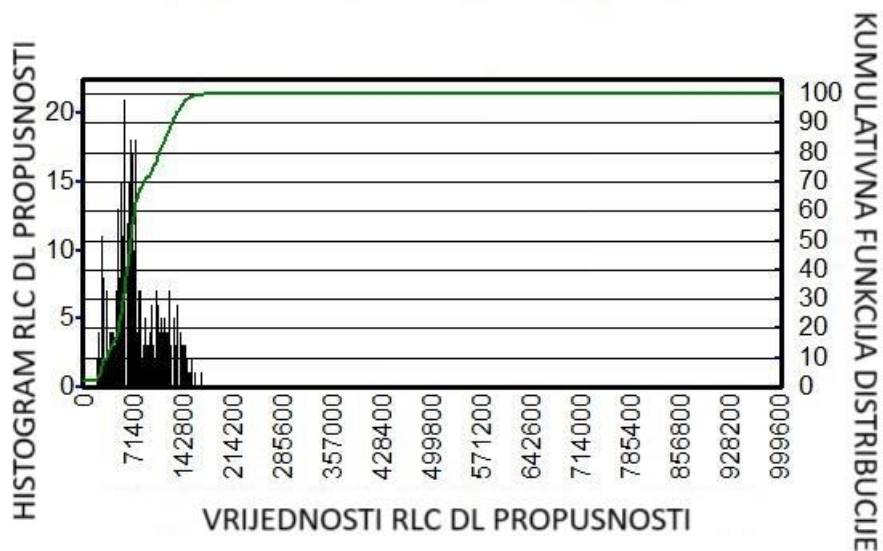
Slika 4.19. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RSRQ ključnog pokazatelja uspješnosti signala za mrežu MM1



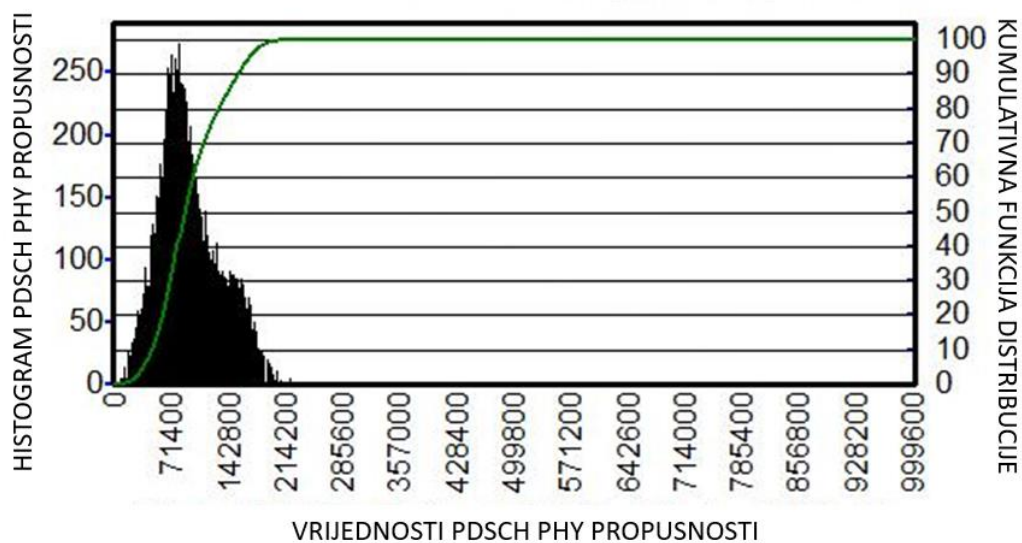
Slika 4.20. Vremenski prikaz promjene 3 tipa propusnosti

Na slici 4.20. se može vidjeti vremenski prikaz promjene propusnosti tipa PDSCH Phy, RLC DL i PDCP DL. Tu se može vidjeti da je u velikom broju slučajeva PDSCH Phy najveći, dok u većini slučajeva PDCP DL i RLC DL imaju slične vrijednosti.

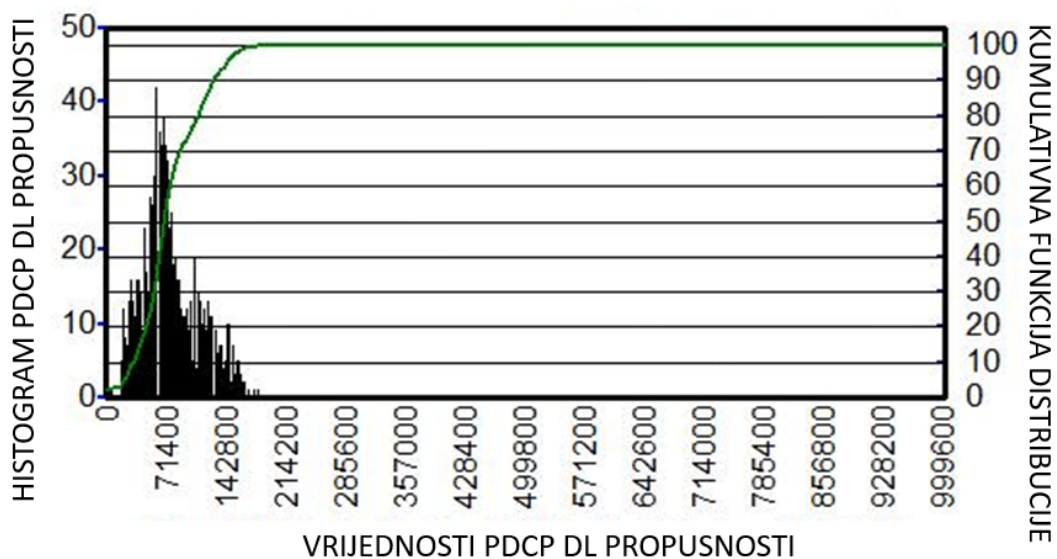
Na slici 4.21. se može vidjeti histogram i kumulativna funkcija distribucije vrijednosti RLC DL propusnosti za izmjerene signale za mrežu MM1. Na slici se može vidjeti da je na oko 85% mjernih mjesta propusnost veća od 60 Mbit/s što su relativno dobre vrijednosti. Pri tome na oko 10% RLC DL propusnosti premašuje 100 Mbit/s. Za PDCP DL (slika 4.23.) i PDSCH Phy propusnosti (slika 4.22.) vrijednosti su slične, no po srednjoj vrijednosti se može vidjeti da su za PDSCH Phy vrijednosti nešto veće.



Slika 4.21. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RLC DL propusnosti (kbit/s) signala za mrežu MM1



Slika 4.22. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja PDSCH Phy propusnosti (kbit/s) signala za mrežu MM1



Slika 4.23. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja PDCP DL propusnosti (kbit/s) signala za mrežu MM1

4.2.2. Analiza parametara za mrežu MM2

Mjerenje parametara za mobilnu mrežu MM2 započelo je 15. siječnja 2024. godine u 12:47:26, a završilo istog dana u 12:55:48. Pri tome su provedene aktivnosti slanja *Get* poruke HTTP protokola i skidanje datoteke pod imenom *10GB_testfile.txt*. Na slici 4.24. mogu se vidjeti događaji koji su se pojavili tijekom komunikacije mobilnog uređaja i bazne stanice.

Time	Eq.	Event	Info
12:47:26.638	EQ1	Dedicated Mode	
12:47:36.731	EQ1	HTTP Start	URI: http://85.114.36.205/10GB_testfile.bt. URI Type: File download. Session I.
12:49:13.656	EQ1	EUTRAN Handov...	From EARFCN: 1899. From Cell Identity: 243. To Cell Identity: 277.
12:49:13.693	EQ1	EUTRAN Intra-frequency Handover	Handover (EARFCN 1899), from Cell Identity (243) to Cell Identit
12:49:13.693	EQ1	Secondary Cell R...	SCell index: 1. Reconfiguration Duration: 27 ms.
12:49:13.693	EQ1	Secondary Cell A...	SCell index: 1. SCells: (1501-277). Reconfiguration Duration: 27 ms.
12:49:13.693	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:49:13.694	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 1 ms.
12:49:13.694	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 0 ms.
12:49:13.836	EQ1	EUTRAN RRC A1...	-86 <= RSRP < -85 dBm. -9 <= RSRQ < -8.5 dB. Threshold Eutra1. -127 <= RS...
12:49:43.308	EQ1	EUTRAN RRC A5...	-86 <= RSRP < -85 dBm. -13 <= RSRQ < -12.5 dB. Neighbors. Cell ID: 277. -88.
12:49:43.351	EQ1	EUTRAN Handov...	From EARFCN: 1899. From Cell Identity: 277. To EARFCN: 75. To Cell Identit..
12:49:43.382	EQ1	EUTRAN Inter-fre...	Inter-frequency Handover (EARFCN 1899 to 75), from Cell Identity (277) to Cell I.
12:49:43.382	EQ1	Secondary Cell R...	SCell index: 1. SCells: (1501-277). Reconfiguration Duration: 29 ms.
12:49:43.382	EQ1	Secondary Cell A...	SCell index: 1. SCells: (6375-277). Reconfiguration Duration: 29 ms.
12:49:43.393	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:49:43.404	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 11 ms.
12:49:43.405	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 1 ms.
12:49:43.533	EQ1	EUTRAN RRC A1...	-86 <= RSRP < -85 dBm. -15.5 <= RSRQ < -15 dB. Threshold Eutra1. -127 <= R.
12:52:15.060	EQ1	EUTRAN RRC A3...	-95 <= RSRP < -94 dBm. RSRQ < -19.5 dB. Neighbors. Cell ID: 278. -92 <= RS.
12:52:15.067	EQ1	EUTRAN Handov...	From EARFCN: 75. From Cell Identity: 277. To Cell Identity: 278.
12:52:15.082	EQ1	EUTRAN Intra-fre...	Intra-frequency Handover (EARFCN 75), from Cell Identity (277) to Cell Identity (.
12:52:15.082	EQ1	Secondary Cell R...	SCell index: 1. SCells: (6375-277). Reconfiguration Duration: 24 ms.
12:52:15.082	EQ1	Secondary Cell A...	SCell index: 1. SCells: (6375-278). Reconfiguration Duration: 24 ms.
12:52:15.082	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:52:15.084	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 2 ms.
12:52:15.084	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 0 ms.
12:52:15.224	EQ1	EUTRAN RRC A1...	-91 <= RSRP < -90 dBm. -15 <= RSRQ < -14.5 dB. Threshold Eutra1. -127 <= R.
12:55:13.627	EQ1	EUTRAN RRC A5...	-107 <= RSRP < -106 dBm. -16.5 <= RSRQ < -16 dB. Neighbors. Cell ID: 278. -.
12:55:42.073	EQ1	EUTRAN RRC A2...	-116 <= RSRP < -115 dBm. -17 <= RSRQ < -16.5 dB. Threshold Eutra1. -114 <=.
12:55:46.548	EQ1	HTTP Error	Cause: . Operation canceled. Session Identity: 0. Time based measurement ..
12:55:46.548	EQ1	HTTP End	Service Status: Stopped by User. Session Identity: 0. Time based measuram.

Slika 4.24. Događaji u komunikaciji između mobilnog uređaja i bazne postaje za mobilnu mrežu MM2

I u mreži MM2 kod prolaska putanjom prikazanom na slici 4.9. došlo je do intra-frekvencijskog i inter-frekvencijskog *handovera*. Mijenjanje frekvencija i identifikacijskih brojeva samih poslužujućih ćelija kod ovih *handovera* se može vidjeti na slikama 4.25., 4.26., 4.27. i 4.28.

IE	Value
Serving Cell Identity	243
Serving Cell Identity (Group)	81
Serving Cell Identity (Cell)	0
Serving Cell RRC Cell Identity	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	
Serving Cell MNC	
Serving Cell TAC	
Serving Cell DL Bandwidth	
Serving Cell DL EARFCN	1899
Serving Cell DL Frequency	1874.90
Serving Cell UL EARFCN	19899
Serving Cell UL Frequency	1779.90
Serving Cell Band	Band 3 (1800)
MME Group Id	
MME Code	

Slika 4.25. Vrijednosti vezane za poslužujuću ćeliju identifikacijskog broja 243 i frekvencije silazne veze od 1874.90 MHz

IE	Value
Serving Cell Identity	277
Serving Cell Identity (Group)	92
Serving Cell Identity (Cell)	1
Serving Cell RRC Cell Identity	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	
Serving Cell MNC	
Serving Cell TAC	
Serving Cell DL Bandwidth	
Serving Cell DL EARFCN	1899
Serving Cell DL Frequency	1874.90
Serving Cell UL EARFCN	19899
Serving Cell UL Frequency	1779.90
Serving Cell Band	Band 3 (1800)
MME Group Id	
MME Code	

Slika 4.26. Vrijednosti vezane za poslužujuću ćeliju identifikacijskog broja 277 i frekvencije silazne veze od 1874.90 MHz

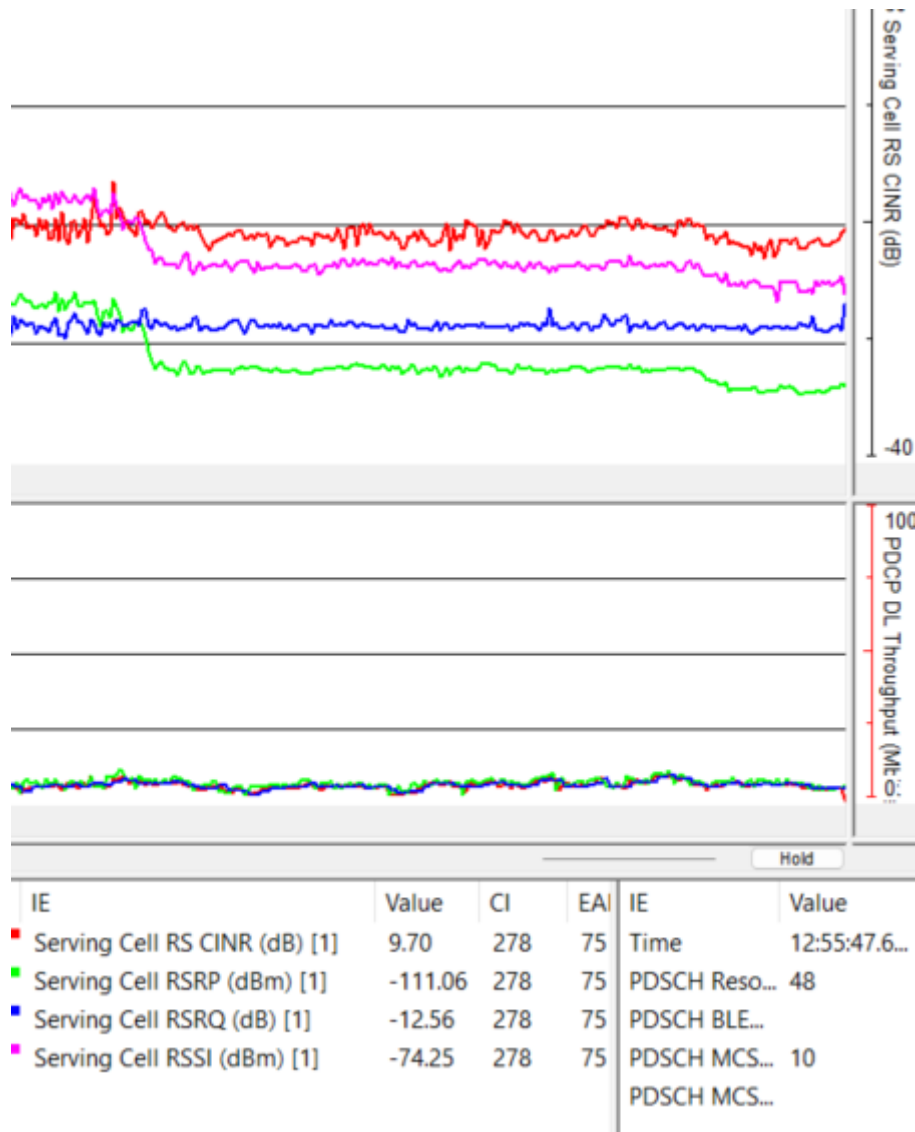
IE	Value
Serving Cell Identity	277
Serving Cell Identity (Group)	92
Serving Cell Identity (Cell)	1
Serving Cell RRC Cell Identity	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	219
Serving Cell MNC	1
Serving Cell TAC	
Serving Cell DL Bandwidth	
Serving Cell DL EARFCN	75
Serving Cell DL Frequency	2117.50
Serving Cell UL EARFCN	18075
Serving Cell UL Frequency	1927.50
Serving Cell Band	Band 1 (2100)
MME Group Id	32769
MME Code	40

Slika 4.27. Vrijednosti vezane za poslužujuću ćeliju identifikacijskog broja 277 i frekvencije silazne veze od 2117.50 MHz

IE	Value
Serving Cell Identity	278
Serving Cell Identity (Group)	92
Serving Cell Identity (Cell)	2
Serving Cell RRC Cell Identity	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell RRC Cell Identit...	
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	219
Serving Cell MNC	1
Serving Cell TAC	
Serving Cell DL Bandwidth	15 MHz (75 RB)
Serving Cell DL EARFCN	75
Serving Cell DL Frequency	2117.50
Serving Cell UL EARFCN	18075
Serving Cell UL Frequency	1927.50
Serving Cell Band	Band 1 (2100)
MME Group Id	32769
MME Code	40

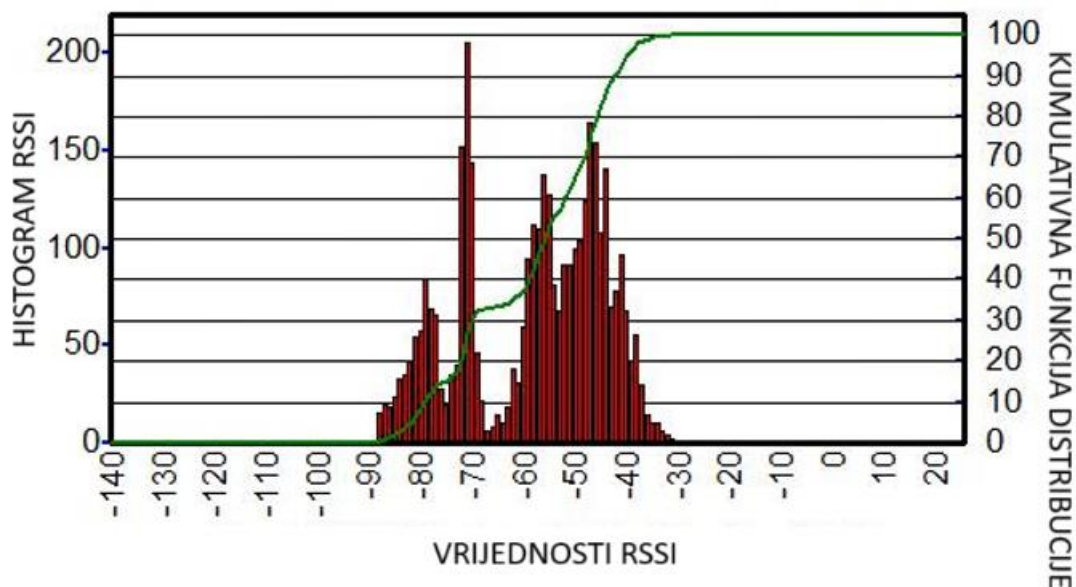
Slika 4.28. Vrijednosti vezane za poslužujuću ćeliju identifikacijskog broja 278 i frekvencije silazne veze od 2117.50 MHz

Ono o čemu također treba voditi računa jest parametri SINR, RSRP, RSSI i RSRQ. Pripadna promjena u vremenu tih parametara se može vidjeti na slici 4.29. Tu se može vidjeti da parametar RSSI je veći od RSRP i RSRQ, što odgovara teorijskim promatranjima.



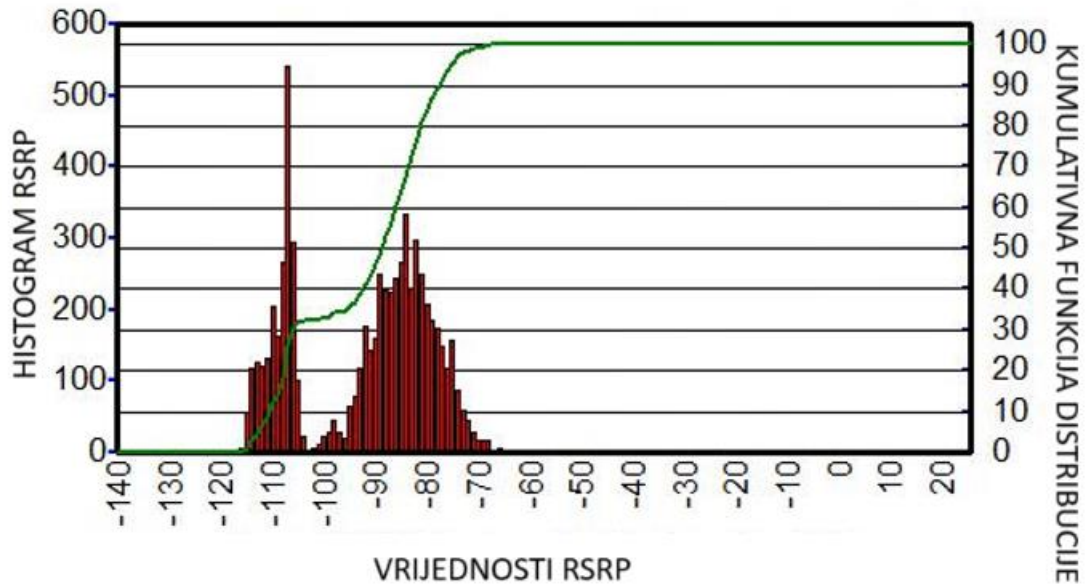
Slika 4.29. Vremenski prikaz parametara SINR, RSRP

Histogram i kumulativna funkcija distribucije izmjerenih vrijednosti RSSI signala prikazani su na slici 4.30. Iz kumulativne funkcije distribucije se može vidjeti da je većina izmjerenih vrijednosti parametra RSSI iznad -79 dBm (oko 90%) što znači da je većina izmjerenih signala odlično ocjenjene jakosti. Međutim, treba kao i u slučaju mreže MM1 imati na umu da to označava koristan signal pomiješan s interferencijom i šumom, te da ta ocjena u smislu kvalitete signala nije dobar indikator kvalitete.



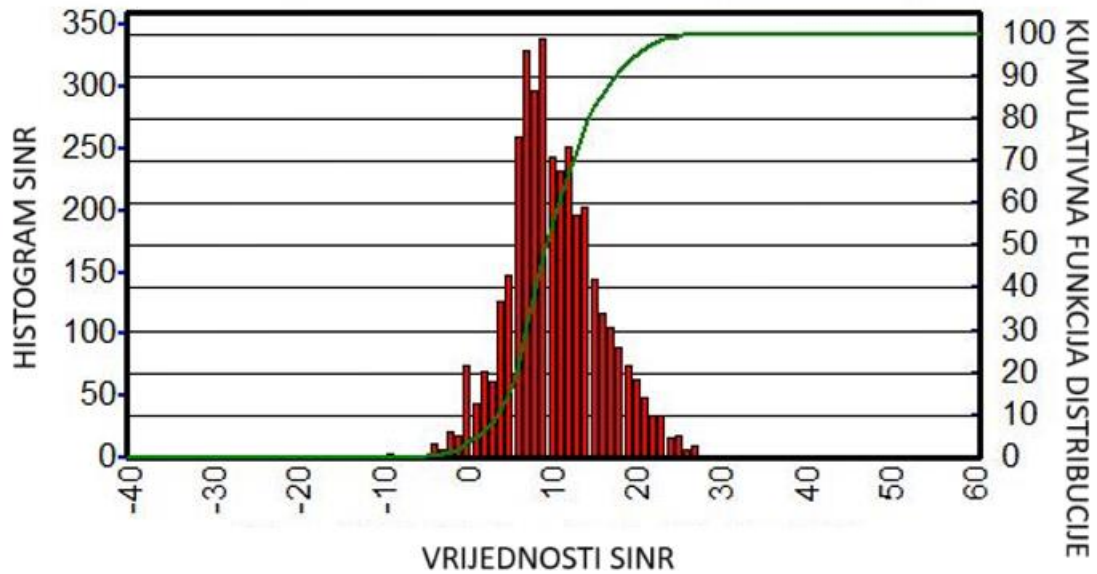
Slika 4.30. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RSSI signala za mobilnu mrežu MM2

Na slici 4.31. prikazani su histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RSRP signala gdje se može vidjeti da je samo mali broj izmjerenih vrijednosti iznad -80 dBm (oko 16%), što znači da je manji broj izmjerenih signala za mrežu MM2 odlične kvalitete. Također se može vidjeti da postoji određeno povećanje broja izmjerenih RSRP vrijednosti u rasponu između -80 dBm i -90 dBm gdje se vrijednosti ocjenjuju s dobrom ocjenom. Ispod -90 dBm, a pogotovo ispod -100 dBm, što označava granične i loše ocjenjene vrijednosti, postoji veliki broj vrijednosti RSRP parametra (43,6% ispod -90 dBm – Prilog 2), što znači da će u velikom broju slučajeva signal biti loše kvalitete ako se procjenjuje prema RSRP parametru.



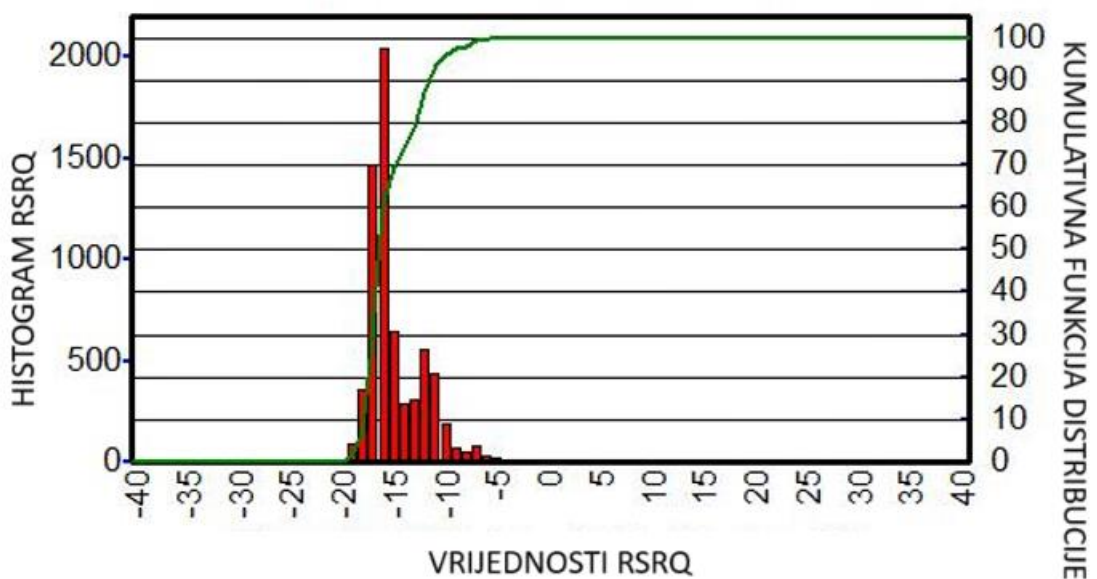
Slika 4.31. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RSRP pokazatelja za mobilnu mrežu MM2

Na slici 4.32. su prikazani histogram i kumulativna funkcija distribucije parametra SINR za mobilnu mrežu MM2. Na slici se može vidjeti da je samo mali broj izmjerenih vrijednosti, svega oko 10%, iznad 20 dB, što znači da mali broj izmjerenih vrijednosti prema SINR parametru ima odličnu kvalitetu. Također manji, ali nezanemariv broj vrijednosti se nalazi između 13 dB i 20 dB, što znači da ima dobru kvalitetu. Većina izmjerenih vrijednosti (oko 70%) nalazi se između 0 dB i 13 dB, što odgovara graničnoj kvaliteti signala, a tu se nalazi i maksimum histograma. Ispod 0 dB je 1.8% (Prilog 2) izmjerenih vrijednosti.



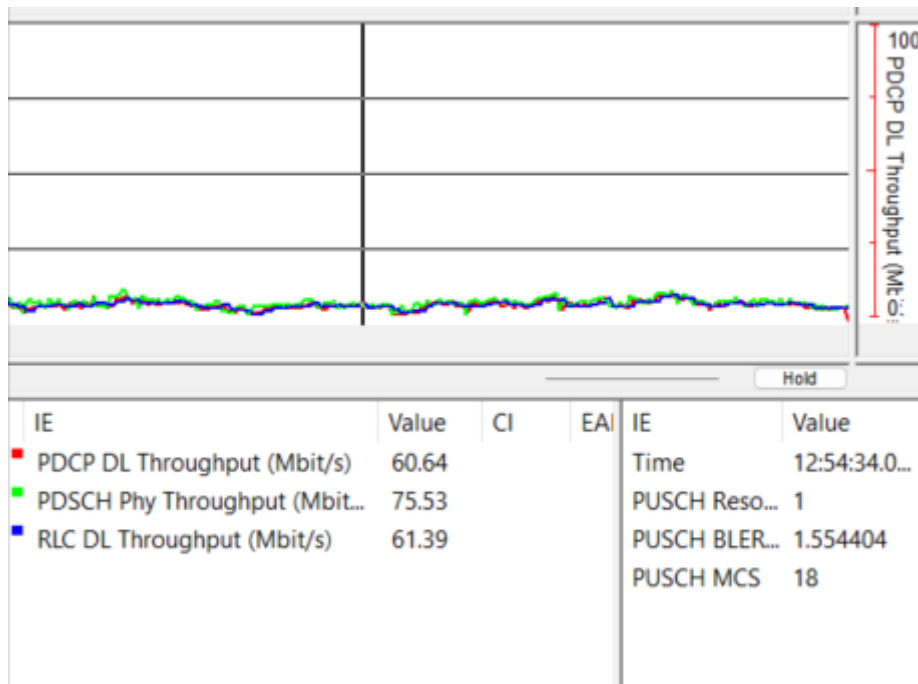
Slika 4.32. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja SINR-a za mobilnu mrežu MM2

Na slici 4.33. prikazana je statistička analiza RSRQ parametara za izmjerene signale u mobilnoj mreži MM2. Odličnom ocjenom se može ocijeniti samo mali broj vrijednosti (6,6%) koji je iznad -10 dB. Oko 35% izmjerenih signala se mogu ocijeniti dobrom ocjenom, a to su oni s vrijednostima RSRQ parametra između -10 dB i -15 dB. Najviše signala ima vrijednosti RSRQ parametra na granici između dobre i loše kvalitete signala, što se može vidjeti i u globalnom maksimumu na pripadnom histogramu.



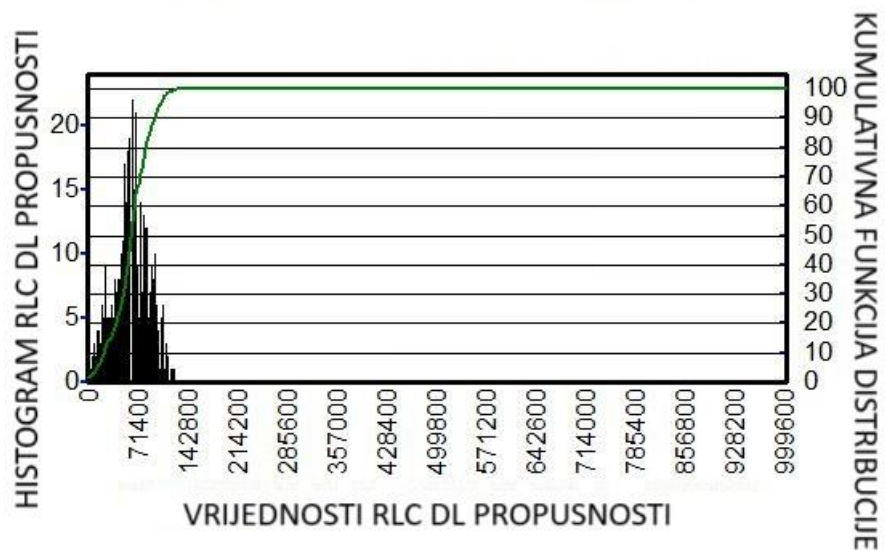
Slika 4.33. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RSRQ pokazatelja za mobilnu mrežu MM2

Za analizu propusnosti može se promatrati promjena u vremenu i kroz histograme i kumulativne funkcije distribucije. Na slici 4.34. se može vidjeti promjena propusnosti u vremenu. Tu se može primijetiti da je zelena krivulja u najvećem broju slučajeva iznad preostale dvije. To govori da je najčešće PDSCH Phy propusnost veća od PDCP DL i RLC DL propusnosti.

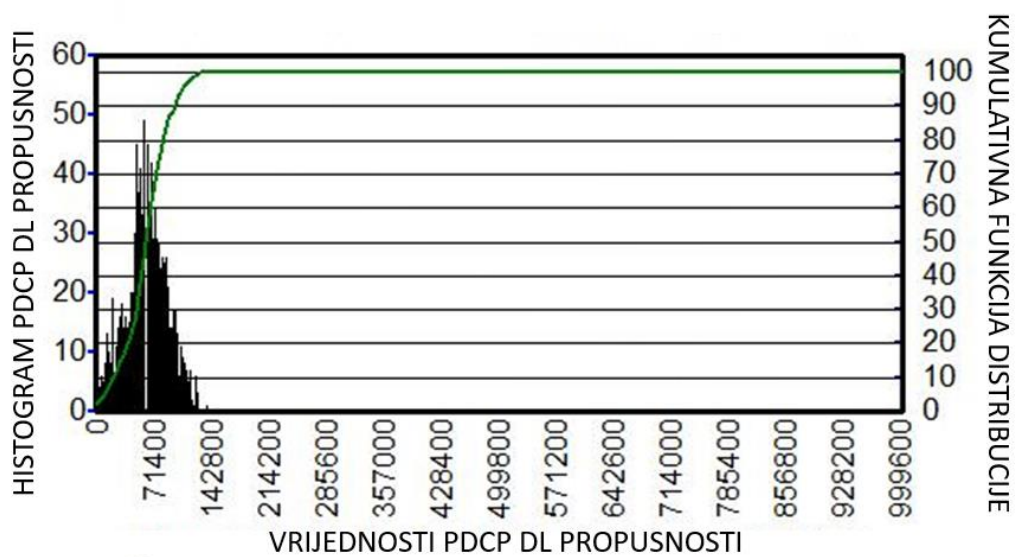


Slika 4.34. Promjena različitih vrsta propusnosti u vremenu

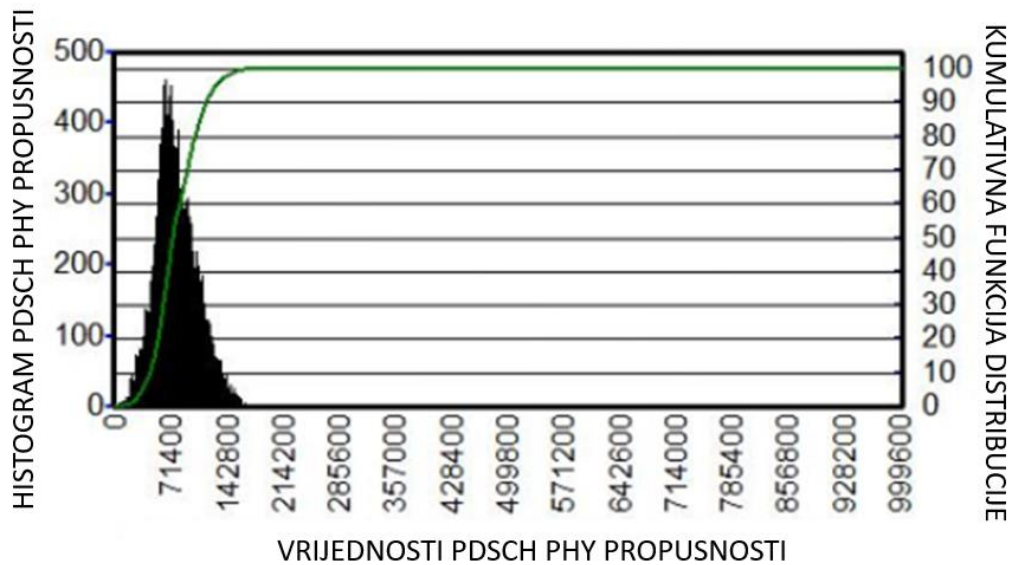
Na slici 4.35. je prikazan histogram i kumulativna funkcija distribucije vrijednosti RLC DL propusnosti za mjerenje u mreži MM2. Na slici se može vidjeti da je za velik broj mjerenih mjesta, oko 40% izmjerena propusnost veća od 70% Mbit/s. Slične se vrijednosti mogu vidjeti na grafovima za PDCP DL (slika 4.36.) i PDSCH Phy propusnost (slika 4.37.). Veće razlike između mjerenja navedenih propusnosti će se pokazati u analizi statističkih podataka kao što su srednja vrijednost i medijan.



Slika 4.35. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RLC DL propusnosti u mreži MM2



Slika 4.36. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja PDCP DL propusnosti u mreži MM2



Slika 4.37. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja PDSCH Phy propusnosti u mreži MM2

4.2.3. Analiza parametara za mobilnu mrežu MM3

Mjerenje parametara za mobilnu mrežu MM3 započelo je 15. siječnja 2024. godine u 12:47:28, a završilo istog dana u 12:55:23. Aktivnosti koje su se provodile su slanje *Get* poruke HTTP protokola, te skidanje se datoteka pod imenom 10GB_testfile.txt. Na slici 4.38. prikazani su bitni događaji u komunikaciji između mobilnog uređaja i bazne stanice. Za razliku od mobilnih mreža MM1 i MM2, u mreži MM3 nije bilo predaje poziva tijekom mjerenja, kao što se može vidjeti iz popisa događaja prikazanih na slici 4.38. Predaje poziva nije bilo jer poziv nije niti uspostavljen zbog neuspjeha u pokušajima uspostave veze i skidanja datoteke.

Time	Eq.	Event	Info
12:47:28.859	EQ1	Log Configuration ...	Log bank LTE extended
12:47:29.058	EQ1	Dedicated Mode	
12:47:38.968	EQ1	HTTP Start	URI: http://85.114.36.205/10GB_testfile.bt. URI Type: File download. Session Identit
12:47:39.153	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:47:39.154	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 1 ms.
12:47:39.154	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 0 ms.
12:47:39.154	EQ1	EPS RACH Conte...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 0 ms. ContentionResult Contention Passe
12:47:39.156	EQ1	EPS Transmissio...	Transmission mode changed to TM-4.
12:47:39.887	EQ1	GPS Position Valid	Position: Lat: 45.557957° N, Long: 18.678919° E
12:50:29.407	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:50:29.407	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 0 ms.
12:50:29.408	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 1 ms.
12:52:46.960	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:52:46.961	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 1 ms.
12:52:46.961	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 0 ms.
12:52:57.318	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:52:57.319	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 1 ms.
12:52:57.319	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 0 ms.
12:53:29.335	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:53:29.347	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 12 ms.
12:53:29.349	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 2 ms.
12:53:59.174	EQ1	EPS RACH Prea...	ChannelType: PRACH.
12:53:59.175	EQ1	EPS RACH Resp...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 1 ms.
12:53:59.177	EQ1	EPS RACH UE Id...	ChannelType: PRACH. MessageDelay: 2 ms.
12:55:22.547	EQ1	HTTP Error	Cause: , Operation canceled. Session Identity: 0. Time based measurement False
12:55:22.550	EQ1	HTTP End	Service Status: Stopped by User. Session Identity: 0. Time based measurement F

Slika 4.38. Događaji u komunikaciji između mobilnog uređaja i bazne postaje za mobilnu mrežu MM3

Unatoč što nema predaje poziva u popisu događaja, u prikazu poslužujućih ćelija dobivaju se ćelije s različitim identifikacijskim brojevima i s različitim frekvencijama u silaznoj vezi, kao što se može vidjeti na slikama 4.39. i 4.40.

IE	Value
Serving Cell Identity	225
Serving Cell Identity (Group)	75
Serving Cell Identity (Cell)	0
Serving Cell RRC Cell Identity	10343455
Serving Cell RRC Cell Identit...	40404
Serving Cell RRC Cell Identit...	31
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	219
Serving Cell MNC	2
Serving Cell TAC	12205
Serving Cell DL Bandwidth	20 MHz (100 RB)
Serving Cell DL EARFCN	2850
Serving Cell DL Frequency	2630.00
Serving Cell UL EARFCN	20850
Serving Cell UL Frequency	2510.00
Serving Cell Band	Band 7 (2600)
MME Group Id	50000
MME Code	152

Slika 4.39. Vrijednosti vezane za poslužujuću ćeliju identifikacijskog broja 225 i frekvencije silazne veze od 2630.00 MHz

IE	Value
Serving Cell Identity	7
Serving Cell Identity (Group)	2
Serving Cell Identity (Cell)	1
Serving Cell RRC Cell Identity	10349344
Serving Cell RRC Cell Identit...	40427
Serving Cell RRC Cell Identit...	32
Serving Cell Name	
Serving Cell MCC	219
Serving Cell MNC	2
Serving Cell TAC	12205
Serving Cell DL Bandwidth	20 MHz (100 RB)
Serving Cell DL EARFCN	2850
Serving Cell DL Frequency	2630.00
Serving Cell UL EARFCN	20850
Serving Cell UL Frequency	2510.00
Serving Cell Band	Band 7 (2600)
MME Group Id	50000
MME Code	152

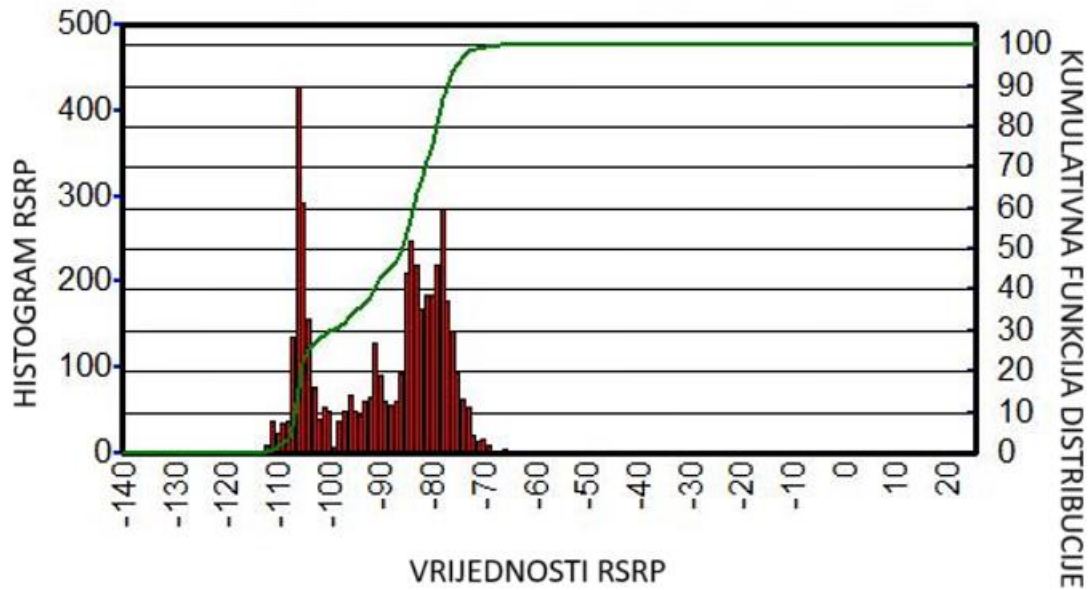
Slika 4.40. Vrijednosti vezane za poslužujuću ćeliju identifikacijskog broja 7 i frekvencije silazne veze od 2630.00 MHz

U statističkom izvješću za mjerene signale mobilne mreže MM3, nisu dani ključni pokazatelji uspješnosti RSSI i SINR. No oni koji su prikazani u statističkom izvješću, a to su RSRP i RSRQ parametri, su dovoljni za promatranje i ocjenjivanje kvalitete mjerenih signala. Promjena vrijednosti tih parametara u vremenu se može vidjeti na slici 4.41.



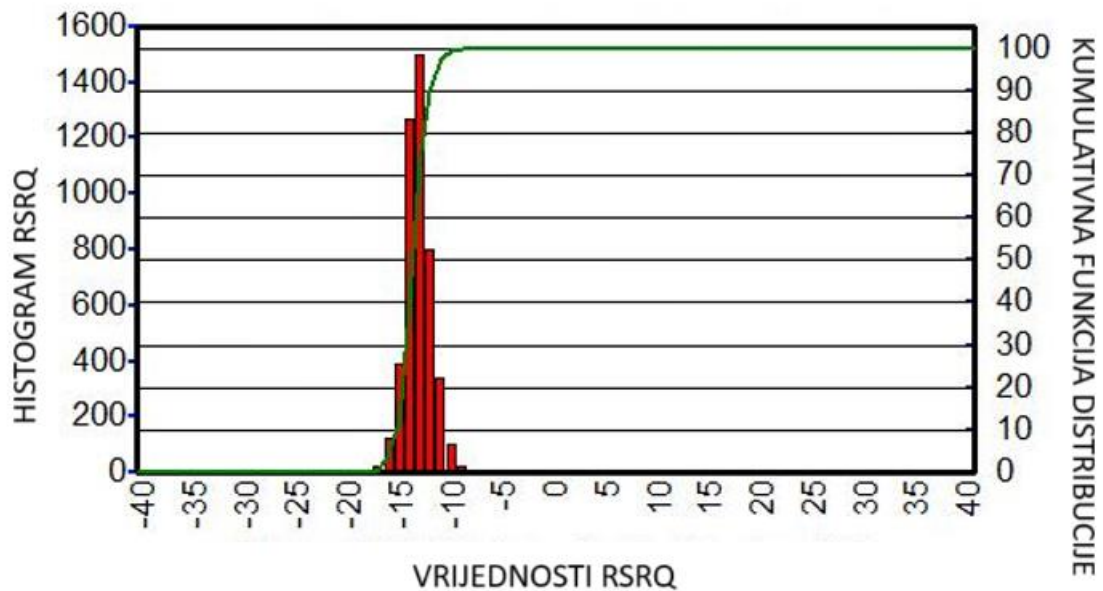
Slika 4.41. Vremenski prikaz (gornji graf) RSRP i RSRQ parametra za mobilnu mrežu MM3

Na slici 4.42. može se vidjeti da je relativno velik broj vrijednosti izmjenjenog signala, oko 60%, dobre ili odlične kvalitete, odnosno iznad -90 dBm. S druge strane, na slici se vidi i relativno velik broj izmjerenih vrijednosti, oko 28% (Prilog 3), slabe kvalitete koje se nalaze ispod -100 dBm.



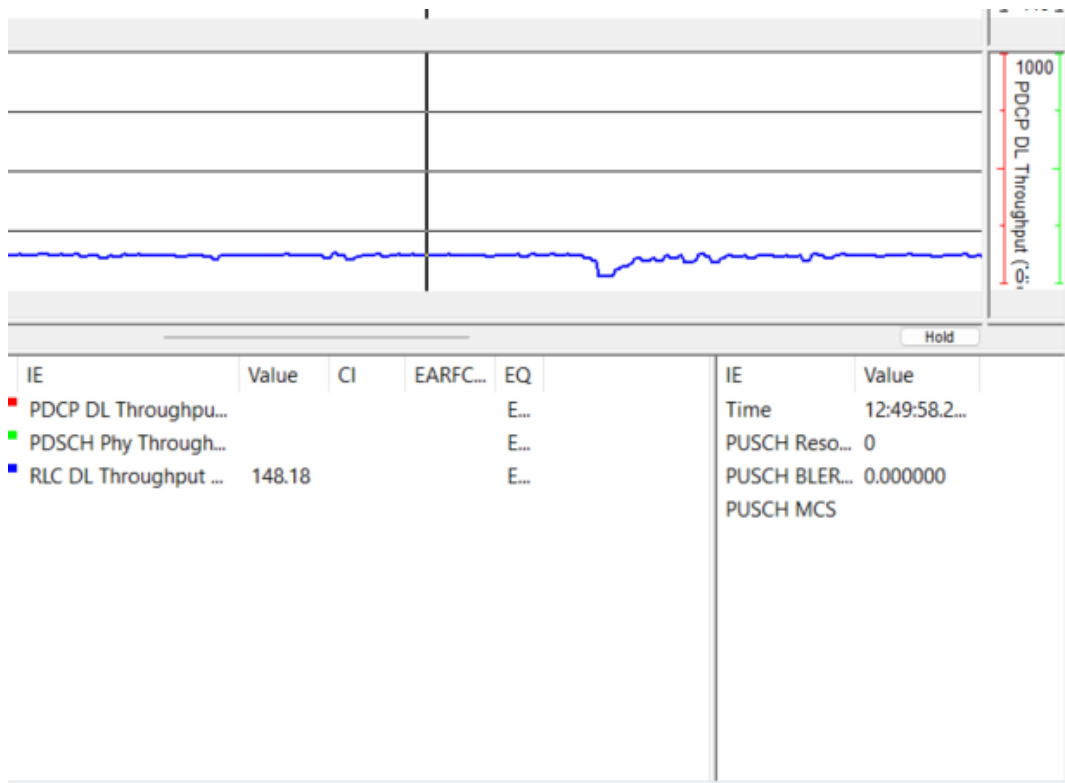
Slika 4.42. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RSRP pokazatelja za signal mobilne mreže MM3

Prema RSRQ parametru, velika većina izmjerenih vrijednosti je dobre kvalitete, kao što se može vidjeti na slici 4.43. jer većina RSRQ vrijednosti, oko 89%, se nalazi između -15 dB i -10 dB. Iznad -10dB je samo 2,7% (Prilog 3) izmjerenih RSRQ vrijednost.



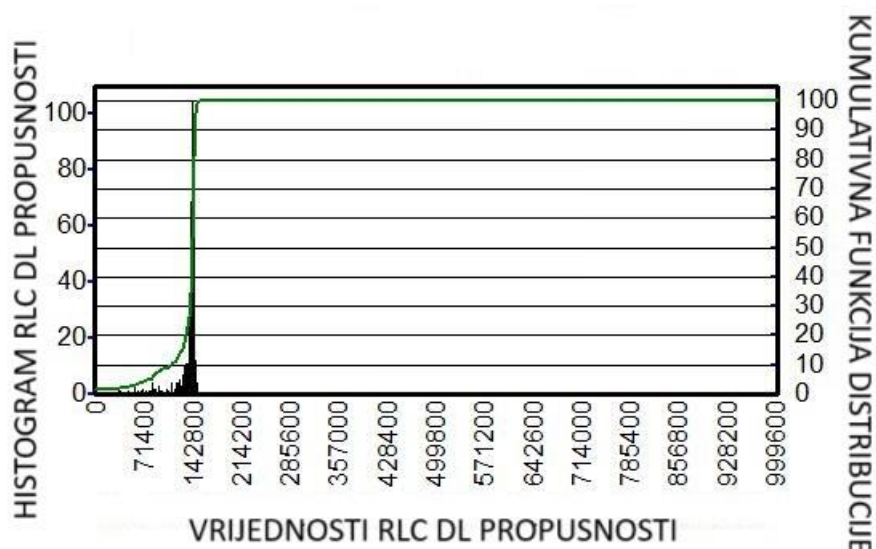
Slika 4.43. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RSRQ pokazatelja za mrežu MM3

Dvije vrste parametara propusnosti koje su bile prikazane za mobilne mreže MM1 i MM2 nije moguće dobiti za mobilnu mrežu MM3 te je samo moguće dobiti vrijednosti za RLC DL propusnost. Pripadna vremenska ovisnost je prikazana na slici 4.44.



Slika 4.44. Promjena vrijednosti RLC DL propusnosti u vremenu za mrežu MM3

Na slici 4.45. se može vidjeti histogram i kumulativna funkcija distribucije vrijednosti RLC DL propusnosti za izmjerene signale mobilne mreže MM3. Tu se može primijetiti da su vrijednosti propusnosti izrazito veće od vrijednosti izmjerenih za mreže MM1 i MM2. Najviše vrijednosti se nalazi na oko 140 Mbit/s, a kod mreža MM1 i MM2 samo manji broj izmjerenih propusnosti je premašivao 100 Mbit/s.



Slika 4.45. Histogram i kumulativna funkcija distribucije rezultata mjerenja RLC DL propusnosti signala mobilne mreže MM3

4.2.4. Usporedba statističkih podataka za mreže MM1, MM2 i MM3

Statističkom analizom su utvrđene određene razlike u kvaliteti izmjerenog signala za različite operatere. U prošlom potpoglavlju pojedinačno su proučene značajke i kvaliteta pojedinih pokazatelja uspješnosti za tri mobilne mreže, a u ovom poglavlju je napravljena usporedba pokazatelja za te tri mreže.

RSSI parametar za mreže MM1 i MM2 u 100%, odnosno 90% slučajeva ima vrijednost iznad -79 dBm što odgovara odličnoj kvaliteti. (tablica 4.1.). To zapravo govori da je jakost signala, pomiješana sa šumom i interferencijom, zadovoljavajuća. No time se ne dobiva informacija o jačini samog korisnog signala te o njegovoj kvaliteti. To se može vidjeti i iz rezultata za RSRP, SINR i RSRQ (tablice 4.2., 4.3. i 4.4.), gdje postotci izmjerenih vrijednosti u najvišem intervalu nisu veći od 30% (RSRP veći od -80 dBm za MM3), a za RSRQ to je svega par postotaka vrijednosti iznad -10 dB za sve operatere (tablica 4.4.)

Tablica 4.1. Usporedba RSSI vrijednosti za mobilne mreže MM1, MM2 i MM3

Mobilna mreža	Postotak RSSI signala manjih od -100 dBm	Postotak RSSI signala između -90 i -100 dBm	Postotak RSSI signala između -80 i -89 dBm	Postotak RSSI signala od -79 dBm
MM1	0 %	0 %	0 %	100 %
MM2	0 %	0 %	10 %	90 %

MM3	/	/	/	/
------------	---	---	---	---

Ako se usporede vrijednosti RSRP parametra za sve tri mobilne mreže (tablica 4.2.), može se zaključiti da je taj signal najbolji u MM1 mreži s 65% izmjerenih vrijednosti većih od -80 dBm, te samo 15% vrijednosti ispod -100 dBm. U MM2 mreži čak je 34% vrijednosti ispod -100 dBm, a u MM3 30% izmjerenih vrijednosti RSRP parametra.

Tablica 4.2. Usporedba RSRP vrijednosti za mreže MM1, MM2 i MM3

Mobilna mreža	Postotak RSRP vrijednosti manjih od -100 dBm	Postotak RSRP vrijednosti između -90 i -100 dBm	Postotak RSRP vrijednosti između -80 i -90 dBm	Postotak RSRP vrijednosti većih od -80 dBm
MM1	15 %	20 %	40 %	25 %
MM2	34 %	10 %	40 %	16 %
MM3	30 %	10 %	30 %	30 %

SINR parametar je izmjeren samo za MM1 i MM2 mreže, kako je dano u tablici 4.3. I po ovom parametru se može reći da je MM1 mreža bolja od MM2, zbog većeg postotka izmjerenih vrijednosti iznad 13 dB iako ima nešto veći postotak SINR vrijednosti manjih od 0 dB. Međutim, za izmjerene RSRQ vrijednosti (tablica 4.4.) MM1 mreža ima najlošiju razdiobu, s najviše (10%) vrijednosti ispod donjeg praga od -20 dB, te najmanji postotak (20%) RSRQ vrijednosti iznad -15 dB. Prema ovom parametru signal MM3 mreže ima najbolju kvalitetu u području u kojem je provedeno mjerenje.

Tablica 4.3. Usporedba SINR vrijednosti za mobilne mreže MM1, MM2 i MM3

Mobilna mreža	Postotak SINR vrijednosti manjih od 0 dB	Postotak SINR vrijednosti između 0 i 13 dB	Postotak SINR vrijednosti između 13 i 20 dB	Postotak SINR vrijednosti većih od 20 dB
MM1	7 %	43 %	20 %	20 %
MM2	2 %	68 %	20 %	10 %
MM3	/	/	/	/

Tablica 4.4. Usporedba RSRQ vrijednosti za mobilne mreže MM1, MM2 i MM3

Mobilna mreža	Postotak RSRQ vrijednosti manjih od -20 dB	Postotak RSRQ vrijednosti između -20 i -15 dB	Postotak RSRQ vrijednosti između -15 i -10 dB	Postotak RSRQ vrijednosti većih od -10 dB
MM1	10 %	70 %	17 %	3 %
MM2	0 %	67 %	26 %	7 %
MM3	0 %	10 %	87 %	3 %

Ako se uzmu u obzir sva četiri promatrana parametra, RSSI, RSRP, SINR i RSRQ, te formula (3-1), može se zaključiti da je signal u MM1 mreži najjači (prema RSSI i RSRP), ali i šum i interferencija (prema RSRQ). Ove zaključke podupiru i srednje vrijednosti i medijani ovih parametara prema tablici 4.5.

Tablica 4.5. Statistički podatci ključnih pokazatelja uspješnosti signala sva 3 operatera

Vrsta parametra	Mobilna mreža	Broj uzoraka	Srednja vrijednost	Medijan
RSSI	MM1	3379	-51.64 dBm	-50.00 dBm
	MM2	3695	-58.62 dBm	-56.00 dBm
	MM3	/	/	/
RSRP	MM1	6048	-89.13 dBm	-87.62 dBm
	MM2	6642	-92.63 dBm	-88.88 dBm
	MM3	4566	-90.13 dBm	-85.62 dBm
SINR	MM1	3381	12.33 dB	12.80 dB
	MM2	3699	10.70 dB	10.10 dB
	MM3	/	/	/
RSRQ	MM1	6048	-16.73 dB	-17.12 dB
	MM2	6642	-15.38 dB	-16.38 dB
	MM3	4566	-13.60 dB	-13.69 dB
RLC DL propusnost	MM1	358	78181.24 kbit/s	71396.06 kbit/s
	MM2	392	63941.16 kbit/s	64912.26 kbit/s
	MM3	373	135864.58 kbit/s	145007.44 kbit/s
PDCP DL propusnost	MM1	912	78039,03 kbit/s	71516,05 kbit/s
	MM2	1002	63774,19 kbit/s	64312,86 kbit/s

	MM3	/	/	/
PDSCH Phy propusnost	MM1	8889	97796,62 kbit/s	90935,66 kbit/s
	MM2	11147	81788,42 kbit/s	78527,89 kbit/s
	MM3	/	/	/

Propusnosti se može usporediti prema pripadnim srednjim vrijednostima. Najveća je kod PDSCH Phy propusnosti jer je ta propusnost vezana za najniži fizički sloj komunikacije i shodno tome ima najmanje zaglavlja vezanih za sebe. Nadalje, RLC propusnost je sljedeća po veličini te nakon toga ide PDCP propusnost. PDCP ima najmanju propusnost jer se mjeri na najvišem protokolu u stogu sa slike 3.11.

5. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu bio je cilj istražiti ključne pokazatelje uspješnosti 4G mobilne mreže te na temelju nekih od njih napraviti konkretnu analizu nad stvarnim podacima iz mjerenja. Napravljena je statistička analiza pomoću programskog alata TEMS Investigation te su proučeni i uspoređeni rezultati na temelju mjerenja signala tri različita operatera.

Postoji velik broj spomenutih pokazatelja koje operatori prate kako bi uočili nepravilnosti u radu mreže te ih ispravili ili proveli unaprjeđenje kvalitete usluge. U ovom je diplomskom radu za analizu odabrano 7 pokazatelja uspješnosti zbog njihove dostupnosti u provedenim mjerenjima, te raširenosti u primjeni. To su RSSI, RSRP, SINR, RSRQ, RLC DL propusnost, PDSCH Phy propusnost i PDCP DL propusnost.

Analiza navedenih parametara provedena je u programskom alatu TEMS Investigation, na temelju statističkih izvješća koja prikazuju histogram frekvencije pojavljivanja određenih vrijednosti parametara i funkciju distribucije izmjerenih vrijednosti. Na temelju analize statističkih izvješća i pripadnih grafova utvrđeno je da se prema nekim parametrima, kao što su RSRP i CINR, moglo zaključiti da je signal u MM1 mreži najbolje ocjenjen, dok je prema RSRQ to bio signal u mreži MM3. S gledišta propusnosti, ona je najveća za mobilnu mrežu MM3, no to se odnosi samo na RLC DL propusnost. Ostale dvije vrste propusnosti, PDCP DL i PDSCH Phy, nisu izmjerene za tu mrežu. Isto tako za MM3 mrežu nije uspostavljena veza i skidanje potrebne datoteke, te uspoređujući propusnosti samo one dvije mreže koje su skidale potrebnu datoteku može se vidjeti prema srednjim vrijednostima da su vrijednosti propusnosti za mrežu MM1 veće od istih vrijednosti za mrežu MM2.

Za iscrpnu analizu ključnih pokazatelja uspješnosti potrebno je provesti mjerenje većeg broja različitih parametara generiranjem prometa s različitim aplikacijama (kao što su video strujanje, prijenos podataka u uzlaznoj vezi i dr.), no zbog ograničenja dostupnih mjerenja te nedostatka uređaja za mjerenje, u okviru ovog diplomskog rada analiza nije mogla biti provedena za više pokazatelja uspješnosti.

LITERATURA

- [1] A. L. Imoize, K. Orolu i A.A.A. Atayero, "Analysis of key performance indicators of a 4G LTE network based on experimental data obtained from a densely populated smart city", Dana in Brief, Elsevier, br. 105304, vol. 29, str. od 1 do 17, veljača 2020.
- [2] Oje A. A. i S. O. Edeki, „KPI measurements on the 4G network within the University of Ilorin“, International Conference on Recent Trend in Applied Research (ICoRTAR), sv. 1734, str. od 1 do 12, Nigeria, 2020.
- [3] D. Lukić, M. Koprivica, N. Nešković i A. Nešković, "Experimental performance analysis of THE 2G/3G/4G public mobile network," in 2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR), str. od 1 do 4, studeni 2016.
- [4] Z. Shakir, A. Yaseen Mjhood, A. Al-Thaedan, A. Al-Sabbagh, R. Alsabah, „Key performance indicators analysis for 4 G-LTE cellular networks based on real measurements“, International Journal of Information Technology, br. 15, sv. 4, str. od 1 do 9, ožujak 2023.
- [5] M. Skocaj, A. Orsi, F. Franchini, R. Verdone, „A KPI-Based Self-Optimization Algorithm for Inter-Frequency Handover in 4G/5G Networks“, 2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit: Radio Access and Softwarisation, str. od 217 do 222, Italija, 2021.
- [6] J. Shodamola, U. Masood, M. Manalastas, A. Imran, „A Machine Learning based Framework for KPI Maximization in Emerging Networks using Mobility Parameters“, IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking, str. od 1 do 6, AI4Networks Research Center, Dept. of Electrical & Computer Engineering, University of Oklahoma, SAD, 2020.
- [7] M. Y. Wu, Y. H. Lin, T. H. Tseng, C. M. Hsu, K. S. Hsu, H. C. Young, „A QoS Monitoring System for LTE small cells“, Chunghwa Telecom Laboratories, Taoyuan, Taiwan, 2018.
- [8] S. Aoki, K. Shiimoto, C. Lam, „Few-Shot Learning and Self-Training for eNodeB Log Analysis for Service-Level Assurance in LTE Networks“, IEEE Transactions on Network and Service Management, br. 4., sv. 17, prosinac 2020.
- [9] R. Enami, S. Gupta, D. Rajan, J. Camp, „LAIK: Location-Specific Analysis to Infer Key Performance Indicators“, IEEE Transactions on Vehicular Technology, br. 5, sv. 70., str. od 4406 do 4418, svibanj 2021.
- [10] A. G. B. Colpitts, B. R. Petersen, „Short-Term Multivariate KPI Forecasting in Rural Fixed Wireless LTE Networks“, IEEE Networking Letters, br. 1, sv. 5., str od 11 do 15, ožujak 2023.

- [11] A. G. B. Colpitts, B. R. Petersen, „Unsupervised Anomaly Detection for Rural Fixed Wireless LTE Networks“, IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, br. 4, sv. 46., str. od 256 do 261, 2023.
- [12] R. Galazzo, „Timeline from 1G to 5G: A Brief History on Cell Phones“ [online], CENGN, 2022., dostupno na: <https://www.cengn.ca/information-centre/innovation/timeline-from-1g-to-5g-a-brief-history-on-cell-phones/> [25.03.2024.]
- [13] H. Kheddar, „From 2G to 4G Mobile Network: Architecture and Key Performance Indicators“, Department of Electrical engineering, University of Medea, listopad 2022.
- [14] S. Ndungu, E. Mixon, „GSM (Global System for Mobile Telecommunication)“, TechTarget, 2020., dostupno na: <https://www.techtarget.com/searchmobilecomputing/definition/GSM> [28.03.2024.]
- [15] A. Eisenblatter, H. Geerdes, M. Grotchel, „Planning UMTS Radio Networks“, OR/MS Today, prosinac 2008.
- [16] REPORT ITU-R M.2134, „Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)“, 2008.
- [17] Christopher Cox, „An introduction to LTE“, Second edition, Wiley, UK, 2014.
- [18] H. Taoka, S. Nagata, K. Takeda, Y. Kakishima, X. She, K. Kusume, MIMO and CoMP in LTE-Advanced, NTT DOCOMO Technical Journal, br. 2, sv. 12, str. od 20 do 28, 2010.
- [19] ETSI TS 132 455 v16.0.0., „LTE; Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI), for the Evolved Packet Core (EPC); Definitions (3GPP TS 32.455 version 16.0.0 Release 16)“, 2020.
- [20] ETSI TS 132 450 v16.0.0., „Universal Mobile Telecommunication System (UMTS); LTE; Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN): Definitions (3GPP TS 32.450 version 16.0.0 Release 16)“, 2020.
- [21] ETSI TS 136 214 v14.2.0., „LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (3GPP TS 36.214 version 14.2.0 Release 14)“, 2017.
- [22] LTE RSSI, RSRP and RSRQ Measurement: RSRP and RSRQ Measurement in LTE [online], Wireless Excellence Limited, 2024., dostupno na: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/rsrp-rsrq-measurement-lte/> [28.08.2024.]

SAŽETAK

U današnje vrijeme u širokoj uporabi su 4G mobilne mreže te je stoga za praćenje i kontinuirano poboljšavanje kvalitete usluge potrebno mjeriti i analizirati ključne pokazatelje uspješnosti. U ovom diplomskom radu analizirani su odabrani pokazatelji uspješnosti primjenom TEMS Investigation programskog alata. Nad izmjerenim podacima u mobilnim mrežama tri operatera provedena je statistička analiza korištenjem histograma i kumulativne funkcije distribucije relevantnih ključnih pokazatelja uspješnosti 4G mobilne mreže. U ovom diplomskom radu ključni pokazatelji uspješnosti koji se koriste u analizi su pokazatelji jakosti i kvalitete signala te pokazatelji vezani za propusnost. Usporedbom rezultata za tri operatera uočeno je da je srednja jakost signala, kvaliteta signala te propusnost značajno veća za mrežu MM3 u odnosu na druge dvije mreže za koje je provedena analiza.

Ključne riječi: 4G mobilna mreža, LTE, ključni pokazatelji uspješnosti, E-UTRAN

ANALYSIS OF 4G MOBILE NETWORK KEY PERFORMANCE INDICATORS

ABSTRACT

Nowadays, 4G networks are in widespread use and because of that it is important to monitor and continually improve quality of service so key performance indicators can be measured and analyzed. In this thesis certain key performance indicators were analyzed using TEMS Investigation program. Statistical analysis has been conducted on measured data of the three different mobile network operators using histograms and cumulative distribution functions of the relevant key performance indicators for 4G networks. In this thesis key performance indicators used in analysis are indicators of strength and quality of signal as well as indicators of throughput. By comparing these results it can be observed that signal strength, quality of signal and throughput is noticeably higher for mobile network MM3 than other two mobile networks where the analysis has been conducted.

Keywords: 4G mobile network, LTE, key performance indicators, E-UTRAN

PRILOZI

Prilog 1 - Statistički podaci za mrežu MM1

Information Element	Threshold value	% of meas.	#[no. of]	Average duration (hh:mm:ss)	#Cell	#Log
CQI Code word 0 Arg[1]	<5	0.7	23	00:00:00.14	-	1
CQI Code word 0 Arg[1]	<7	2.1	58	00:00:00.19	-	1
CQI Code word 1 Arg[1]	<5	31.5	272	00:00:00.54	-	1
CQI Code word 1 Arg[1]	<7	32.7	271	00:00:00.56	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[1]	<-110	0.6	2	00:00:00.92	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[1]	<-90	40.0	42	00:00:04.06	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[2]	<-110	3.4	11	00:00:01.72	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[2]	<-90	57.3	44	00:00:05.69	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[3]	<-110	3.6	3	00:00:14.97	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[3]	<-90	70.0	24	00:00:13.18	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[1]	<-17	70.0	32	00:00:10.73	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[1]	<-15	86.0	24	00:00:16.71	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[2]	<-17	78.5	36	00:00:10.24	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[2]	<-15	98.6	11	00:00:41.05	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[3]	<-17	95.6	18	00:00:24.61	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[3]	<-15	99.8	3	00:02:30.75	-	1
PDSCH BLER (%) Arg[1]	> 10	30.1	4749	00:00:00.02	-	1
PDSCH BLER (%) Arg[1]	> 5	39.9	5409	00:00:00.03	-	1
PUSCH BLER (%)	> 3	3.9	7	00:00:02.56	-	1
PUSCH BLER (%)	> 2	4.6	6	00:00:03.49	-	1
Serving Cell RS CINR (dB) Arg[1]	<0	6.8	71	00:00:00.44	-	1
Serving Cell RSRP (dBm) Arg[1]	<-110	2.4	19	00:00:00.54	-	1
Serving Cell RSRP (dBm) Arg[1]	<-90	33.4	28	00:00:05.34	-	1
Serving Cell RSRP Tx1 Rx1 (dBm) Arg[1]	<-110	4.1	14	00:00:01.38	-	1
Serving Cell RSRP Tx1 Rx1 (dBm) Arg[1]	<-90	33.7	29	00:00:05.28	-	1
Serving Cell RSRP Tx1 Rx2 (dBm) Arg[1]	<-110	2.7	14	00:00:00.87	-	1
Serving Cell RSRP Tx1 Rx2 (dBm) Arg[1]	<-90	45.0	71	00:00:02.88	-	1
Serving Cell RSRQ (dB) Arg[1]	<-12	91.9	128	00:00:03.28	-	1
Serving Cell RSRQ (dB) Arg[1]	<-10	96.8	69	00:00:06.42	-	1

Prilog 2 – Statistički podaci za mrežu MM2

Information Element	Threshold value	% of meas.	#[no. of]	Average duration (hh:mm:ss)	#Cell	#Log
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[1]	< -110	5.5	9	00:00:04.42	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[1]	< -90	38.1	18	00:00:10.18	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[1]	< -17	64.2	63	00:00:05.21	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[1]	< -15	78.8	53	00:00:07.68	-	1
Neighbor Cell Channel RSSI (dBm) Arg[2]	< -80	40.0	1	00:00:00.13	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[2]	< -110	16.1	22	00:00:04.58	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[2]	< -90	51.1	52	00:00:04.76	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[2]	< -17	80.3	75	00:00:05.46	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[2]	< -15	89.2	43	00:00:10.88	-	1
Neighbor Cell Channel RSSI (dBm) Arg[3]	< -80	95.3	2	00:00:31.59	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[3]	< -110	26.6	53	00:00:02.72	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[3]	< -90	63.7	67	00:00:04.32	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[3]	< -17	84.1	115	00:00:03.97	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[3]	< -15	89.6	84	00:00:05.85	-	1
Serving Cell RSSI (dBm) Arg[1]	< -80	6.6	31	00:00:01.15	-	1
Serving Cell RSRP (dBm) Arg[1]	< -110	8.4	31	00:00:01.37	-	1
Serving Cell RSRP (dBm) Arg[1]	< -90	43.6	42	00:00:05.25	-	1
Serving Cell RSRP Tx1 Rx1 (dBm) Arg[1]	< -110	12.3	27	00:00:02.26	-	1
Serving Cell RSRP Tx1 Rx1 (dBm) Arg[1]	< -90	54.6	60	00:00:04.57	-	1
Serving Cell RSRP Tx1 Rx2 (dBm) Arg[1]	< -110	12.3	25	00:00:02.51	-	1
Serving Cell RSRP Tx1 Rx2 (dBm) Arg[1]	< -90	45.6	40	00:00:05.72	-	1
Serving Cell RSRQ (dB) Arg[1]	< -12	78.5	84	00:00:04.62	-	1
Serving Cell RSRQ (dB) Arg[1]	< -10	93.4	105	00:00:04.43	-	1
Serving Cell RSRQ Tx1 Rx1 (dB) Arg[1]	< -12	83.7	83	00:00:05.02	-	1
Serving Cell RSRQ Tx1 Rx1 (dB) Arg[1]	< -10	94.8	62	00:00:07.63	-	1
Serving Cell RSRQ Tx1 Rx2 (dB) Arg[1]	< -12	81.6	88	00:00:04.62	-	1
Serving Cell RSRQ Tx1 Rx2 (dB) Arg[1]	< -10	94.9	69	00:00:06.85	-	1
Serving Cell RS CINR (dB) Arg[1]	< 0	1.8	25	00:00:00.32	-	1
UE PUCCH Tx Power (dBm)	< 0	76.7	64	00:00:06.08	-	1

Prilog 3 – Statistički podaci za mrežu MM3

Information Element	Threshold value	% of meas.	#[no. of]	Average duration (hh:mm:ss)	#Cell	#Log
Neighbor Cell Channel RSSI (dBm) Arg[1]	< -80	10.3	2	00:00:01.01	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[1]	< -110	2.6	28	00:00:00.71	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[1]	< -90	39.1	124	00:00:01.48	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[1]	< -17	31.0	187	00:00:00.94	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[1]	< -15	57.3	209	00:00:01.43	-	1
Neighbor Cell Channel RSSI (dBm) Arg[2]	< -80	28.6	3	00:00:00.05	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[2]	< -110	4.8	51	00:00:00.72	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[2]	< -90	48.5	131	00:00:01.77	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[2]	< -17	60.9	261	00:00:01.16	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[2]	< -15	79.9	179	00:00:02.17	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[3]	< -110	5.6	29	00:00:01.31	-	1
Neighbor Cell RSRP (dBm) Arg[3]	< -90	55.0	77	00:00:03.46	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[3]	< -17	55.4	196	00:00:01.45	-	1
Neighbor Cell RSRQ (dB) Arg[3]	< -15	76.1	127	00:00:02.93	-	1
Serving Cell RSRP (dBm) Arg[1]	< -110	1.1	9	00:00:00.55	-	1
Serving Cell RSRP (dBm) Arg[1]	< -90	41.2	16	00:00:11.96	-	1
Serving Cell RSRQ (dB) Arg[1]	< -12	72.3	107	00:00:03.08	-	1
Serving Cell RSRQ (dB) Arg[1]	< -10	97.3	22	00:00:20.87	-	1
PUSCH BLER (%)	> 3	25.3	342	00:00:00.37	-	1
PUSCH BLER (%)	> 2	26.2	347	00:00:00.37	-	1

Events

ŽIVOTOPIS

Nikola Danilović rođen je u Vukovaru 1. kolovoza 1998. godine. Pohađao je Osnovnu školu Tenja, nakon koje upisuje 3. gimnaziju u Osijeku 2013. godine. Nakon završetka srednje škole 2017. godine upisuje preddiplomski studij Elektrotehnika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku kojeg završava 2020. godine i time stječe status prvostupnika inženjera elektrotehnike. Iste godine upisuje sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika.