ANALIZA PERFORMANSI PODATKOVNIH USLUGA ZA RAZLIČITA PROMETNA OPTEREĆENJA U JAVNOJ POKRETNOJ MREŽI SUSTAVA LTE

Čolak, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Algebra University College / Visoko učilište Algebra**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:225:063390

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

ALGEBRA VISOKO UČILIŠTE

Repository / Repozitorij:

Algebra Univerity College - Repository of Algebra Univerity College

zir.nsk.hr

dabar DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VISOKO UČILIŠTE ALGEBRA

ZAVRŠNI RAD

ANALIZA PERFORMANSI PODATKOVNIH USLUGA ZA RAZLIČITA PROMETNA OPTEREĆENJA U JAVNOJ POKRETNOJ MREŽI SUSTAVA LTE

Karlo Čolak

Zagreb, siječanj 2020.

Student vlastoručno potpisuje Završni rad na prvoj stranici ispred Predgovora s datumom i oznakom mjesta završetka rada te naznakom:

„Pod punom odgovornošću pismeno potvrđujem da je ovo moj autorski rad čiji niti jedan dio nije nastao kopiranjem ili plagiranjem tuđeg sadržaja. Prilikom izrade rada koristio sam tuđe materijale navedene u popisu literature, ali nisam kopirao niti jedan njihov dio, osim citata za koje sam naveo autora i izvor, te ih jasno označio znakovima navodnika. U slučaju da se u bilo kojem trenutku dokaže suprotno, spreman sam snositi sve posljedice uključivo i poništenje javne isprave stečene dijelom i na temelju ovoga rada“.

U Zagrebu, 18.01.2020.

Karlo Čolak

Predgovor

Zahvala mentoru dr. sc. Albertu Tekoviću koji me je prije svega i uveo u područje mobilnih mrežnih tehnologija, tj. bežičnih računalnih mreža. Na taj način dodatno je proširio moje vidike i znanja u IT i ICT području koja su mi također pomogla u povezivanju ostalih znanja dobivenih za vrijeme studiranja. Isto tako mi je omogućio mjernu opremu i usmjerio me prema važnostima pisanja završnog rada. Vjerujem da će to pridonijeti mojem daljnjem usmjeravanju i razvijanju kao budućem inženjeru računarstva.

Prilikom uvezivanja rada, Umjesto ove stranice ne zaboravite umetnuti original potvrde o prihvaćanju teme završnog rada kojeg ste preuzeli u studentskoj referadi

Sažetak

Podatkovni promet u mobilnim mrežama od dolaska iPhone-a na tržište 2007. godine bilježi eksponencijalni rast čija je kvaliteta podatkovnih usluga uspješno održana, unatoč godišnjem rastu u rasponu od 80% do 100% u zadnjih nekoliko godina. Cilj ove teme je analizirati kako se uslijed različitog kapacitivnog opterećenja mijenja korisničko iskustvo u javnim mobilnim mrežama gdje će se najviše pozornosti dati periodu maksimalnog opterećenja – Busy hour (BH) te periodu minimalnog opterećenja – non Busy hour (nonBH). Koristit će se prometni statistički pokazatelji te podaci s crowdsource alata dok će terenskim mjerenjima ti podaci biti dodatno provjereni.

Rezultati ovoga rada dat će odgovor na pitanje hoće li u vremenskom okviru dok se uvodi slijedeća tehnološka nadogradnja javnih mobilnih mreža sustavom 5G, postojeće komercijalne mreže imati dovoljno kapacitivne zalihosti za održavanje korisničkog podatkovnog iskustva na zadovoljavajućoj razini.

Ključne riječi: podatkovni promet, mobilne mreže, rast, kapacitivno opterećenje, BH, nonBH, crowdsource, terenska mjerenja, 5G, kapacitivna zalihost.

Summary

Mobile data traffic has grown exponentially since the arrival of the iPhone in 2007, whose data service quality has been maintained successfully despite annual growth ranging from 80% to 100% in recent years. The aim of this topic is to analyze how, due to different capacitive load, the user experience in public mobile networks is changing with the most attention being given to the maximum load period – Busy hour (BH) and the minimum load period – non Busy hour (nonBH). Traffic statistics and crowdsource data will be used, while field measurements will be further verified.

The result of this research will answer the question will it, within the timeframe, while introducing the next technological upgrade of 5G public mobile networks, existing commercial networks have sufficient capacitive redundancy to maintain the user data experience at a satisfactory level.

Key words: data traffic, mobile networks, growth, capacitive load, BH, nonBH, crowdsource, field measurements, 5G, capacitive redundancy.

Sadržaj

1. Uvod 1

2. Javna pokretna mreža sustava LTE 2

2.1. Arhitektura 3

2.2. Pregled radijskog sučelja 7

2.3. Frekvencijski spektri i kapacitet 8

2.4. Definiranje vremenskih okvira 13

2.4.1. Najprometniji sat ili BusyHour 14

2.4.2. Zahtjevi korisnika 15

3. Analiza statističkih podatkovnih pokazatelja 16

3.1. Tipovi mjerenja prometa – aktivno i pasivno mjerenje 16

3.2. Crowdsource izvori 18

3.2.1. HAKOMetar Plus 18

3.2.2. Speedtest by Ookla 22

3.2.3. RTR-NetTest 24

4. Terenska mjerenja 27

4.1. Planiranje lokacija 27

4.2. Definiranje vremenskih okvira 28

4.3. Opis mjerne opreme 28

4.4. Opis mjerenja 30

4.5. Analiza provedenih mjerenja 33

Zaključak 39

Popis kratica 40

Popis slika 42

Literatura 44

1. Uvod

Pojavom treće generacije mobilnih uređaja, započeo je eksponencijalni rast korištenja podatkovnog prometa koji slovi kao dominantna vrsta prometa u telekomunikacijskim mrežama nove generacije. Tu se javlja problem uvijek mogućeg nedostatka kapacitivne zalihosti koja može uzrokovati nekonzistentnost usluge kao i nezadovoljstvo korisnika. Cilj je proučiti razlike u kapacitivnom opterećenju unutar različitih vremenskih intervala, tj. istražiti postoji li značajna razlika u opterećenju mreža mobilnog podatkovnog prometa kada je koncentracija korisnika mobilnih usluga najveća i za vrijeme kada je ona znatno manja. Pritom će se istraživanje bazirati na analizi prometnih statističkih pokazatelja mrežnog operatora, zatim na podacima iz crowdsource alata te na kraju i na terenskim mjerenjima koja će najsigurnije potvrditi činjenicu postojanja te razlike kao i najbolju sliku trenutne opterećenosti koja se dalje može pretočiti u rješenje ili izbjegavanje potencijalnih problema.

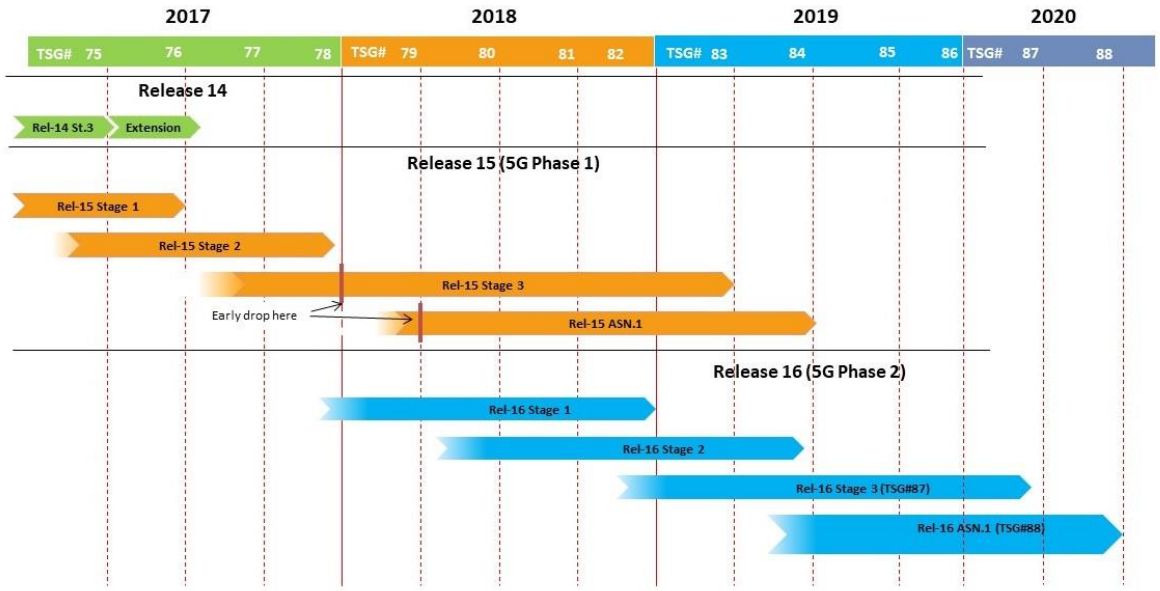
Ericssonovo izvješće o mobilnosti [1] pruža projekcije i analize najnovijih trendova u mobilnoj industriji vezane uz mobilne pretplate, podatkovni promet i njegovu svjetsku pokrivenost čiji se podaci i prognoze temelje na mrežnim mjerenjima, kako onih prošlih tako i trenutnih. U njihovom zadnjem izvještaju iz studenog 2019. godine navodi se kako je samo u zadnjem kvartalu izmjeren 61 milijun novih mobilnih pretplata što dovodi do brojke od oko 8 milijardi mobilnih pretplata u svijetu od čega se 52% podatkovnog prometa šalje LTE mrežom dok se do kraja 2025. očekuje 2,6 milijardi novih 5G pretplata. Što se tiče samih uređaja koji podržavaju 5G tehnologiju, prognoza je da će do kraja 2020. godišnja isporuka 5G uređaja dostići 160 milijuna jedinica. Ono što najviše privlači pozornost je da podatkovni promet u mobilnim mrežama konstantno raste u velikim poskocima. Tako je od zadnjeg kvartala 2018. do zadnjeg kvartala 2019. godine rast podatkovnog prometa u mobilnim mrežama iznosio velikih 68% na što su značajan utjecaj imale Indija i Kina, jedne od najmnogoljudnijih zemalja svijeta, svojim novim pretplatama i porastom korištenja podatkovnog prometa po jedinici uređaja. Treba napomenuti i da je očekivani godišnji rast podatkovnog prometa između 2019. i 2025. oko 27% od čega većina odlazi na video promet. Ostalo je još naglasiti kako je potencijalna svjetska pokrivenost 4G signalom predviđena na preko 90% u 2025. dok se pokrivenost 5G signalom očekuje na između 55% i 65% do kraja 2025. godine što bi značilo najbržu implementaciju mobilne mreže do sada.

2. Javna pokretna mreža sustava LTE

LTE ili *Long Term Evolution* smatra se tehnologijom četvrte generacije, odakle i potječe popularni naziv 4G, koja nam nudi znatno brže usluge mobilne širokopojasne mreže koje su bile moguće uz pomoć prethodnih 3G (HSPA+) i 2G mrežnih tehnologija, a opisan je u setu otvorenih specifikacija koje je objavio 3GPP (engl. *3rd Generation Partnership Project*). LTE je prvi put predstavljen unutar 3GPP standarda evolucije *Release 8* 2008. godine kao širokopojasna ćelijska tehnologija koja premašuje potrebe IMT-2000 (engl. *International Mobile Telecommunications*) [2] u kojoj su glavni ciljevi bili sljedeći:

- pojednostaviti arhitekturu, a ona je dobivena pojavom *System Arhitecture Evolution* (SAE) koja je jednostavna, IP bazirana arhitektura mreže
- smanjiti trošak po bitu prenesene informacije čime su dobili efikasnosti korištenja frekvencijskog spektra
- osigurati primjerenu potrošnju baterije uređaja čime su dobili ekonomičnu potrošnju snage po bitu prenesene informacije
- fleksibilno korištenje frekvencijskih pojasa postojećih GSM, UMTS ili bilo kojeg novog spektra [3]

Na slici 2.1 prikazan je tijek 3GPP specifikacija koji su usko vezani uz prijelaz s trenutno najzastupljenije četvrte tehnologije na najnoviju petu tehnologiju, 5G.

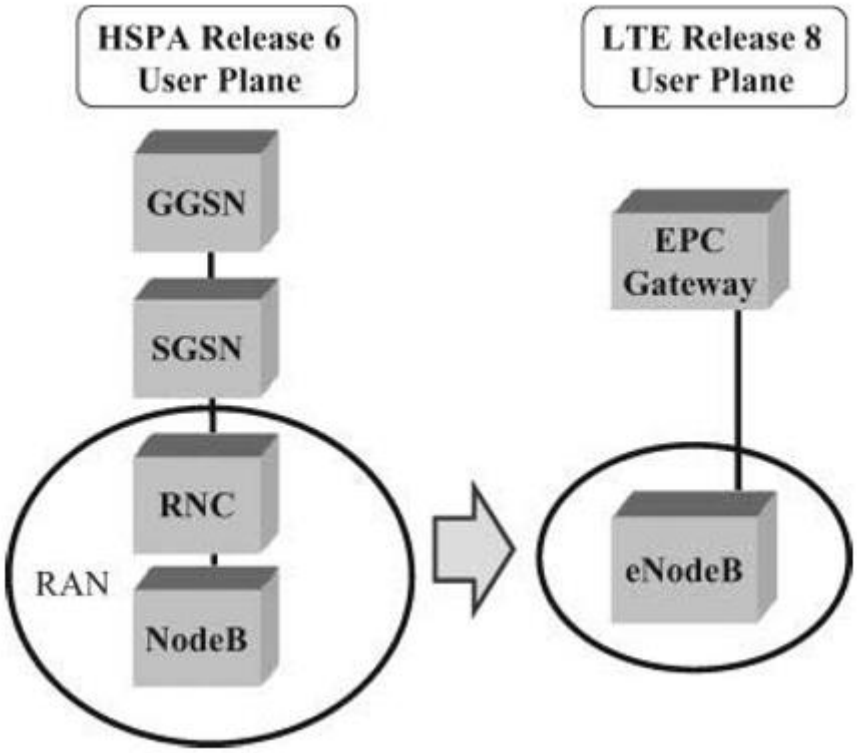


Slika 2.1 3GPP izdanja vezana za LTE i 5G [4]

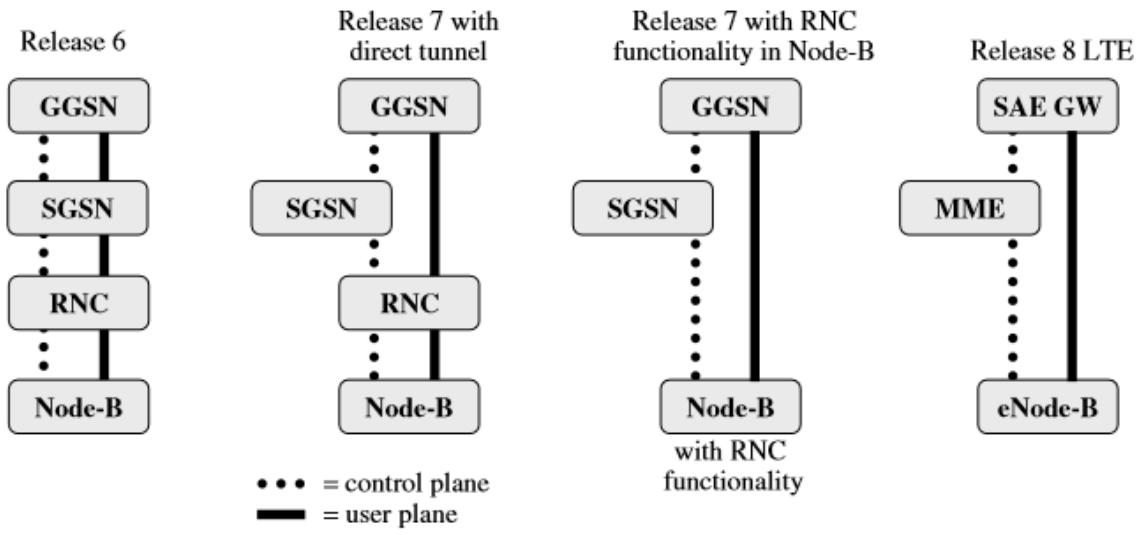
Osim gore navedenih ključnih mogućnosti, postavljeni su i neki zahtjevi za LTE sustave među kojima su visoke brzine prijenosa podataka za silaznu (>100 Mbps – *downlink,* DL*)* i uzlaznu vezu (>50 Mbps – *uplink,* UL*)*, niska latencija (*Round Trip Time* – RTT), visoka efikasnost frekvencijskog pojasa, fleksibilnost frekvencijskog pojasa koja pruža mogućnost rada u velikom broju postojećih i novih frekvencijskih pojasa, jednostavnost te isplativa i učinkovita migracija postojećih 3G mreža na mreže novih generacija. [5],[6]

2.1. Arhitektura

Kada je riječ o arhitekturi LTE sustava, jedno od najznačajnijih obilježja je, u usporedbi s prethodnim sustavima, njezina jednostavnost kako je i prikazano slikom**Error! Reference source not found.** gdje su moduli za upravljanje baznim stanicama implementirani unutar same bazne stanice koja sada poprima i njihove uloge. Jedna od tih uloga je i upravljanje *Handover*-om koji će također biti spomenut. Možda i ključan okidač za takvu promjenu leži u osiguravanju lakše skalabilnosti kako bi se izbjegla naknadna potreba za dodatnom nadogradnjom kapaciteta kao što je bio slučaj sa 3GPP *Release 6* specifikacijom kada je zabilježeno povećanje. U specifikaciji *Release 7* su također bile potrebne izmjene zbog nadogradnje arhitekture prikazane slikom Slika 2.4.12.1 dok je kod LTE sustava to izbjegnuto zbog već spomenute multifunkcionalne bazne stanice.



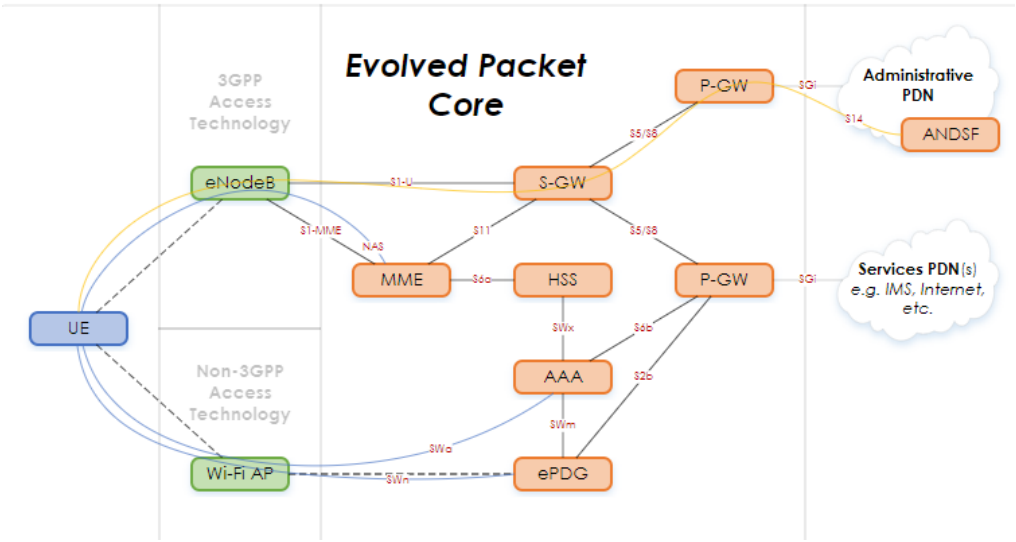
Slika 2.1.1 Napredak u LTE arhitekturi [5]



Slika 2.4.12.1 Razvijanje "flat" arhitekture [5]

Korisnički uređaji (engl. *User Equipment – UE)* sastoje se od pokretnog klijentskog uređaja i fizičke kartice (slično 3G SIM kartici), univerzalnog modula identiteta pretplatnika (engl.

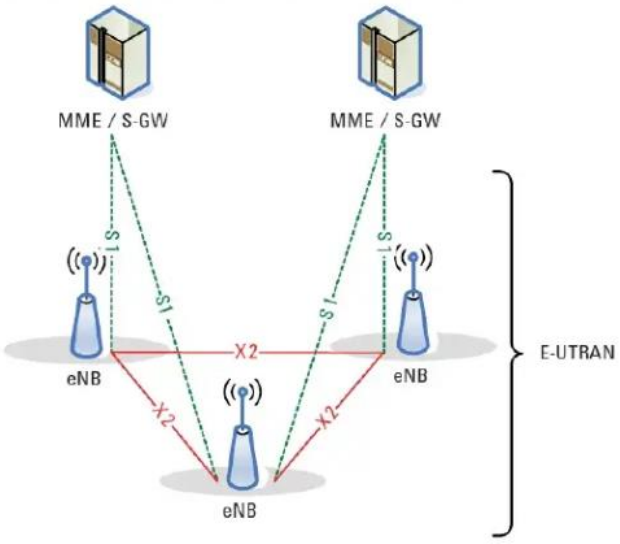
Universal Subsrciber Identity Module – USIM) koji se koriste za identifikaciju i autentikaciju određenog korisnika. Uređaji su povezani s jezgrom mreže LTE (engl. *Evolved Packet Core – EPC),* Slika 2.1.3, koja omogućava pristup prema drugim podatkovnim mrežama ili uslugama, a odgovoran je i za obavljanje funckionalnosti vezanih uz sigurnost prijenosa podataka kao i obradu informacija o korisniku, naplatu usluga te omogućuje mobilnost između različitih pristupnih mreža. O uspješnoj povezivosti EPC-a i korisničkih uređaja brine E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network),* Slika 2.1., koji se sastoji od više radijskih baznih stanica (eNodeB) međusobno povezanih logičkim sučeljem X2. eNodeB upravlja protokolima vezanim uz radijski pristup, radio resursima, primopredajom (engl. *Handover)* te prijemom i planiranjem (engl. *Scheduling).*



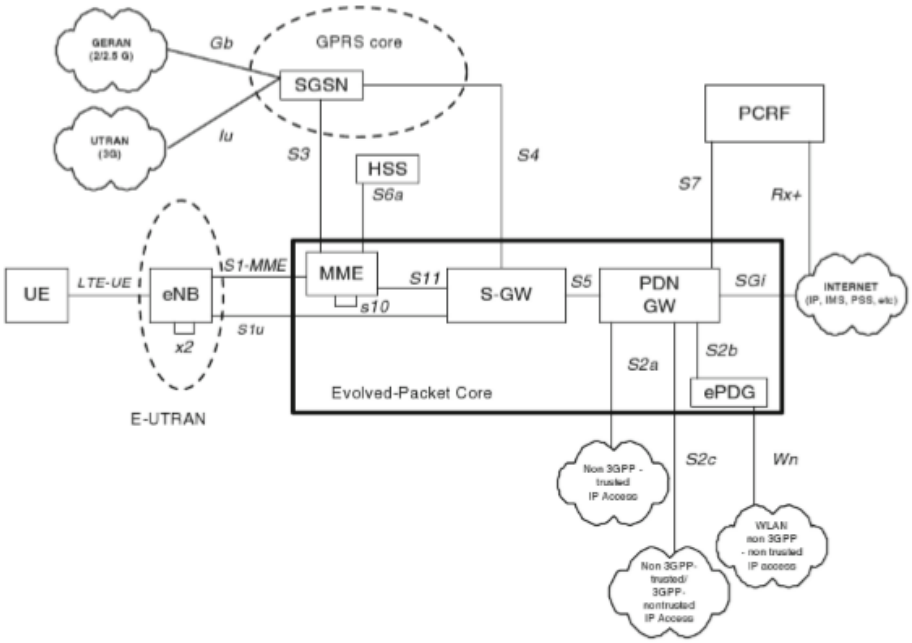
Slika 2.4.13 Evolved Packet Core, jezgra mreže LTE [7]

Također, bitna komponenta koja čini EPC je i entitet za upravljanje mobilnošću (engl. *Mobility Management Entity – MME).* Nekada je to u 2G i 3G tehnologijama bio SGSN, koji vodi brigu o korisničkim uređajima u neaktivnom modu te upravlja signalizacijom, a druga bitna komponenta je P/S-GW (*Packet Data Network and Serving Gateway),* unutar 2G i 3G tehnologija pod nazivom GGSN, koji omogućuje pristup prema drugim podatkovnim mrežama i uslugama.

Cjelina koju prikazuje Slika 2.4.1.1, a čine ju EPC i E-UTRAN zajedno s korisničkim uređajima naziva se *Evolved Packet System – EPS*. [8],[9]



Slika 2.1.4 E-UTRAN arhitektura [3]

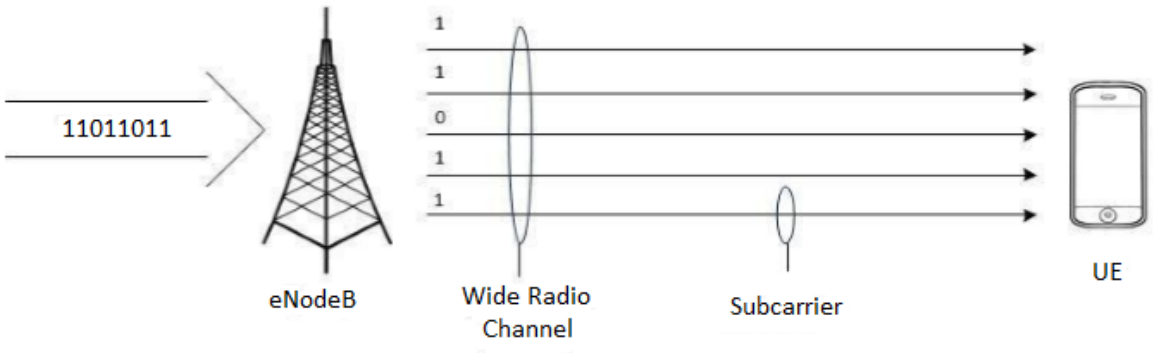


Slika 2.4.1.1 Evolved Packet System [3]

2.2. Pregled radijskog sučelja

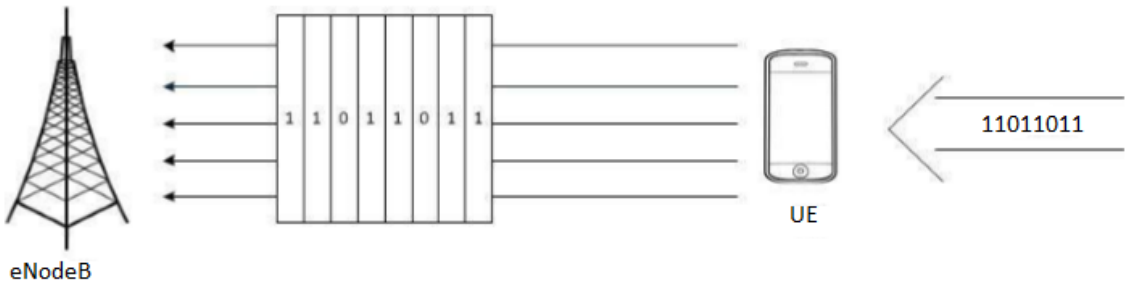
LTE radijsko sučelje koristi adaptivne modulacijske tehnike zbog čega je u stanju prilagoditi se sukladno stanju i kvaliteti radio veze pa tako kvadraturna amplitudna modulacija (engl. *Quadrature Amplitude Modulation – QAM)* dozvoljava da se amplituda mijenja promjenom faze dok je kod *M-ary Phase Shift Keying* (MPSK) modulacijske tehnike amplituda prijenosnog signala bila konstantna. Osim toga, QAM modulacija ima i bolju energetsku efikasnost u usporedbi s MPSK modulacijom.

LTE sustav koristi OFDMA (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access)* i SC-FDMA (engl. *Single Carrier-Frequency Division Multiple Access)* metode višestrukog pristupa kojima se ostvaruje ortogonalnost između korisnika, smanjenje interferencije i povećanje kapaciteta sustava. Kod OFDMA metode prikazane slikom 2.2.1 povećana je efikasnost pojačala što je rezultiralo efikasnijoj, manjoj potrošnji baterije istih. Upravo to je najveća prednost kada uzmemo u obzir da postoje uređaji koji su priključeni na struju (koriste stalno napajanje) i oni koji koriste vlastito napajanje, bateriju. Zbog toga se ova metoda višestrukog pristupa koristi na silaznoj vezi (DL) LTE radijskog sučelja. Dodatne mogućnosti koje OFDMA pruža su i velike brzine prijenosa podataka, zaštita od interferencije uz efikasno korištenje frekvencijskih pojasa, a to znači i jednostavniju strukturu ove metode.



Slika 2.4.1 OFDMA [10]

Iako je SC-FDMA prijemnik za baznu stanicu zahtjevnije napraviti od onog korištenog kod OFDMA metode, zbog njegove značajne efikasnosti kada su u pitanju već spomenuta potrošnja baterije, ali i povećanje dometa, dolazi do isplative efikasnosti zbog čega je upravo SC-FDMA metoda višestrukog pristupa sa slike 2.2.2 odabrana na uzlaznoj vezi (UL) LTE radijskog sučelja. Dodatni rezultati dobiveni korištenjem ove metode su veće brzine prijenosa podataka te smanjenje interferencije i bolja pokrivenost na rubovima ćelija. [10],[5]



Slika 2.4.12 SC-FDMA [10]

2.3. Frekvencijski spektri i kapacitet

LTE frekvencijski pojasi podijeljeni su prema načinu dupleksiranja (engl. *Duplex)*. Postoji dupleks za podjelu frekvencije (engl. *Frequency Division Duplex – FDD)* koji je prikazan slikom Slika 2.4.1, a naziva se još i uparenim spektrom (engl. *Paired band)* te dupleks vremenske podjele (engl. *Time Division Duplex – TDD)* prikazan slikom Slika 2.4.1, a naziva se još i neuparenim spektrom (engl. *Unpaired band)*. Trenutno je definirano više od 50 spektara.

LTE BAND NUMBER	UPLINK (MHZ)	DOWNLINK (MHZ)	WIDTH OF BAND (MHZ)	DUPLEX SPACING (MHZ)	BAND GAP (MHZ)
1	1920 - 1980	2110 - 2170	60	190	130
2	1850 - 1910	1930 - 1990	60	80	20
3	1710 - 1785	1805 -1880	75	95	20
4	1710 - 1755	2110 - 2155	45	400	355
5	824 - 849	869 - 894	25	45	20
6	830 - 840	875 - 885	10	35	25
7	2500 - 2570	2620 - 2690	70	120	50
8	880 - 915	925 - 960	35	45	10
9	1749.9 - 1784.9	1844.9 - 1879.9	35	95	60
10	1710 - 1770	2110 - 2170	60	400	340
11	1427.9 - 1452.9	1475.9 - 1500.9	20	48	28
12	698 - 716	728 - 746	18	30	12
13	777 - 787	746 - 756	10	-31	41
14	788 - 798	758 - 768	10	-30	40
15	1900 - 1920	2600 - 2620	20	700	680
16	2010 - 2025	2585 - 2600	15	575	560
17	704 - 716	734 - 746	12	30	18
18	815 - 830	860 - 875	15	45	30
19	830 - 845	875 - 890	15	45	30
20	832 - 862	791 - 821	30	-41	71
21	1447.9 - 1462.9	1495.5 - 1510.9	15	48	33
22	3410 - 3500	3510 - 3600	90	100	10
23	2000 - 2020	2180 - 2200	20	180	160
24	1625.5 - 1660.5	1525 - 1559	34	-101.5	135.5
25	1850 - 1915	1930 - 1995	65	80	15
26	814 - 849	859 - 894	30 / 40		10
27	807 - 824	852 - 869	17	45	28
28	703 - 748	758 - 803	45	55	10
29	n/a	717 - 728	11		
30	2305 - 2315	2350 - 2360	10	45	35
31	452.5 - 457.5	462.5 - 467.5	5	10	5
32	DL CA Only	1452 - 1496	44	N/A	N/A
65	1920 - 2100	2120 - 2200	90	190	20
66	1710 - 1780	2110 - 2200	90	400	330
67	DL CA Only	738 - 758	20	N/A	N/A
68	698 - 728	753 - 783	30	55	25
69	DL CA Only	2570 - 2620	50	N/A	N/A
70	1695 - 1710	1995 - 2020	25	295	285
71	663 - 698	617 - 652	35	-46	11
252	DL CA Only	5150 - 5250	100	N/A	N/A
255	DL CA Only	5725 - 5850	125	N/A	N/A

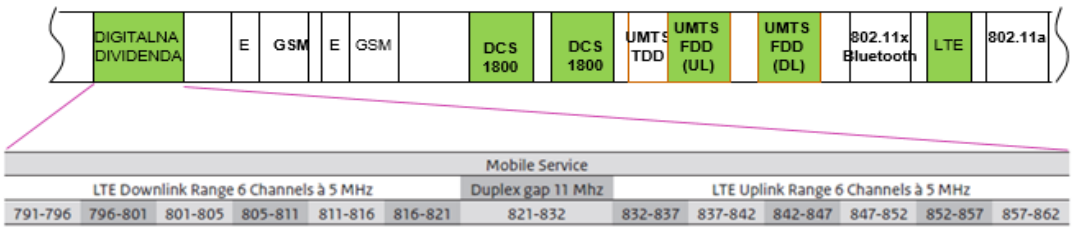
Slika 2.4.1 FDD frekvencijski spektar [11]

LTE BAND NUMBER	ALLOCATION (MHZ)	WIDTH OF BAND (MHZ)
33	1900 - 1920	20
34	2010 - 2025	15
35	1850 - 1910	60
36	1930 - 1990	60
37	1910 - 1930	20
38	2570 - 2620	50
39	1880 - 1920	40
40	2300 - 2400	100
41	2496 - 2690	194
42	3400 - 3600	200
43	3600 - 3800	200
44	703 - 803	100
45	1447 - 1467	20
46	5150 - 5925	775
47	5855 - 5925	70

Slika 2.4.12 TDD frekvencijski spektar [11]

Radiofrekvencijski spektar se često organizira (i prodaje) kao upareni spektar – blok spektra u pojasu nižih frekvencija i pridruženi mu blok spektra u gornjem frekvencijskom pojasu. Ovaj raspored frekvencijskih pojasa gdje je jedan pojas za uzlaznu vezu i jedan pojas za silaznu vezu naziva se uparenim spektrom (FDD). TDD koristi samo jedan frekvencijski pojas za oba prijenosa (slanje i prijem) koji zatim dijeli dodjeljivanjem izmjeničnih vremenskih utora (engl. *Slot)* za slanje i prijem. [5]

Tvrtka TeliaSonera je prvi komercijalni 4G mobilni operater koja je istovremeno pustila u rad 4G mrežu u Švedskoj i Norveškoj u 2,6 GHz frekvencijskom području. Povećanjem frekvencije nastaje problem smanjenja dometa pokrivanja ćelija, a to ne ide na ruku mobilnim operaterima. Jedno rješenje je povećanje broja baznih stanica što daje zaključiti da su potrebna veća financijska sredstva i tako u krug. Prelaskom s analogne na digitalnu televiziju oslobodio se dio frekvencijskog pojasa prikazan slikom 2.3.3 koji se naziva digitalna dividenda čime je oslobođen frekvencijski pojas 790 – 862 MHz vrlo poželjan za bolje pokrivanje signalom. [12],[13]



Slika 2.4.13 Spektar digitalne dividende [14]

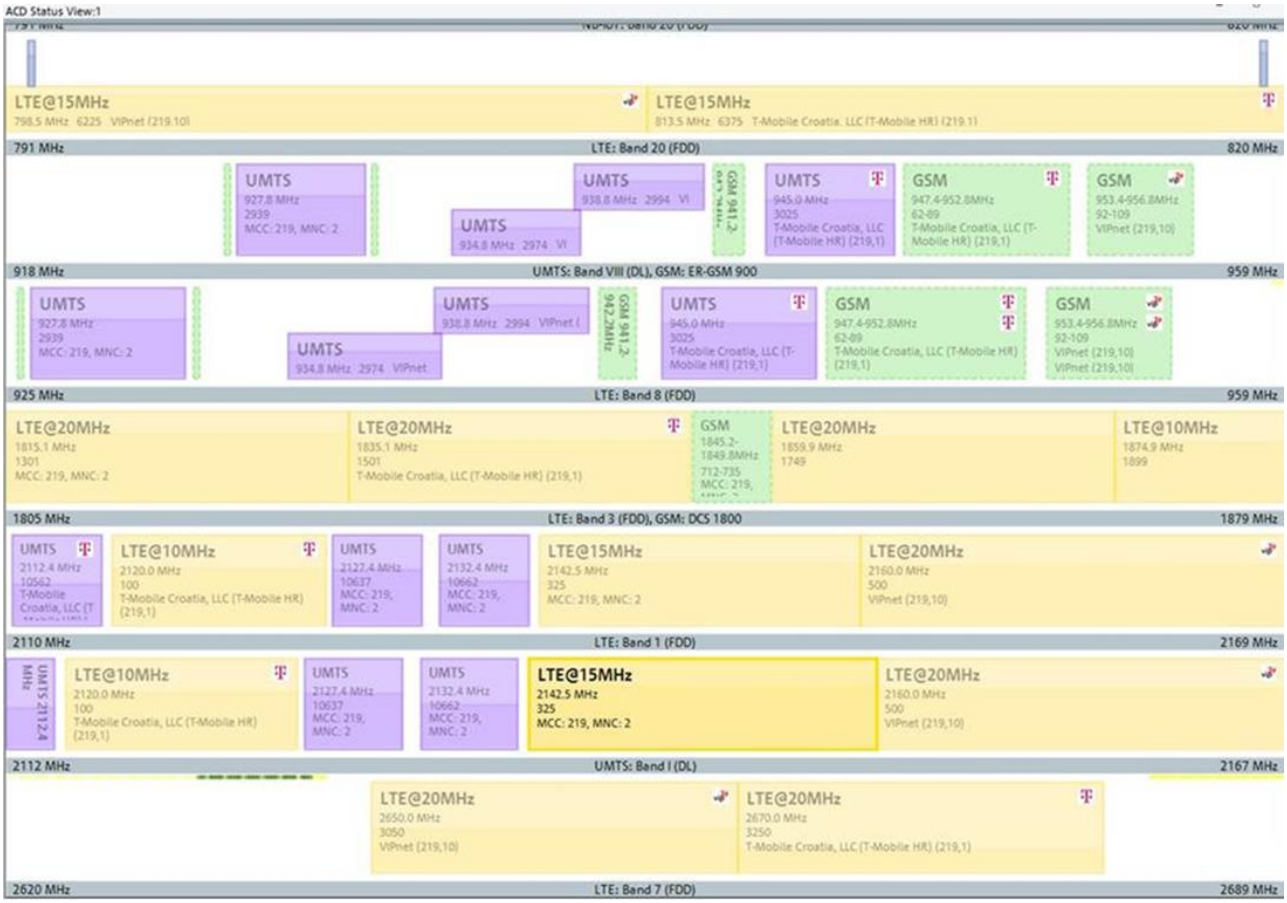
U Hrvatskoj se trenutno koriste B1, B3, B7 i B20 LTE frekvencijski pojasevi (engl. *Band)* koji su međusobno podijeljeni između operatera na sljedeći način:

- Hrvatski Telekom d.d.
  - za B1 (2100 MHz) je dodijeljen spektar 2110 – 2125 MHz
  - za B3 (1800 MHz) je dodijeljen spektar 1825,1 – 1845,1 MHz te 1869,9 – 1879,9 MHz
  - za B7 (2600 MHz) je dodijeljen spektar 2660 – 2680 MHz
  - za B20 (800 MHz) je dodijeljen spektar 806 – 821 MHz te 847 – 862 MHz
- A1 Hrvatska d.o.o.
  - za B1 (2100 MHz) je dodijeljen spektar 2140 – 2160 MHz
  - za B3 (1800 MHz) je dodijeljen spektar 1852,1 – 1869,9 MHz
  - za B7 (2600 MHz) je dodijeljen spektar 2640 – 2660 MHz
  - za B20 (800 MHz) je dodijeljen spektar 791 – 806 MHz te 832 – 847 MHz
- Tele2 d.o.o.
  - za B1 (2100 MHz) je dodijeljen spektar 2125 – 2140 MHz te 2160 – 2170 MHz
  - za B3 (1800 MHz) je dodijeljen spektar 1805,1 – 1825,1 MHz te 1845,1 – 1852,1 MHz
  - za B7 (2600 MHz) je dodijeljen spektar 2620 – 2640 MHz

Upotreba ispisanih radijskih frekvencija svim operaterima je ograničena do 2024. godine. [15]

Kako bi se istražilo koji su od frekvencijskih pojaseva, dodijeljenih mobilnim operaterima danas u upotrebi, te za koje se tehnologije koriste napravljeno je terensko mjerenje. Mjerenje spektralnim analizatorom TSMW tvrtke Rohde/Schwarz uz korištenje aplikacije ROMES i funkcionalnosti ACD (engl. *Automatic Channel Detection*) napravljeno na širem području grada Zagreba.

Iz mjerenja sa slike 2.3.4 prikazani su frekvencijski spektri po tehnologijama i operaterima gdje se jasno može vidjeti da za sustav LTE A1 Hrvatska za veći domet i bolje pokrivanje signalom koristi frekvenciju od 793,5 MHz dok Hrvatski Telekom koristi 813,5 MHz i oba spadaju u već navedene dodijeljene spektre (B20). Osim nižih frekvencija, izmjerene su i vrijednosti koje pokrivaju više frekvencijske pojaseve (B1, B3 i B7), a služe za povećanje kapaciteta što je vrlo bitno kod pokrivanja područja gdje je koncentracija prometa puno veća. U tu svrhu A1 operater trenutno koristi 2160 MHz te 2650 MHz dok su za HT izmjerene frekvencije od 1835,1 MHz, 2120 MHz te 2670 MHz.



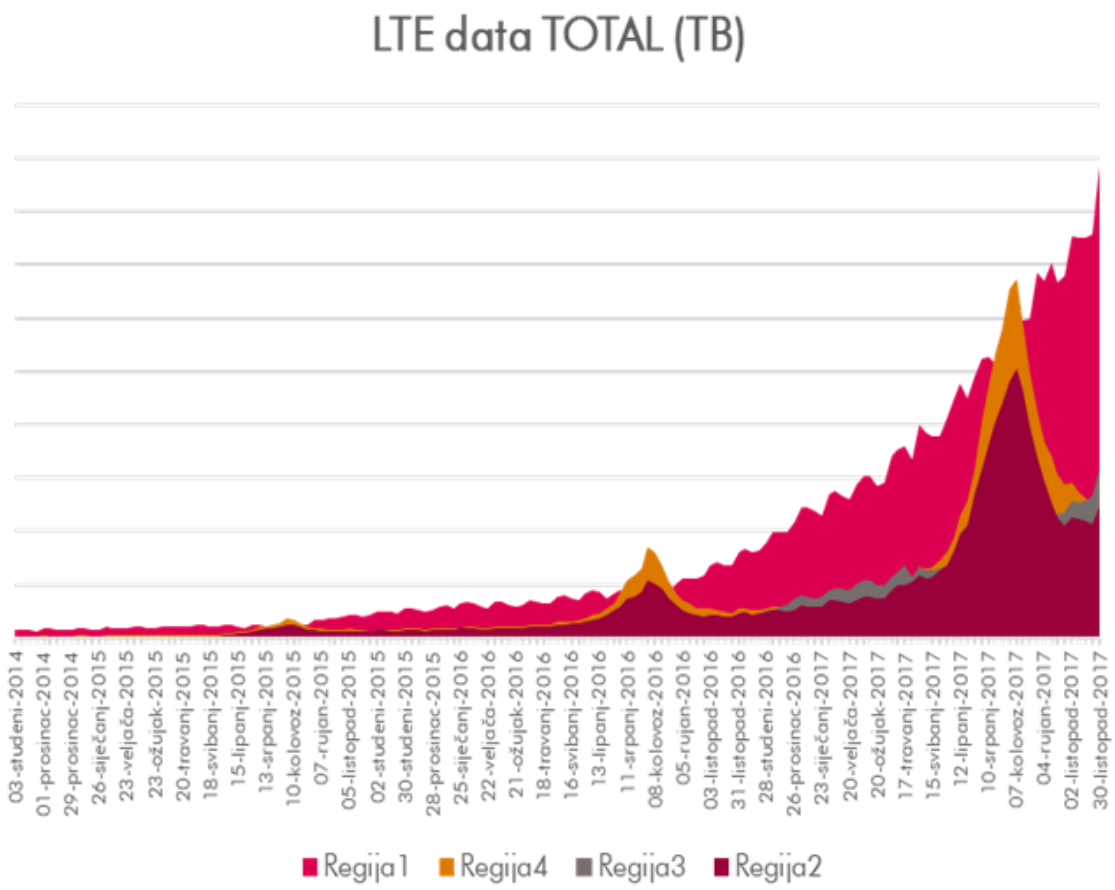
Slika 2.4.14 Frekvencijski pojasevi po tehnologijama i operaterima

2.4. Definiranje vremenskih okvira

Mobilni operater svoju mrežu mora dimenzionirati tako da i u trenutku najvećeg opterećenja kvaliteta usluge u mreži bude zadovoljavajuća. U vremenskoj domeni govorimo o najprometnijem satu BH (engl. *BusyHour).* Sve ostalo u danu nazivamo ne-najprometnijim satima nonBH (engl. *nonBusyHour).*

Važno je međutim naglasiti da se pored analize statističkih pokazatelja u satnoj rezoluciji, u kontekstu pravovremenog proširenja i osiguravanja dostatnih kapaciteta u mreži mora voditi računa i o društvenim, političkim, ekonomskim i geografskim prilikama. Primjerice, geografski gledajući Republika Hrvatska kao vrlo posjećena turistička zemlja ima izraženu sezonalnost, te našu obalu ljeti posjećuje velik broj stranih gostiju. Osiguranje dostatnog kapaciteta mobilne mreže domaćim i stranim gostima u ljetnim mjesecima na obali dodatno je otežala i usvojena incijativa EU političarke Vivian Reading, koja je svim stanovnicima EU koji se nalaze u roamingu na teritoriju neke druge EU države 2017. godine izborila cijene govornih i podatkovnih usluga jednake onima koje plaćaju u svojoj matičnoj zemlji.

Na slici Slika 2.4.1 prikazan je ukupni podatkovni promet ostvaren na sustavu LTE u periodu od 2014. do kraja 2017. godine. Sa grafa se temeljem povećanog prometa u ljetnim mjesecima može jednostavno zaključiti kako regije 2 i 4 obuhvaćaju hrvatsku obalu i otoke. Nadalje, usporedbom ljetnih mjeseci 2016. i 2017. godine vidi se kako veliki utjecaj na dimenzioniranje mreže može imati samo jedna politička odluka. Dodatno, eksponencijalni rast podatkovnog prometa jasno je vidljiv i na ovom grafu.



Slika 2.4.11 LTE podatkovni promet za razdboblje 2014. - 2017.

2.4.1. Najprometniji sat ili BusyHour

BH se protekom vremena i generacija mobilnih sustava značajno promijenio. Tako je devedesetih godina u vrijeme sustava druge generacije govor bio dominantna usluga, a minuta razgovora na mobilnoj mreži relativno skupa. Zbog toga su mobilnim mrežama dominirali poslovni razgovori, a sukladno tome je tada BH bio negdje u periodu između 11 i 15 sati. Povećanjem konkurencije dolazi do pada cijena usluga mobilne telefonije, uvođenje komercijalnih paketa s uključenim besplatnim minutama razgovora, „friend broja“ i slično. Posljedica toga bila je pomicanje BH u večernje sate, u period od 19 do 21 sat. Početkom novog tisućljeća, uvođenjem treće generacije sustava mobilnih mreža te posljedično dolaskom iPhone-a i ostalih pametnih telefona na tržište, podatkovna usluga postaje sve značajnija, te dolazi do potrebe definiranja BH kao onog sata u kojem je zbirno gledajući zabilježen najveći govorni i podatkovni promet. To međutim nije značajnije promijenilo vrijeme događanja BH. Slijedi uvođenje sustava četvrte generacije LTE, te usporedno s time nastavlja se kontinuirani eksponencijalni rast korisničkog podatkovnog prometa u mobilnim mrežama. Danas je osiguravanje dostatnog podatkovnog kapaciteta glavni izazov pa BH danas predstavlja upravo onaj

sat u kojem se u određenoj ćeliji prenese najviše podataka. BH se u pravilu i dalje događa u večernjim satima, ali je period proširen pa je on sada u rasponu od 19 do 23 sata.

2.4.2. Zahtjevi korisnika

Korisnikovo iskustvo, tj. zadovoljstvo mora biti na prvom mjestu. Oni su ti koji odlučuju hoće li pružena usluga doživjeti uspjeh ili propast ma koliko ona izgledala obećavajuće.

Zbog toga postoje analize kojima se pokušava doći do odgovora kako se približiti korisniku da bi ga na kraju motivirali da taj proizvod ili uslugu i plati. Jednom kada korisnik dobije traženu uslugu od mobilnog operatera, za očekivati je da će ona jednako dobro raditi od prvog do zadnjeg dana njezinog postojanja. To znači u idealnim i onim manje idealnim uvjetima, u vrijeme noći ili dana te za vrijeme najveće koncentracije ljudi na jednom mjestu, odnosno kada se ljudi vraćaju s posla ili kada je u pitanju okupljanje mase radi koncerta, utakmice i sl. Stoga je dužnost mobilnih operatera pružiti zadovoljavajuće korisničko iskustvo.

To su razlozi zbog kojih postoje mjerenja za vrijeme minimalnog i maksimalnog opterećenja te aktivna i pasivna mjerenja koja su objašnjena u poglavlju 3.1

3. Analiza statističkih podatkovnih pokazatelja

Na početku se postavlja pitanje kome mjerenja uopće trebaju i što ona donose, jesu li vrijedna truda i vremena, financijskih sredstava ili bilo kojeg drugog kapitala kojeg organizacija ili pojedinci posjeduju?

Ona se provode kako bi se pratilo, kontroliralo stanje u mreži na temelju čega je moguće predvidjeti potencijalne rizike i posljedice koje bi dale neželjene rezultate. Ne samo da se prati stanje u mreži, već je na taj način moguće upoznati se i s korisnikovim ponašanjem prema čijem zadovoljstvu je na kraju krajeva sve to i usmjereno.

Mjerenja se mogu okarakterizirati kao nešto što uvijek može potvrditi unaprijed pretpostavljene teze, s tehničke ili komercijalne strane ili pokazati nešto sasvim suprotno očekivanjima. Zato im treba pristupiti odgovarajućom opremom, znanjem i stručnim timom ljudi koji će analizu obaviti na najsipravniji mogući način jer su ta ista mjerenja važna iz više razloga i radi više ciljeva.

Rezultati mjerenja daju odgovore na mnoga postavljena pitanja. Moguće je vidjeti ide li se u planiranom smjeru, ali daje i ideje pomoću kojih je moguće primijetiti te unaprijediti postojeće stanje, bilo da se radi o pruženoj usluzi ili nečemu sasvim drugom.

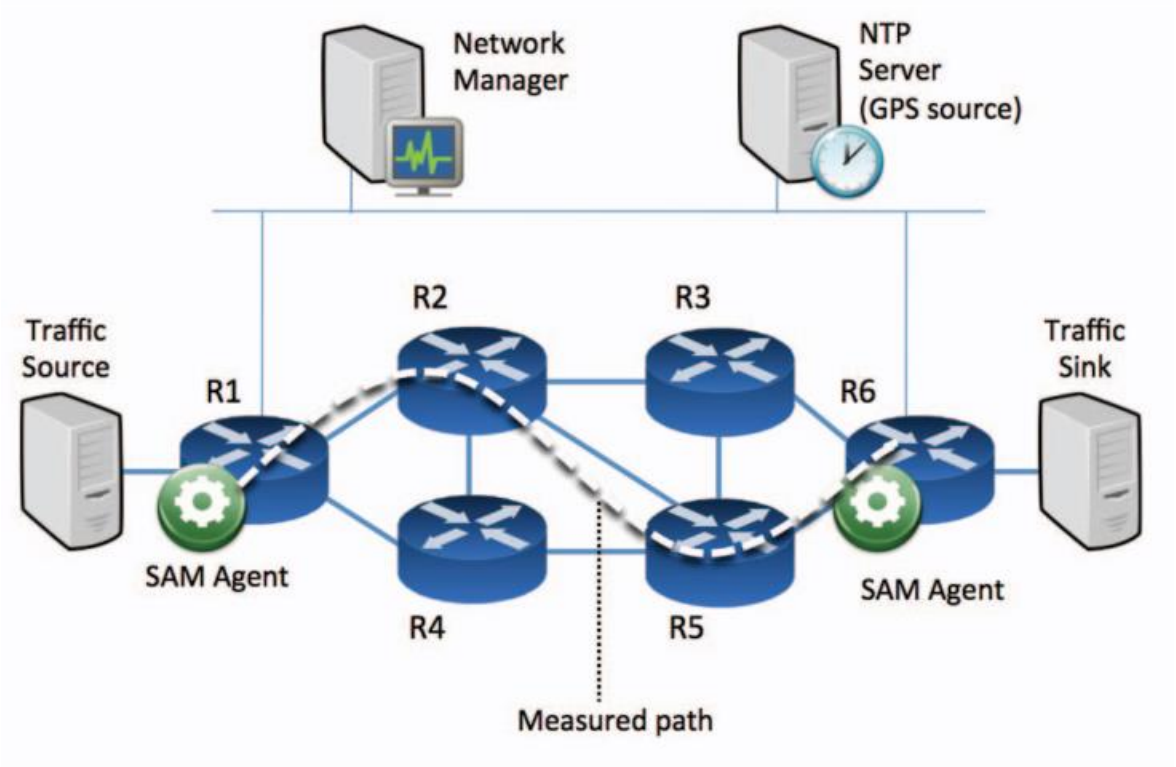
3.1. Tipovi mjerenja prometa – aktivno i pasivno mjerenje

Pasivna mjerenja zahtijevaju prikupljanje podataka pasivnim slušanjem mrežnog prometa što većina današnjih uređaja kao ugrađeni mehanizam i posjeduje, poput RMON-a (engl. *Remote Network Monitoring)* koji može prikupljati različite vrste podataka kao što je količina poslanih podataka u bajtovima, broj izgubljenih paketa i druge statističke podatke vezane uz samo sučelje.

Aktivna i pasivna mrežna mjerenja daju različite informacije i rezultati ne moraju nužno biti u korelaciji. Ono što bi dalo vjerojatno najkompletniju sliku stanja unutar mreže je kombinacija ta dva tipa mjerenja koje se naziva hibridnim mjerenjem (engl. *Hybrid measurement).*

Pasivna mjerenja su vrlo prikladna u situacijama gdje je cijela mreža u vlasništvu samo jedne organizacije zato što je tada moguće odrediti bilo koje točke snimanja sve od pošiljatelja pa do primatelja i ono se koristi za prikaz stvarnog stanja mrežnog prometa.

U drugim situacijama, kada nije moguće proizvoljno i slobodno odabrati točke snimanja prometa, potrebno je koristiti aktivna mrežna mjerenja kao na slici 3.1.1.



Slika 2.4.21 Aktivno mrežno mjerenje [16]

Točnost mjerenja je najbitnija stavka u kojoj su pasivna mjerenja često preciznija pa se tako i gubitak paketa može vrlo precizno izmjeriti nadgledanjem podataka u međuspremniku mrežnih usmjerivača (engl. *Router),* ali i kolika je propusnost, nadgledanjem veza između usmjerivača. [17]

3.2. Crowdsource izvori

Izvori javno dostupni svima koji prikazuju statističke podatke na temelju izmjerenih vrijednosti o kvaliteti mobilnih i fiksnih usluga te njihovim performansama, brzini učitavanja i preuzimanja sadržaja kao i jačini signala, latenciji i ostalim vrijednostima nazivamo *Crowdsource* izvorima.

Postoji mnogo otvorenih alata za mjerenje navedenih performansi među kojima su u ovom radu izdvojena 3:

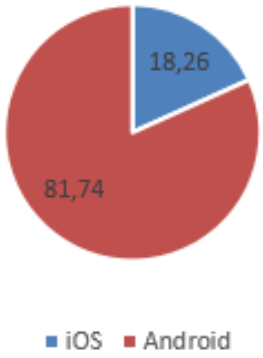
- HAKOMETAR – aplikacija Hrvatske regulatorne agencije za mrežne djelatnosti (HAKOM) kojom korisnici mogu ispitati kakvoću usluge širokopojasnog pristupa internetu tj. izmjeriti brzinu prijenosa korisnih podataka do svojega računala. [18]
    - HAKOMetar Plus – informira korisnike o trenutnoj kvaliteti bežične/mobilne internetske veze (upload, download, PING, jačina signala). Također, omogućen je i pristup statistici svih prethodno izvršenih mjerenja kao i prikaz istih na zemljopisnoj karti. [19]
- Speedtest by Ookla – vjerojatno najpoznatiji javno dostupan alat za mjerenje mobilnih i fiksnih mrežnih performansi.
- RTR-NetTest – također jedan jako popularan i kvalitetan Austrijski otvoreni alat za mjerenje kvalitete mobilnih i fiksnih mrežnih usluga

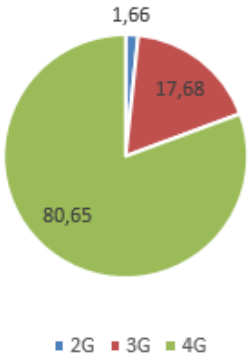
U idućim cjelinama bit će priloženi njihovi statistički pokazatelji i rezultati mjerenja na području Republike Hrvatske. Isto tako, vrlo je bitno napomenuti da je nepoznato prilikom kakvog kapacitivnog opterećenja i u kakvim uvjetima su performanse izmjerene i zabilježene.

3.2.1. HAKOMetar Plus

Analize HAKOMetra Plus prikazuju rezultate mjerenja u razdoblju od travnja 2017. do siječnja 2020. godine iz kojih se lako može očitati sljedeće.

Na slikama 3.2.1.1 i 3.2.1.2 može se vidjeti kako u Republici Hrvatskoj u velikoj mjeri prevladava Android operacijski sustav na korisničkim uređajima naspram iOS operativnog sustava proizvedenog od strane tvrtke Apple i od kojih se velika većina koristi 4G tehnologijom.



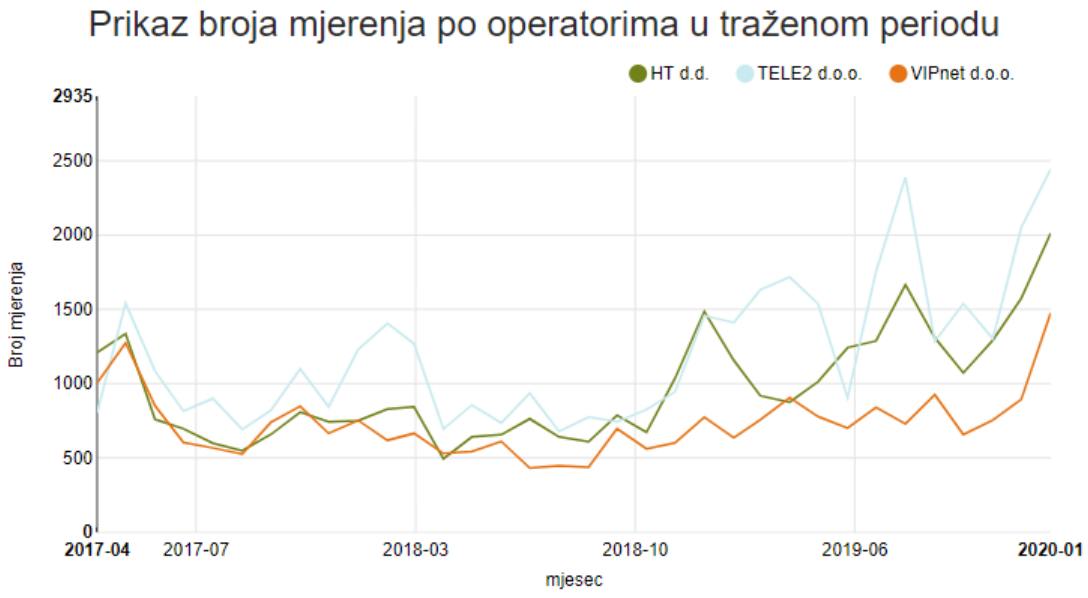


Slika 3.2.1.1 Mjerenja po operativnim sustavima

Slika 3.2.1.2 Mjerenja prema tehnologiji

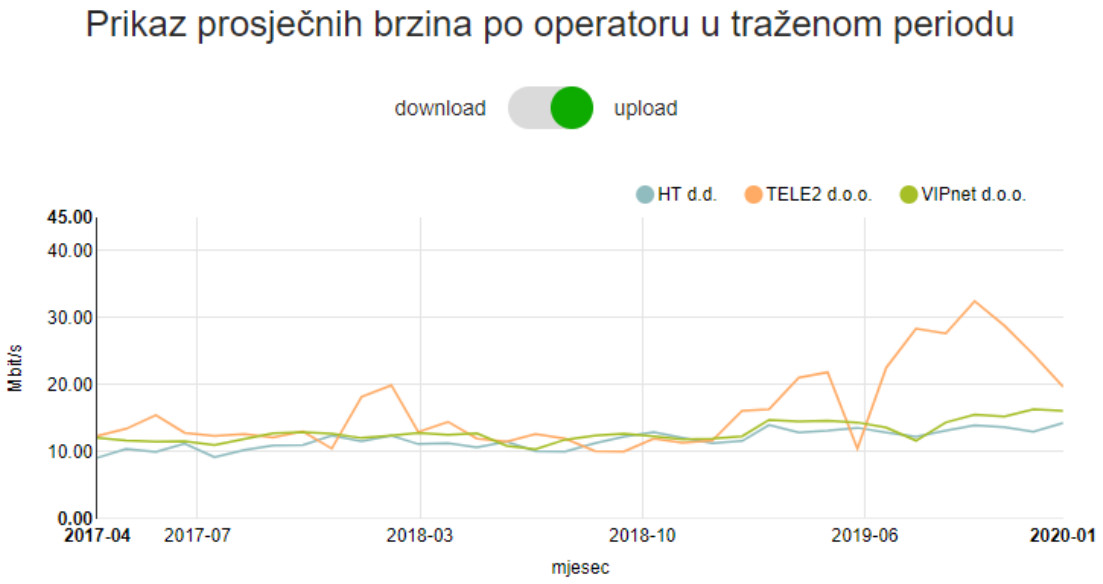
Operatori uglavnom provode približno jednak broj mjerenja u godini (Slika 3.2.1.3), osim jednog istupa od strane TELE2 i HT mobilnih operatora u trećem kvartalu 2019. godine. Na temelju prvih dostupnih mjerenja od unazad skoro 3 godine pa zaključno s prvim mjesecom 2020. moguće je iščitati da je najmanji broj mjerenja izvršen u srpnju 2018. godine, njih 432 (VIPnet d.o.o.) dok je čak 2530 mjerenja (TELE2) obavljeno u siječnju 2020. što je i najveći broj u periodu od ta 34 mjeseca.

Za pretpostaviti je da operatori sve više ulažu u nove tehnologije i vrše sve više mjerenja te na taj način mogu pravovremeno i preventivno djelovati što u krajnjem slučaju daje pozitivne rezultate.



Slika 3.2.1.3 Prikaz broja mjerenja po operatorima u traženom periodu [20]

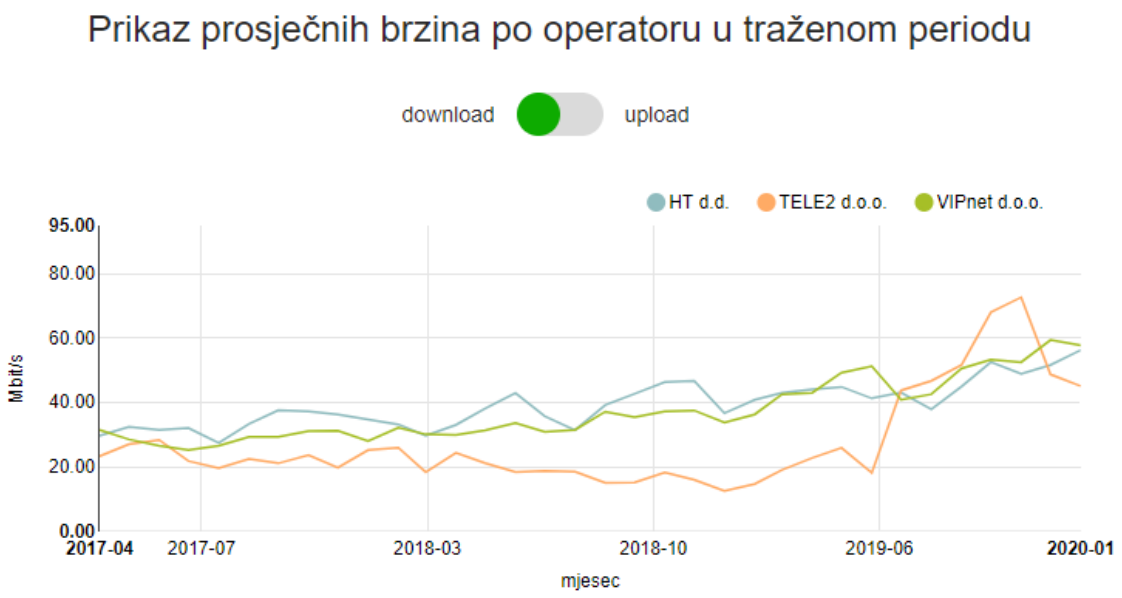
Upload brzine prikazane slikom 3.2.1.4 su očekivano dosta manje te se one uglavnom podjednako kreću kod sva 3 operatora unutar cijelog vremenskog razdoblja, ali je dobro spomenuti TELE2 operatora koji se izdvojio u srpnju 2019. i čija je prosječna upload brzina rasla sve do vrhunca u listopadu 2019. godine i tada je iznosila 32,5 Mbit/s što je nešto više od prosječne svjetske download brzine koja se spominje i u poglavlju 3.2.2.



Slika 3.2.1.4 Prosječne upload brzine po operatoru u traženom periodu [20]

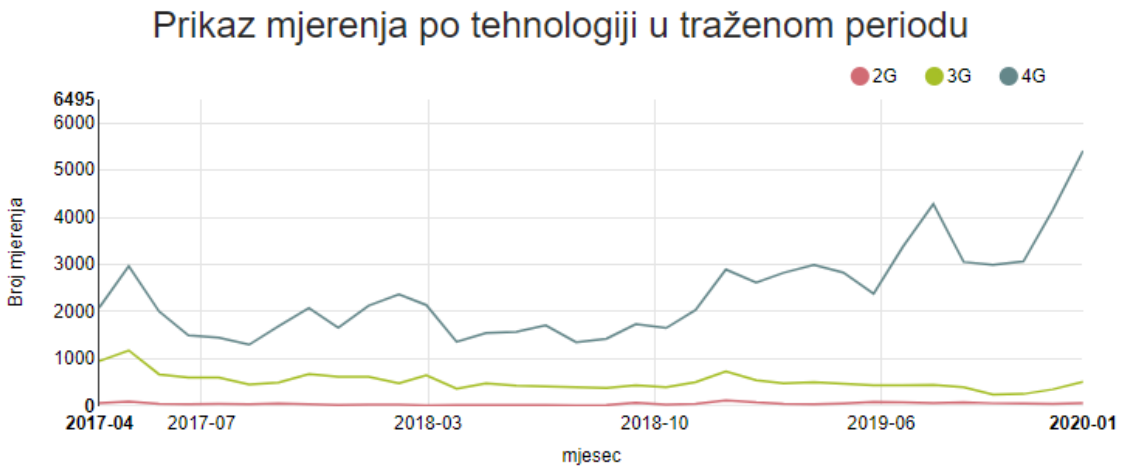
Zabilježene prosječne download brzine prikazane slikom 3.2.1.5 kreću se od nekakvih 12,53 Mbit/s koju je ostvario TELE2 pa sve do 72,71 Mbit/s što je također zasluga TELE2 mobilnog operatora čije brzine su uglavnom zaostajale za onima Hrvatskog telekoma i A1 sve do lipnja 2019 godine.

Mobilne brzine prijenosa podataka su zasigurno jedna od stavki gdje dobro stojimo i u čemu ne zaostajemo u velikoj mjeri za ostatkom svijeta što je prikazano i u poglavlju 3.2.2.



Slika 3.2.1.5 Prosječne download brzine po operatoru u traženom periodu [20]

Ono što ni najmanje ne iznenađuje je činjenica da je najčešće mjerena tehnologija svakako 4G tehnologija što se može zaključiti pogledom na sliku 3.2.1.6, a to pokazuju i brojke. Sva trenutno dostupna mjerenja, za period koji je prikazan, govore da ukupan broj izvršenih mjerenja od strane sva 3 operatora za GSM, UMTS i LTE sustave iznosi 100 228 od čega je 80 872 mjerenja obavljeno istraživanjem 4G tehnologije. Za 3G tehnologiju ta je brojka već puno manja, točnije 17 693, a za 2G svega 1663 mjerenja u skoro 3 godine. Unutar ta 34 mjeseca prosječno mjesečno istraživanje po tehnologiji je za 4G otprilike 2378,59 što je više nego sveukupan broj 2G mjerenja u tom zadanom periodu čiji je prosjek 48,91 te 520,38 mjerenja za 3G.



Slika 3.2.1.6 Prikaz mjerenja po tehnologiji u traženom periodu [20]

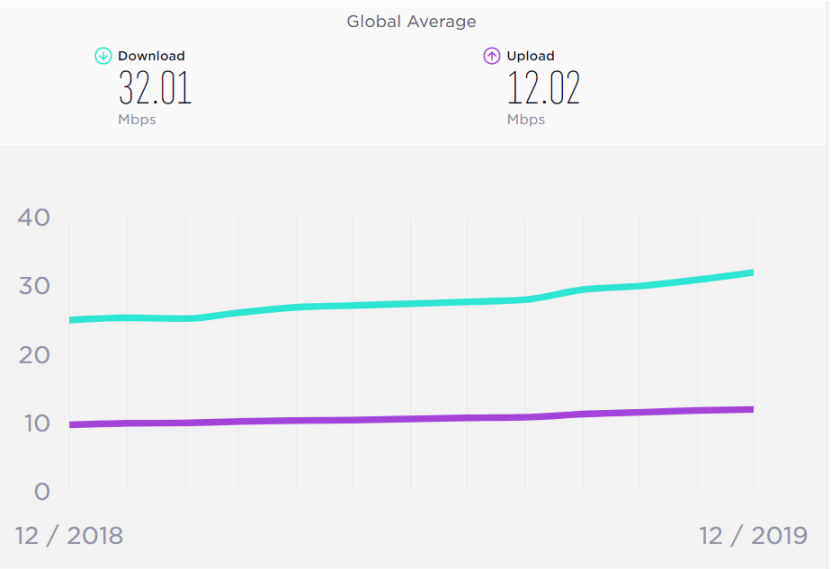
Zanimljivo je spomenuti da je, što se tiče sezonalnosti, veća koncentracija mjerenja ostvarena u zimskim razdobljima od onih u ljetnim te da su vršne brzine prijenosa podataka nešto slabije ljeti za vrijeme turističke sezone kada je puno veća koncentracija ljudi na obali i otocima, ali i na kontinentu za vrijeme zimskih blagdana što i nije slučajnost obzirom da kao turistički primamljiva zemlja privlačimo puno ljudi iz cijeloga svijeta i tako iz godine u godinu.[20]

Iz navedenih analiza HAKOMetra Plus, može se primijetiti da je povećanje prometa konstantno, a prosječne brzine prijenosa podataka i dalje rastu. Na temelju tih podataka zaključuje se da operateri za sada dobro i pravovremeno šire kapacitet u svojim mrežama.

3.2.2. Speedtest by Ookla

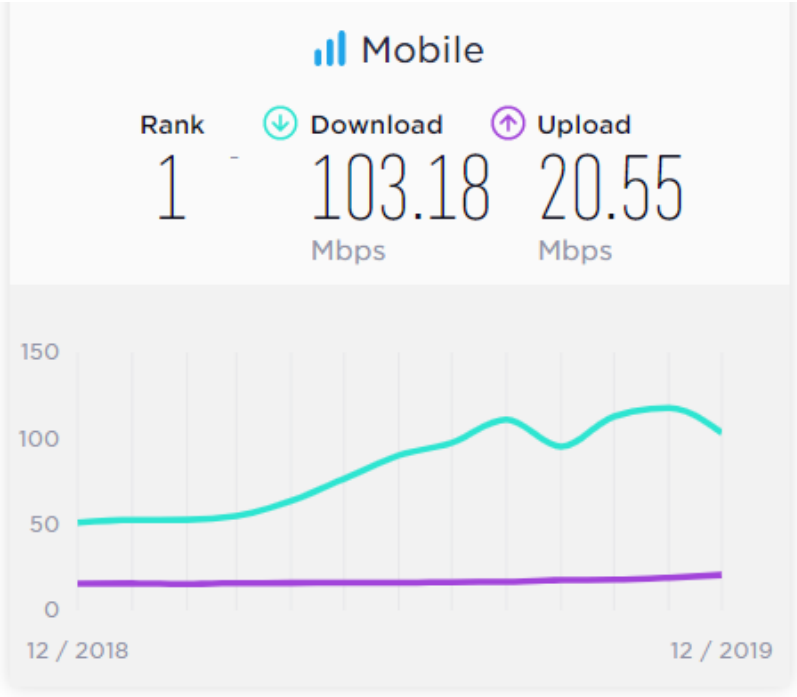
Speedtest je proveo statistička istraživanja mobilnog prometa na temelju samoinicijativnih mjerenja korisnika u razdoblju od 12.2018. do 12.2019., uključujući oba granična mjeseca.

Rezultati prikazani na slici 3.2.2.1 su pokazali da prosječna download brzina mobilnih mreža u svijetu iznosi 32,01 Mbit/s dok je za upload ipak manja i iznosi 12,02 Mbit/s.



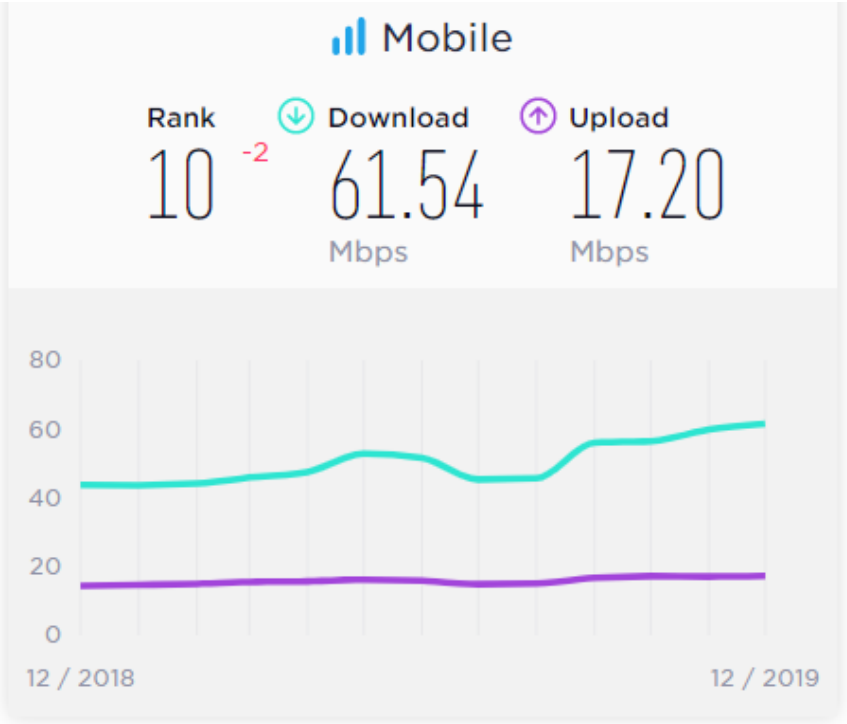
Slika 3.2.2.1 Svjetska prosječna download i upload mobilna brzina [21]

Zanimljivo je još napomenuti kako Južna Koreja ima najbržu mobilnu mrežu i prva je na listi od 140 zemalja sa prosječnih 103,18 Mbit/s download brzine te 20,55 Mbit/s upload brzine kako je i prikazano slikom Slika 3.2.2.2. To je zemlja koja je u svega godinu dana zabilježila porast sa okvirnih 50 Mbit/s, kada je u pitanju prosječna mobilna brzina, na sadašnjih preko 100 Mbit/s što je i više nego duplo veći porast za download dok je upload brzina doživjela tek lagani porast.



Slika 3.2.2.2 Prosječna download i upload brzina Južne Koreje [21]

Za razliku od Južne Koreje, Hrvatska je na nešto lošijem 10. mjestu s prosječnom download brzinom od 61,54 Mbit/s i prosječnom upload brzinom od 17,20 Mbit/s, a to je i prikazano slikom Slika 3.2.2.3 (inače smo tek na 73. mjestu kada je u pitanju fiksna mreža). Iz ovih podataka se može zaključiti kako je trend stvarne propusnosti (engl. *Throughput)* za RH pozitivan gdje se na slici Slika 3.2.2.3 to zaista i vidi obzirom da i download i upload brzine ostvaruju konstantni lagani porast. Iznimka je manji dio perioda u kojem je zabilježen pad brzine nakon čega je brzina samo rasla. [21]

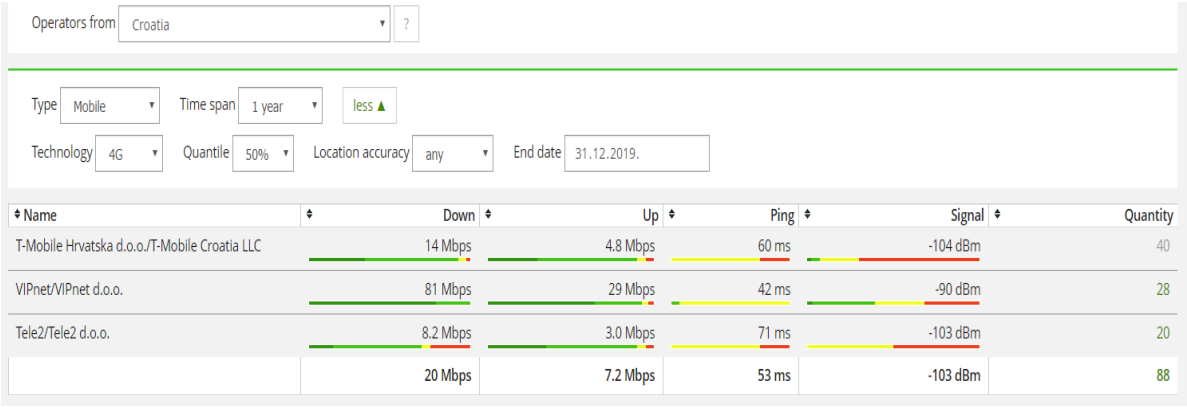


Slika 3.2.2.3 Prosječna download i upload brzina RH [21]

3.2.3. RTR-NetTest

RTR-NetTest na temelju statistike korisnika njihove web aplikacije navodi kako je u 2019. godini prosječna download brzina korisnika HT mobilnog operatora iznosila 14 Mbit/s uz prosječnu upload brzinu od 4,8 Mbit/s dok su izmjerene vrijednosti za ping (latencija zapravo) iznosile 60 ms i jačinu signala -104 dBm. Idući mobilni operator je VIPnet sa puno većom prosječnom download brzinom od 81 Mbit/s, upload-om od 29 Mbit/s, a vrijednosti za ping su iznosile 42 ms odnosno -90 dBm. Korisnicima TELE2 mobilnog operatora izmjerene su vrijednosti za prosječnu download brzinu od 8,2 Mbit/s dok je prosječna upload

brzina iznosila 3 Mbit/s. Latencija je izmjerena na 71 ms i jačina signala na -103 dBm. Objašenjene vrijednosti moguće je vidjeti na slici 3.2.3.1.



Name	Down	Up	Ping	Signal	Quantity
T-Mobile Hrvatska d.o.o./T-Mobile Croatia LLC	14 Mbps	4.8 Mbps	60 ms	-104 dBm	40
VIPnet/VIPnet d.o.o.	81 Mbps	29 Mbps	42 ms	-90 dBm	28
Tele2/Tele2 d.o.o.	8.2 Mbps	3.0 Mbps	71 ms	-103 dBm	20
	20 Mbps	7.2 Mbps	53 ms	-103 dBm	88

Slika 3.2.3.1 RTR-NetTest istraživanje u RH [22]

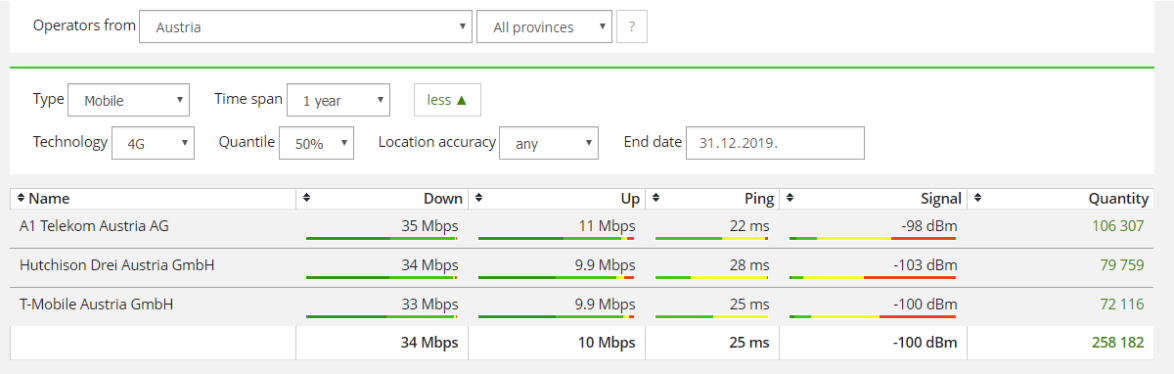
Još jedan zanimljivi podatak sa slike 3.2.3.2 pokazuje s kojih modela mobilnih telefona su u većinskoj mjeri mjerenja inicirana.

Devices

Name	Down	Up	Ping	Quantity
Samsung S8 (SM-G950F)	73 Mbps	43 Mbps	50 ms	13
Galaxy S7 edge	87 Mbps	29 Mbps	42 ms	11
Huawei Mate 20 Pro	21 Mbps	4.3 Mbps	61 ms	11

Slika 3.2.3.2 Uređaji s kojih su inicirana mjerenja u RH [22]

Kako se radi o Austrijskom „HAKOMetru“, uzorak kojim su obavljene analize za RH je vrlo mali pa je u nastavku slikom 3.2.3.3 prikazano stanje na austrijskom tržištu gdje je uzorak znatno veći. Treba napomenuti da se radi o istoj tehnologiji izmjerenoj unutar istog perioda za obje zemlje.



Name	Down	Up	Ping	Signal	Quantity
A1 Telekom Austria AG	35 Mbps	11 Mbps	22 ms	-98 dBm	106 307
Hutchison Drei Austria GmbH	34 Mbps	9.9 Mbps	28 ms	-103 dBm	79 759
T-Mobile Austria GmbH	33 Mbps	9.9 Mbps	25 ms	-100 dBm	72 116
	34 Mbps	10 Mbps	25 ms	-100 dBm	258 182

Slika 3.2.3.3 RTR-NetTest istraživanje u Austriji [22]

Prva velika razlika koju je moguće primijetiti je broj korisničkih mjerenja zastupljenih od strane 3 operatora. Njihov ukupan zbroj je 258 182 što bi za razliku od 88 uzoraka iz Hrvatske moglo biti relevantno za neka veća istraživanja, a samim time je i puno veća diferencijacija modela korisničkih uređaja između onih u Austriji i u Hrvatskoj.

Njihovi operatori – A1 Telekom Austria AG, Hutchison Drei Austria GmbH i T-Mobile Austria GmbH, imaju vrlo slične brojke kada se gledaju glavna 4 aspekta dok se u RH izmjerene vrijednosti od strane naših operatora dosta razlikuju, pogotovo ako se u obzir uzme broj uzoraka.

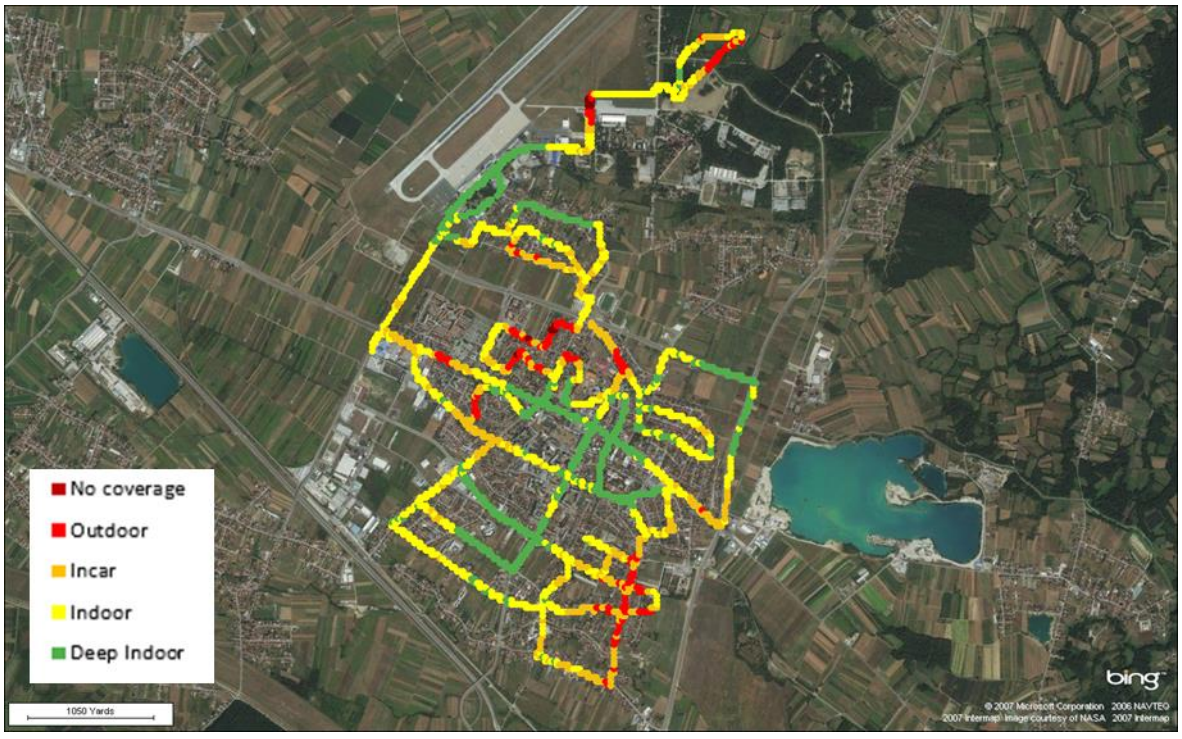
Ukupna prosječna download brzina za sva 3 operatora izmjerena je na 34 Mbit/s, a u RH ona iznosi 20 Mbit/s što i nije jako velika razlika obzirom da su razlike u uzorkovanju enormne. Kada je riječ o ukupnoj prosječnoj upload brzini ta razlika je još manja jer u Austriji iznosi 10 Mbit/s dok je ona u RH 7,2 Mbit/s. [22]

4. Terenska mjerenja

4.1. Planiranje lokacija

Velika Gorica je grad koji je odabran za provedbu mjerenja. Odabran je zato što se nalazi blizu Zagrebu, pa je operativno gledajući relativno jednostavno obaviti dva mjerenja (BH i nonBH) u istom danu. Nadalje, za izvođenje jednog mjerenja po unaprijed definiranoj ruti potrebno je između sat i sati pol vremena. Takva duljina mjerenja odgovara jer je uzorak reprezentativan, a istovremeno trajanjem mjerenja optimalno obuhvaća BH i nonBH vremenske okvire, opisane u poglavlju 2.4. Na slici 4.1.1 prikazana je korištena ruta na kojoj su obavljena mjerenja.

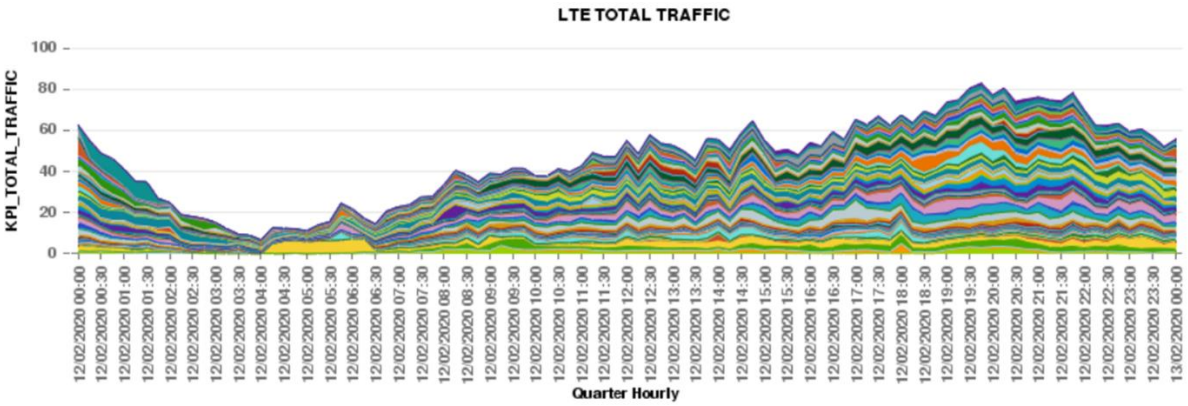
Na slici 4.1.1 istaknut je parametar jakosti LTE signala RSRP (engl. *Reference Signals Received Power*). Sa slike možemo zaključiti da je, osim na jednom manjem području u samom centru, Velika Gorica dobro pokrivena signalom sustava LTE.



Slika 4.1.1 Jakost LTE signala RSRP na području grada Velika Gorica

4.2. Definiranje vremenskih okvira

Kako bi se ispravno odabrali vremenski nonBH i BH okviri za terenska drive test mjerenja, korištena je agregirana statistika svih eNodeB (LTE bazna stanica objašnjena u poglavlju 2.1) lokacija u odabranom gradu Velika Gorica. Konkretno, promatrana je agregacija ukupnog podatkovnog prometa za prethodni dan i prikazana je u 15 minutnoj rezoluciji (slika 4.2.1). Pritom svaka pojedina boja na grafu sa slike 4.2.1 predstavlja LTE podatkovni promet ostvaren unutar 15 minutnog intervala u jednoj ćeliji.



Slika 4.2.1 Agregacija ukupnog podatkovnog prometa u 15 minutnoj rezoluciji

Kako je za kompletno drive test mjerenje grada Velika Gorica potrebno otprilike sat do sat i pol vremena, za nonBH odabran je vremenski okvir 09:00 – 11:30 h, dok je za BH vremenski okvir odabran 19:00 – 20:30 h.

4.3. Opis mjerne opreme

Za drive test mjerenje korišten je mjerni sustav TEMS Automatic, proizvod tvrtke Infovista. Mjerni sustav sastoji se od industrijskog računala, više mjernih modula za mjerenje govorne i podatkovne usluge na 2G i 3G tehnologiji, te mjernih terminala tipa Samsung Galaxy S8 i Sony Xperia Z5 za mjerenje govorne (VoLTE) i podatkovne usluge na LTE tehnologiji. U aplikaciji TEMS zapisuju se svi radijski i servisni parametri tijekom mjerenja, a vanjska GPS antena korištenjem GPS modula tim mjerenjima daje geografsku referencu.

Na slikama 4.3.1 i 4.3.2 prikazana je instalacija tog mjernog sustava.

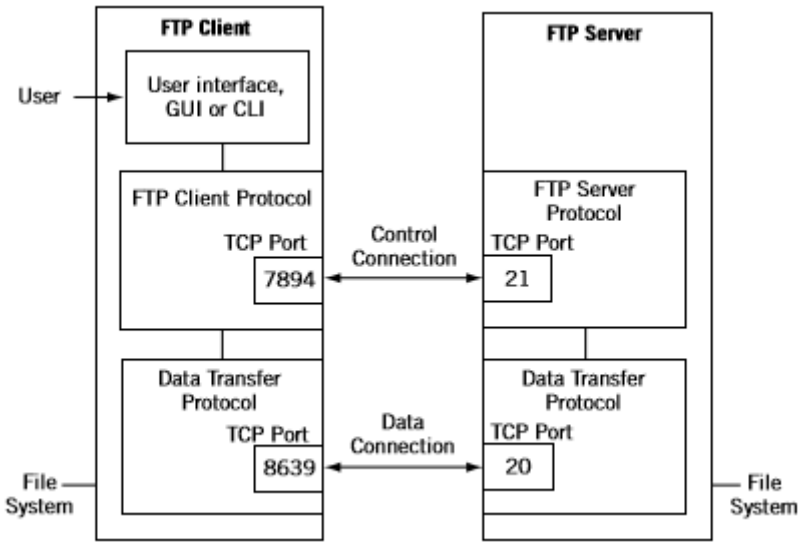
Slika 4.3.1 Instalacija mjernog sustava za drive test pomoću industrijskog računala

Slika 4.3.2 Instalacija mjernog sustava za drive test pomoću mjernih terminala

4.4. Opis mjerenja

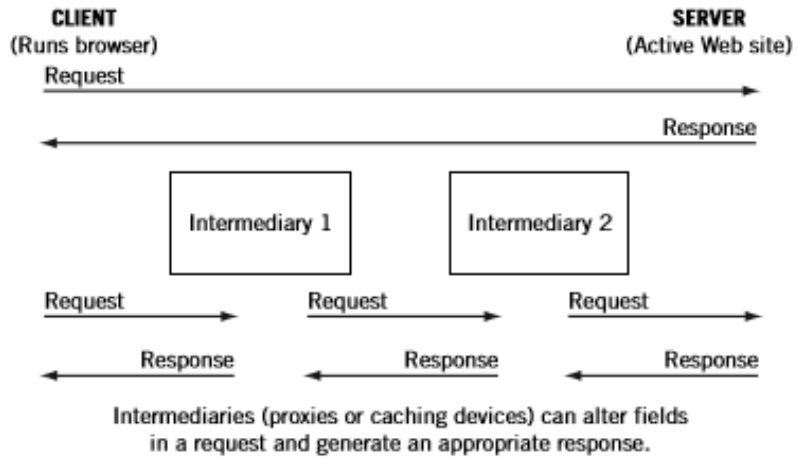
Za ovo specifično BH i nonBH napravit će se usporedna LTE data mjerenja za sva tri operatera. Stoga je za svaki od tri mjerna terminala napravljena cirkularna skripta koja analizira slijedeće servise:

- FTP DL (engl. *File Transfer Protocol)*
  - Protokol koji prenosi kopiju datoteke gdje je izvorna datoteka obično i dalje prisutna na izvorištu (engl. *Source)* te dostupna za ponovno kopiranje ukoliko udaljeni korisnik to ponovno zatraži. Koristi portove (engl. *Port)* 20 i 21 po TCP-u (engl. *Transmission Control Protocol)* i UDP-u (engl. *User Datagram Protocol)*. Port 21 koristi se za uspostavu konekcije klijenta sa poslužiteljem (engl. *Server)*, a port 20 se koristi za prenošenje podataka kao na slici 4.4.1. U ovom kontekstu servis se analizira na silaznoj vezi i to u smjeru od LTE bazne stanice (eNodeB) do mjernih terminala.
- FTP UL
  - Za FTP UL promet se odvija u suprotnom smjeru odnosno na uzlaznoj vezi. To znači da se servis analizira u smjeru od mjernih terminala prema LTE baznoj stanici.



Slika 4.4.1 FTP interakcija po portovima [23]

- HTTP DL (engl. *Hypertext Transfer Protocol)*
    - Protokol koji služi za prenošenje formatiranih web stranica u web preglednik gdje je preglednik klijent, a web stranica (lokacija) poslužitelj. Komunikacija teče TCP/UDP portom 80 odnosno 8080 koja se ostvaruje na način da klijent pošalje HTTP zahtjev (engl. *Request)* na što poslužitelj uzvraća HTTP odgovorom (engl. *Response)* što je i prikazano slikom 4.4.2. U kontekstu rada, HTTP DL servis se prati na silaznoj vezi, odnosno između eNodeB LTE bazne stanice i mjernih terminala u smjeru kako je navedeno redom.
- HTTP UL
    - Proces se odvija na posve jednak način samo što se sada analizira uzlazna veza i prati se promet u smjeru od mjernih terminala prema određenim LTE baznim stanicama.



Slika 4.4.2 HTTP interakcija [23]

- Streaming
    -
- Ping
    - Mogućnost provjere da li je druga strana, s kojom želimo ostvariti konekciju, „živa“ koristeći odredišnu IP adresu. Ping je jednostavna ICMP (engl. *Internet Control Message Protocol)* poruka koja se koristi da bi se provjerila dostupnost odredišta (uređaja, sustava, ...) prema kojoj se ping inicira te njihova mrežna vidljivost. Tako se u ovom kontekstu provjerava navedena

funkcionalnost između LTE bazne stanice i mjernih terminala u oba smjera na način da se pošalje ICMP poruka (ping) na koju se dobije odgovor ukoliko je odredišna strana dostupna. To ujedno znači i da je konekcija uspješna kao na slici 4.4.3.

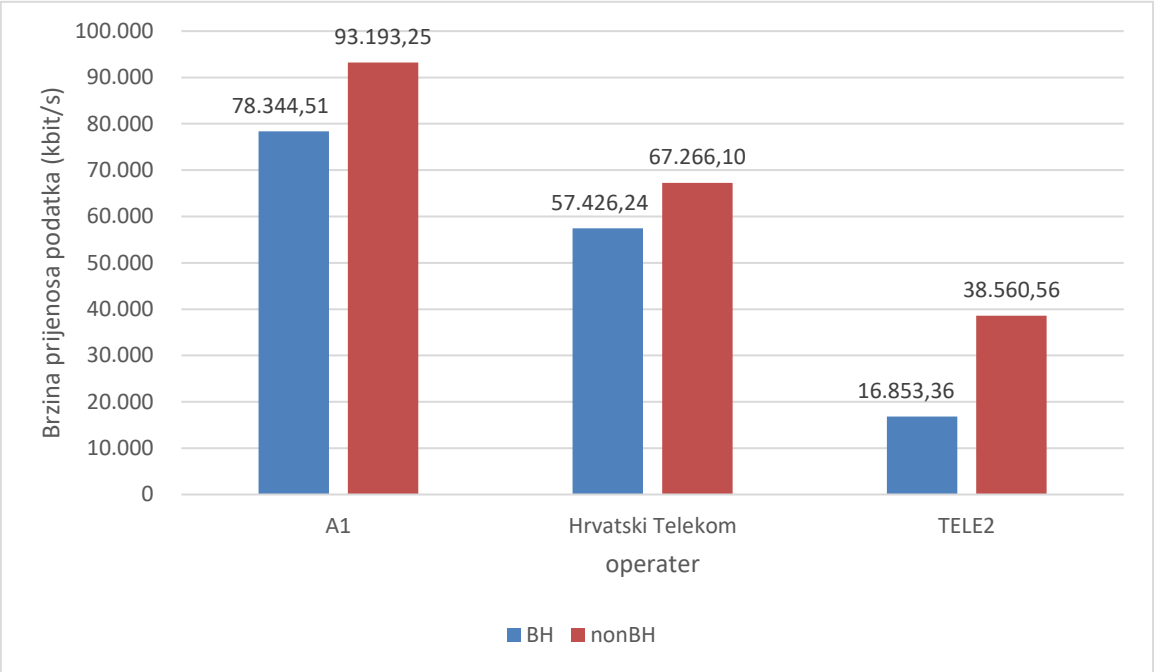
```
C:\Završni rad>ping 74.125.23.1

Pinging 74.125.23.1 with 32 bytes of data:
Reply from 74.125.23.1: bytes=32 time=293ms TTL=43
Reply from 74.125.23.1: bytes=32 time=293ms TTL=43
Reply from 74.125.23.1: bytes=32 time=293ms TTL=43
Reply from 74.125.23.1: bytes=32 time=293ms TTL=43

Ping statistics for 74.125.23.1:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
Approximate round trip times in milli-seconds:
    Minimum = 293ms, Maximum = 293ms, Average = 293ms

C:\Završni rad>ping www.google.com

Pinging www.google.com [172.217.19.100] with 32 bytes of data:
Reply from 172.217.19.100: bytes=32 time=16ms TTL=53
Reply from 172.217.19.100: bytes=32 time=16ms TTL=53
Reply from 172.217.19.100: bytes=32 time=15ms TTL=53
Reply from 172.217.19.100: bytes=32 time=15ms TTL=53

Ping statistics for 172.217.19.100:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
Approximate round trip times in milli-seconds:
    Minimum = 15ms, Maximum = 16ms, Average = 15ms
```

Slika 4.4.3 Slanje ICMP poruke, ping

4.5. Analiza provedenih mjerenja

Nakon uspješno obavljenih terenskih mjerenja, analiza je sljedeća:

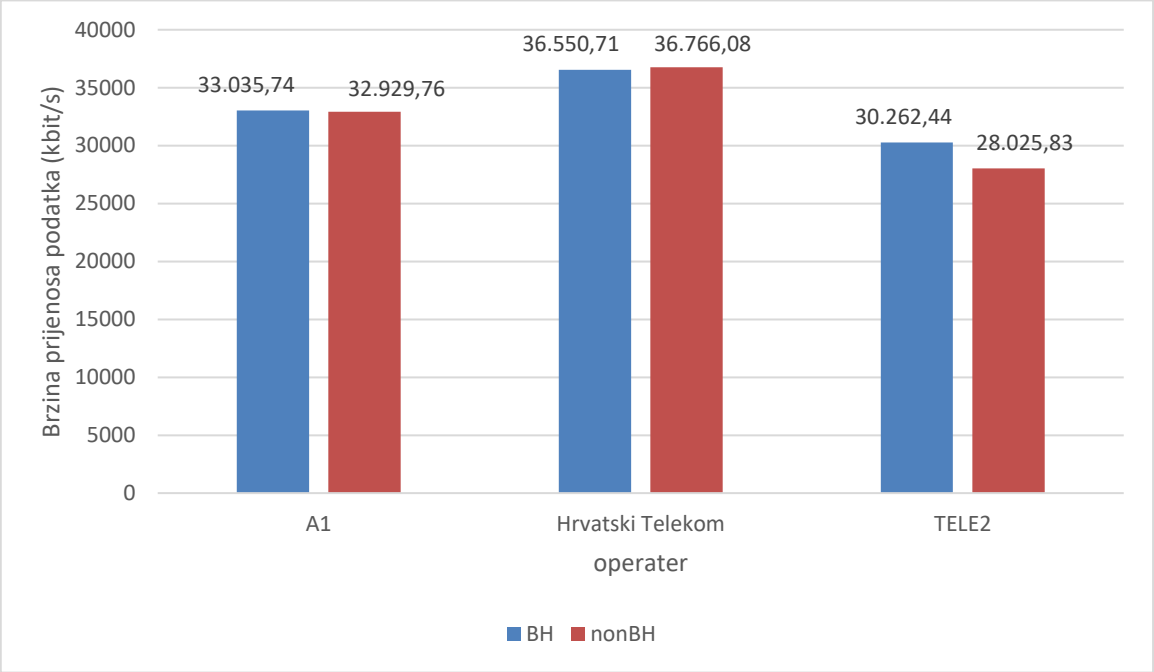
1. Kod FTP DL servisa najbolje se vidi razlika između rezultata za vrijeme BH odnosno nonBH obzirom da se radi o servisu koji može dati jako dobre performanse, a rezultat je prikazan slikom 4.5.1.



Slika 4.5.1 FTP DL throughput (Kbit/s)

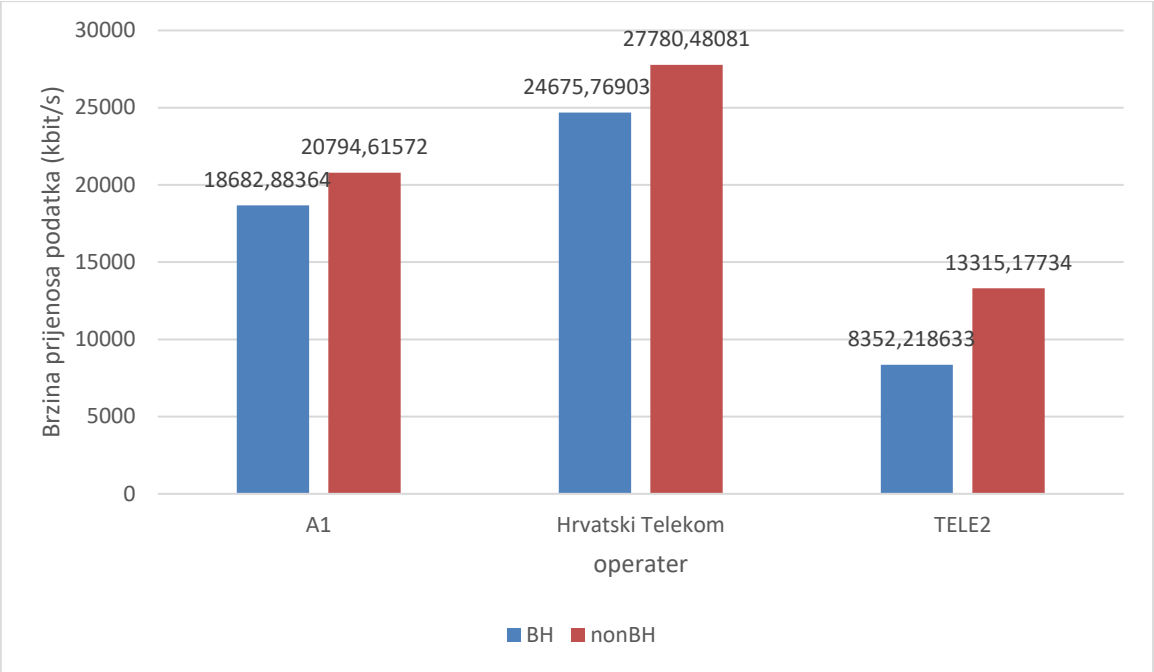
Sa grafa se jasno vidi razlika između najprometnijeg (BH) i ne-najprometnijeg sata (nonBH) gdje su izmjerene vrijednosti izražene u Kbit/s koje predstavljaju stvarnu propusnost FTP DL servisa. Operator kod kojeg je izmjerena najveća razlika između BH i nonBH te čije su performanse općenito najlošije je TELE2. Razlog tome leži u najmanjoj količini spektra koje koristi TELE2 operator, a on iznosi 35 MHz dok A1 i Hrvatski Telekom koriste više spektra, A1 75 MHz a Tmobile 55 MHz. To potvrđuje i pravilo Shanonnovog teorema koji govori da više spektra daje veće brzine odnosno veći ukupni kapacitet. Bez obzira na veliku razliku u rezultatima, to su i dalje brzine koje prosječnom korisniku zadovoljavaju potrebe za FTP DL.

2. Za servis FTP UL priča je nešto drugačija. Njaprije vidimo da se ovdje radi o dosta manjim brzinama što se tiče A1 i Hrvatski Telekom operatora, a razlog tome leži u činjenici da sustav LTE tehnološki još uvijek ne podržava agregaciji nosioca na uzlaznoj vezi, pa stoga sva tri operatera na uzlaznoj vezi rade u širini kanala 20 MHz. TELE2 je tu ostvario nešto bolje rezultate nego u prethodnom mjerenju, iako postotno i ovdje bilježi najveći pad. Razlog tome je nesimetričnost prometnog modela, odnosno korisnici više preuzimaju podataka s inetrenta nego što ga šalju. Na slici 4.5.2 vidi se puno manja razlika u rezultatima između BH i nonBH, a najslabije performanse ponovno daje TELE2 operator iz istog razloga kao i u mjerenju sa slike 4.5.1.



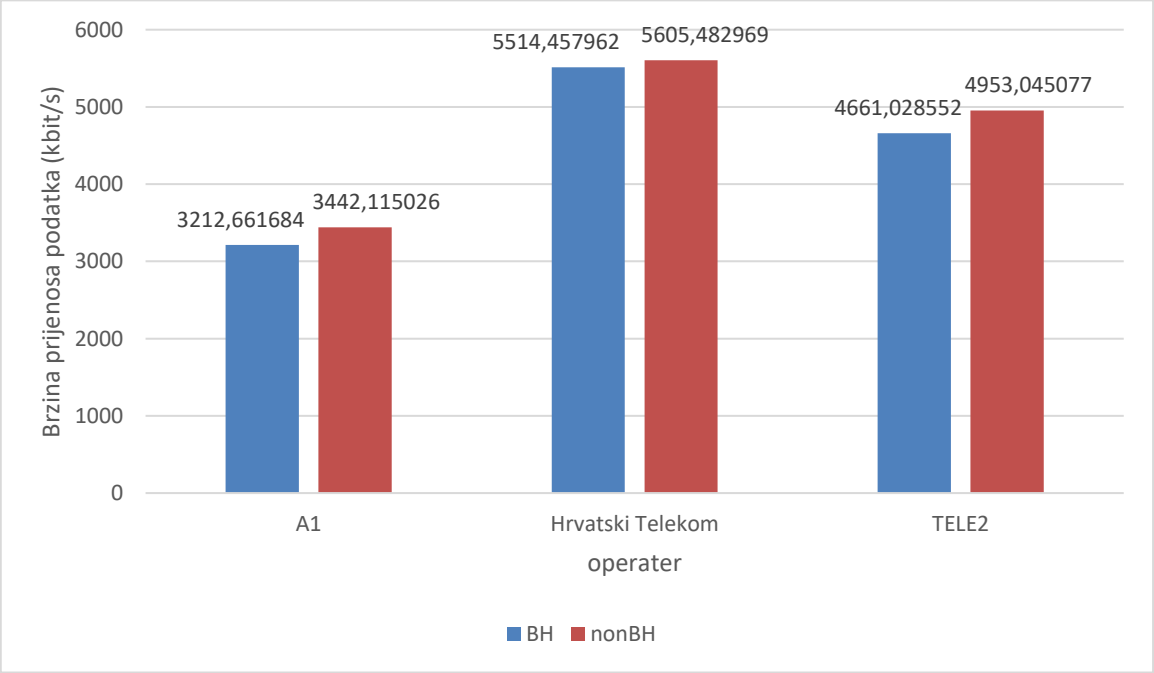
Slika 4.5.2 FTP UL throughput (Kbit/s)

3. HTTP DL servis je također pokazao nešto veće razlike u rezultatima, ali u odnosu na FTP DL je to i dalje osjetno manje jer su i vršne brzine puno manje kako je prikazano slikom 4.5.3. Naime, ovdje je Hrvatski Telekom odnio „pobjedu“ u performansama stvarne propusnosti čije BH vrijednosti su dale rezultat gotovo 3 puta veći od onog izmjerenog za TELE2 koji i ovdje zaostaje za ostala 2 operatora.



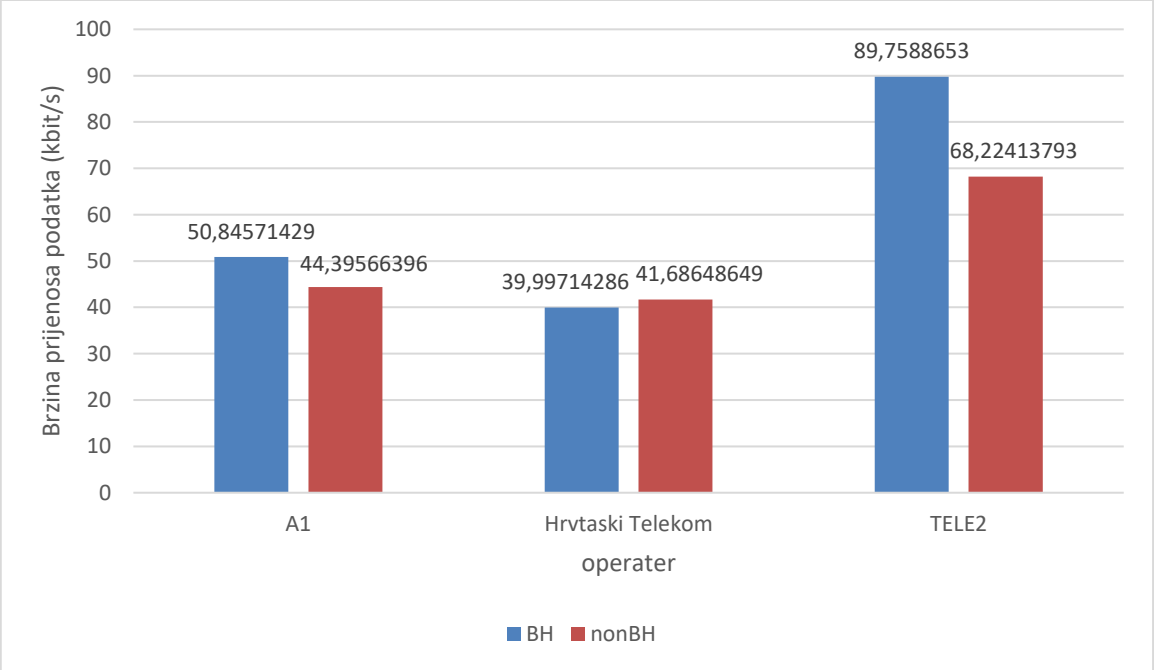
Slika 4.5.3 HTTP DL throughput (Kbit/s)

4. Streaming servis je očekivano pokazao vrlo male brojke što i ne čudi obzirom da sami servis ne zahtjeva velike vršne brzine prijenosa, a samim time ni mjerenja nisu rezultirala velikim razlikama između BH i nonBH. To je prikazano slikom 4.5.4.



Slika 4.5.4 Streaming servis throughput (Kbit/s)

5. Zadnji je ostao ping servis (slika 4.5.5) koji se od prethodnih servisa razlikuje na način da daje bolje performanse ukoliko je izmjerena vrijednost niža. Što govori da manje ping vrijednosti znače bolje performanse. U ovom testu istaknuo se TELE2 operator u čijem se slučaju vidi osjetno izražena degradacija. Izmjereni rezultati daju puno veće kašnjenje, točnije gotovo duplo u odnosu na A1 te više nego duplo u odnosu na Hrvatski Telekom. Vrijednosti koje je ovo mjerenje dalo, imale su značajan utjecaj na cjelokupna mjerenja te krajnji rezultat gdje se TELE2 operator pokazao najslabijim.

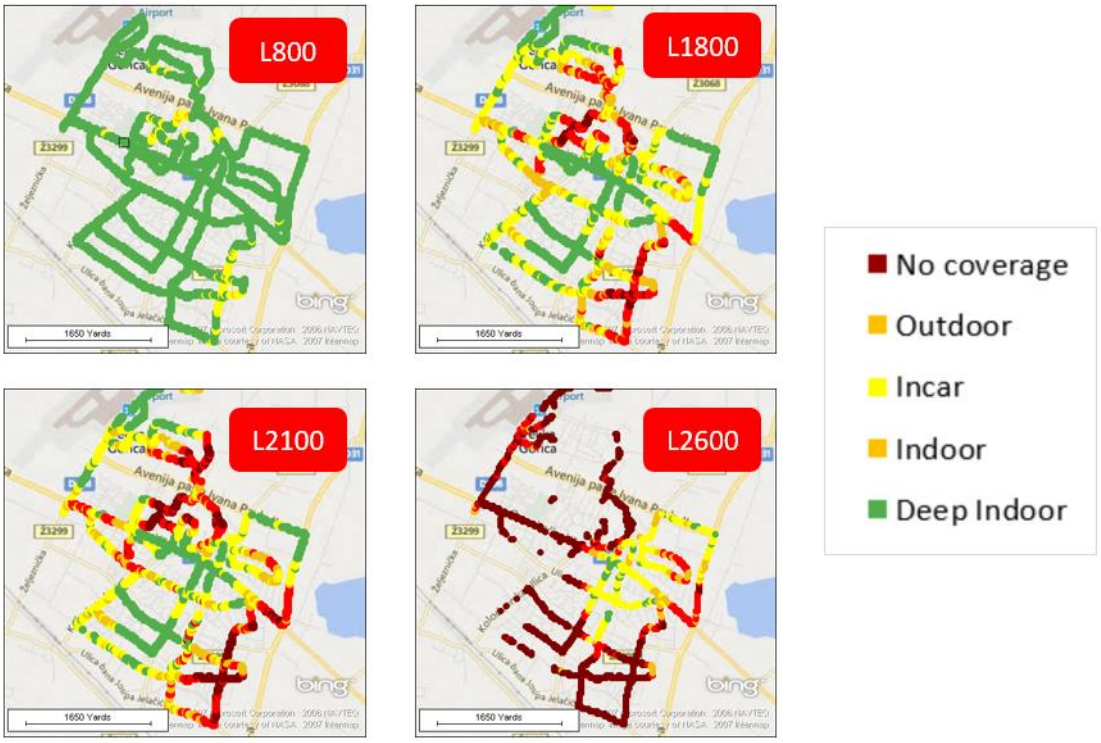


Slika 4.5.5 Ping Round Trip Time (ms)

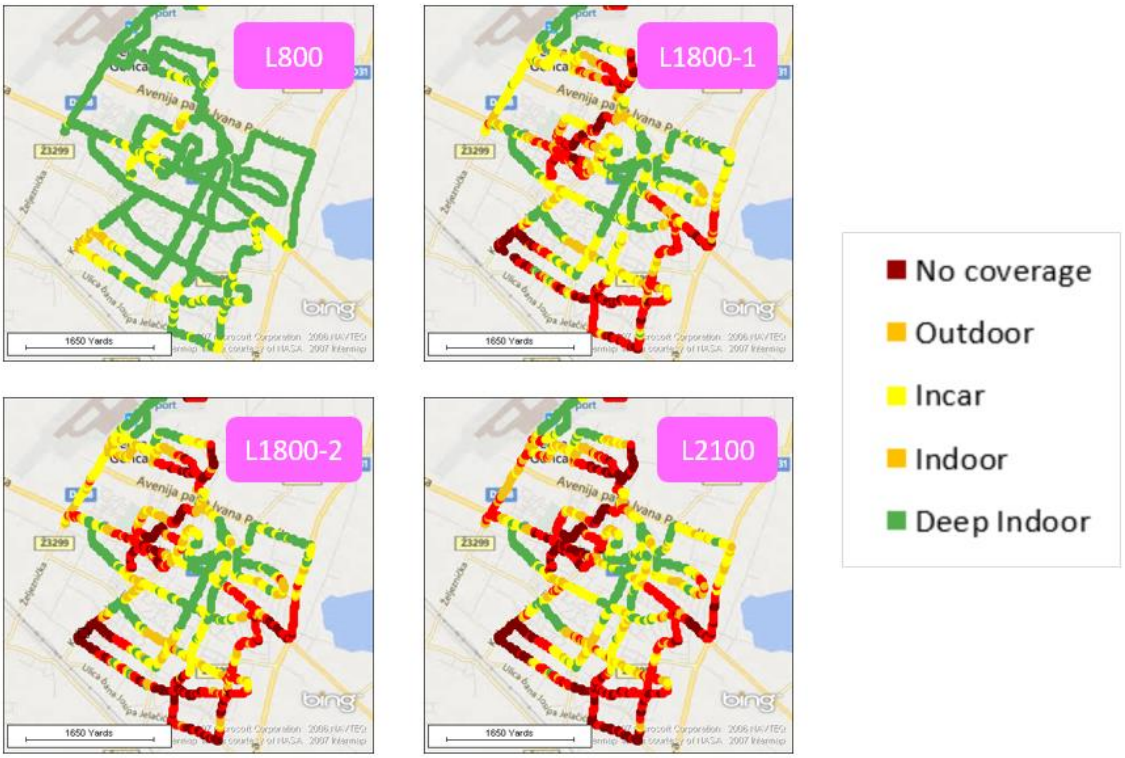
Prema slici 4.5.7 može se vidjeti kako A1 trenutno koristi sva četiri frekvencijska pojasa (B1, B3, B7 i B20) koja ima na raspolaganju (Slika 4.5.6), ukupne širine 75 MHz. Hrvatski Telekom koji u različitim gradovima koristi razne kombinacije frekvencijskih pojasa na raspolaganju trenutno ima šest frekvencijskih pojasa (Slika 4.5.6) u gradu Velika Gorica trenutno koristi četiri frekvencijska pojasa, ukupne širine 55 MHz. TELE2 za LTE trenutno aktivno koristi 2 frekvencijska pojasa ukupne širine 35 MHz, iako ima dodijeljena tri (B1, B3 i B7).

Technology/Band	A1	TM	T2
GSM900 (B8)	953.3-959.5 MHz (92-122)	941.1-942.6 MHz (32-38)	
		947.4-953.1 MHz (62-90)	
GSM1800			1845.4-1849.8 (713-735)
UMTS900 (B8)	2974 (934,8 MHz, 5)	3025 (945 MHz)	2939 (927.8 MHz, 5) 925.3-930.3 MHz
	2994 (938,8 MHz, 5)	/	/
UMTS2100 (B1)	10762 (2152.4) 2nd	10562 (2112.4 MHz)	10662 (2132.4 MHz)
	10787 (2157.4) 1st	10587 (2117,4 MHz)	
		10612 (2122.4 MHz)	10637 (2127,2 MHz)
LTE800 (B20)	6225 (798.5 MHz, 15) 791-806 MHz	6375 (813.5 MHz, 15) 806-821 MHz	/
LTE1800 (B3)	1749 (1859.9 MHz, 20) 1849.9-1869.9 MHz	1501 (1835.1 MHz, 20) 1825.1-1845.1 MHz	1301 (1815.1 MHz, 20) 1805.1-1825.1 MHz
		1899 (1874.9 MHz, 10) 1869.9-1879.9 MHz	
LTE2100 (B1)	500 (2160 MHz, 20)	100 (2120.0 MHz, 10)	325 (2142.5 MHz, 15)
		124 (2122.4, 5)	
LTE2600 (B7)	3050 (2650.0 MHz, 20) 2640-2660 MHz	3250(2660-2680 MHz, 20)	2850 (2620-2640 MHz, 20)
NB IoT	6156 (791.6075 MHz, 180kHz) Guard Band	6366 (812.5925 MHz, 180kHz) In Band	/

Slika 4.5.6 Dodijeljeni frekvencijski pojasevi po operaterima



Slika 4.5.7 Frekvencijski pojasi korišteni u Velikoj Gorici za A1



Slika 4.5.7 Frekvencijski pojasi korišteni u Velikoj Gorici za Tmobile

Slika 4.5.7 Frekvencijski pojasi korišteni u Velikoj Gorici za Tele2

Zaključak

Crowdsource alati su vrlo dobar izvor mjerenja baš kao što je prikazano i u ovom radu zato što kao statistički podatkovni pokazatelji daju uvid u trenutno stanje i već prije samog početka mogu dati odgovor ima li uopće smisla i isplativosti odlučiti se na vlastito terensko mjerenje. Konkretno, u ovom slučaju *crowdsource* mjerenja su pokazala trenutnu sliku Republike Hrvatske iz vlastite perspektive kao i iz perspektive svijeta odnosno kako se zemlja nosi sa svjetskim trendovima i razmjerima. Jedan bitan zaključak koji je izvučen iz otvorenih pokazatelja je prikazan slikom 2.4.1. On govori da promet u mobilnim podatkovnim mrežama kontinuirano raste s eksponencijalnim karakterom, a to je spomenuto i u uvodu rada gdje se očekuje dodatno povećanje prometa dolaskom nove 5G tehnologije. Međutim, unatoč eksponencijalnom rastu prometa, mobilni operateri u Republici Hrvatskoj i dalje uspijevaju pravovremeno djelovati proširenjem kapaciteta, što na kraju rezultira u i povećanjem brzinama prijenosa podataka. Još jedna vrlo bitna stavka s kojom se operateri konstantno moraju boriti je da je Hrvatska izrazito turistička zemlja pa se pojavljuje i problem sezonalnosti. Posebno izazovno je osigurati dovoljan kapacitet i kvalitetu usluge u ljetnim mjesecima za domaće i strane goste te za lokalne ljude na obali i otocima čiji su interesi za vrijeme tih mjeseci očito na prvom mjestu. Zadnjih godina Hrvatska sve više turista privlači i zimi tako da je vrijeme ozbiljnijih analiza dodatno produljeno, a kroz vrijeme se pokazalo kako na performanse ne utječu samo stavke koje su u domeni operatera, već i društveno-političke odluke spomenute u poglavlju 2.4. Terenskim mjerenjima pokazana je jasna razlika u prosječnim brzinama prijenosa podataka između termina maksimalnog podatkovnog opterećenja i minimalnog podatkovnog opterećenja kao i vrijeme kašnjenja za vrijeme spomenutih termina. Time je dokazano da sva 3 operatora ostvaruju lošije performanse na silaznoj vezi u vrijeme BH nego u vrijeme nonBH, a to se najizraženije može vidjeti na primjeru izmjerenog servisa FTP DL sa slike 4.5.1 koji od svih mjerenih servisa može pokazati najbolje performanse. Najslabije rezultate ostvario je pritom TELE2 mobilni operater zato što trenutno ima akvizirano najmanje frekvencijskog spektra. Stoga u domeni brzine prijenosa podataka na mobilnoj mreži četvrte generacije čime i dalje svjedočimo nastavku takmičenja između operatera A1 Hrvatska i Hrvatski Telekom, barem još za neko skorije vrijeme. Sveukupno gledajući, RH dobro stoji po pitanju performansi mobilne mrežne tehnologije i ostaje samo vidjeti hoće li isto nastaviti i u budućnosti.

Popis kratica

3GPP *3rd Generation Partnership Project*

ACD *Automatic Channel Detection*

BH *Busy Hour*

DL *Downlink*

EPC *Evolved Packet Core*

EPS *Evolved Packet System*

EU *European Union*

E-UTRAN *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*

FDD *Frequency Division Duplex*

FTP *File Transfer Protocol*

GGSN *Gateway GPRS Support Node*

GPS *Global Positioning System*

GSM *Global System for Mobile Communications*

HAKOM *Hrvatska Regulatorna Agencija za Mrežne Djelatnosti*

HSPA+ *Evolved High Speed Packet Access*

HTTP *Hypertext Transfer Protocol*

ICMP *Internet Control Message Protocol*

IMT *International Mobile Telecommunications*

IP *Internet Protocol*

LTE *Long Term Evolution*

MME *Mobility Management Entity*

MPSK *M-ary Phase Shift Keying*

NonBH *nonBusy hour*

OFDMA *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*

P/S-GW *Packet Data Network and Serving Gateway*

QAM *Quadrature Amplitude Modulation*

RMON *Remote Network Monitoring*

RSRP *Reference Singnals Received Power*

RTT *Round Trip Time*

SAE *System Architecture Evolution*

SC-FDMA *Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*

SGSN *Serving GPRS Support Node*

TCP *Transmission Control Protocol*

TDD *Time Division Duplex*

UDP *User Datagram Protocol*

UE *User Equipment*

UL *Uplink*

UMTS *Universal Mobile Telecommunications System*

USIM *Universal Subscriber Identity Module*

VoLTE *Voice over LTE*

Popis slika

Slika 2.1 3GPP izdanja vezana za LTE i 5G 2

Slika 2.1.1 Napredak u LTE arhitekturi 4

Slika 2.1.2 Razvijanje „flat“ arhitekture 4

Slika 2.1.3 Evolved Packet Core, jezgra mreže LTE 5

Slika 2.1.4 E-UTRAN arhitektura 6

Slika 2.1.5 Evolved Packet System 6

Slika 2.2.1 OFDMA 7

Slika 2.2.2 SC-FDMA 8

Slika 2.3.1 FDD frekvencijski spektar 9

Slika 2.3.2 TDD frekvencijski spektar 10

Slika 2.3.3 Spektar digitalne dividende 10

Slika 2.3.4 Frekvencijski pojasevi po tehnologijama i operaterima 12

Slika 2.4.1 LTE podatkovni promet za razdoblje 2014. – 2017. 14

Slika 3.1.1 Aktivno mrežno mjerenje 17

Slika 3.2.1.1 Mjerenja po operativnim sustavima 19

Slika 3.2.1.2 Mjerenja prema tehnologiji 19

Slika 3.2.1.3 Prikaz broja mjerenja po operatorima u traženom periodu 19

Slika 3.2.1.4 Prosječne upload brzine po operatoru u traženom periodu 20

Slika 3.2.1.5 Prosječne download brzine po operatoru u traženom periodu 21

Slika 3.2.1.6 Prikaz mjerenja po tehnologiji u traženom periodu 22

Slika 3.2.2.1 Svjetska prosječna download i upload mobilna brzina 23

Slika 3.2.2.2 Prosječna download i upload brzina Južne Koreje 24

Slika 3.2.2.3 Prosječna download i upload brzina RH 24

Slika 3.2.3.1 RTR-NetTest istraživanje u RH 25

Slika 3.2.3.2 Uređaji s kojih su inicirana mjerenja u RH.....25

Slika 3.2.3.3 RTR-NetTest istraživanje u Austriji.....26

Slika 4.1.1 Jakost LTE signala RSRP na području grada Velika Gorica.....27

Slika 4.2.1 Agregacija ukupnog podatkovnog prometa u 15 minutnoj rezoluciji.....28

Slika 4.3.1 Instalacija mjernog sustava za drive test pomoću industrijskog računala.....29

Slika 4.3.2 Instalacija mjernog sustava za drive test pomoću mjernih terminala.....29

Slika 4.4.1 FTP interakcija po portovima.....30

Slika 4.4.2 HTTP interakcija.....31

Slika 4.4.3 Slanje ICMP poruke, ping.....32

Slika 4.5.1 FTP DL throughput (Kbit/s).....33

Slika 4.5.2 FTP UL throughput (Kbit/s).....34

Slika 4.5.3 HTTP DL throughput (Kbit/s).....35

Slika 4.5.4 Streaming servis throughput (Kbit/s).....35

Slika 4.5.5 Ping Round Trip Time (ms).....36

Slika 4.5.6 Korišteni pojasevi po operaterima.....37

Literatura

[1] ERICSSON, *Ericsson Mobility Report November 2019*, 36 stranica [online] citirano 2020-1-19, dostupno na: https://www.ericsson.com/4acd7e/assets/local/mobility-report/documents/2019/emr-november-2019.pdf

[2] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION (IMT), *About mobile technology and IMT-2000*, citirano 2020-1-25, dostupno na: https://www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html

[3] AHMED HAMZA, *Long Term Evolution (LTE) – A Tutorial*, Network Systems Laboratory, Simon Fraser University, October 13, 2009

[4] 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP), *Releases*, citirano 2020-2-6, dostupno na: https://www.3gpp.org/images/articleimages/Releases/2019_large_ongoing_releases.jpg

[5] HARRI HOLMA, ANTTI TOSKALA, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced, second edition*, Wiley, April 25, 2011, ISBN: 978-0-470-66000-3

[6] HARRI HOLMA, ANTTI TOSKALA, *WCDMA for UMTS – HSPA Evolution and LTE, fifth edition*, Wiley, 2010, ISBN: 978-0-470-68646-1

[7] WIKIMEDIA COMMONS, *Evolved Packet Core*, citirano 2020-1-27, dostupno na: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Evolved_Packet_Core.svg

[8] HARRI HOLMA, ANTTI TOSKALA, *LTE Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced*, Wiley, 2012, ISBN: 978-1-119-97405-5

[9] TUTORIALS POINT, *LTE Network Architecture*, 4 stranice [online] citirano 2020-1-27, dostupno na: https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm

[10] PANAGIOTA D. GIOTOPOULOU, *The evolution of mobile communications: Moving from 1G to 5G, and from human-to-human to machine-to-machine communications*, National and Kapodistrian University of Athens, November 2015, Athens

[11] ELECTRONICS NOTES, *LTE Frequency Bands, Spectrum & Channels*, citirano 2020-2-6, dostupno na: https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/4g-lte-long-term-evolution/frequency-bands-channels-spectrum.php

[12] COMMSUPDATE, *TeliaSonera launches world's first commercial LTE networks in Sweden and Norway*, citirano 2020-1-28, dostupno na: https://www.commsupdate.com/articles/2009/12/14/teliasonera-launches-worlds-first-commercial-lte-networks-in-sweden-and-norway/

[13] HRVATSKA REGULATORNA AGENCIJA ZA MREŽNE DJELATNOSTI HAKOM, *Digitalna dividenda*, 7 stranica [online] citirano 2020-1-28, dostupno na: https://www.hakom.hr/UserDocsImages/2012/radiokomunikacije/Sakal-DD-SEE_Digi_TV-20121204.pdf

[14] DR. SC. ALBERTO TEKOVIĆ, *Bežične računalne mreže*, Algebra d.o.o., Zagreb, 2010, ISBN: 978-953-322-030-7

[15] HRVATSKA REGULATORNA AGENCIJA ZA MREŽNE DJELATNOSTI HAKOM, *Baza frekvencijskog spektra za javne pokretne komunikacijske mreže (GSM/UMTS/LTE)*, 2

stranice [online] citirano 2020-2-7, dostupno na: https://www.hakom.hr/UserDocsImages/2019/radio_komunikacije/Baza_radiofrekvencijskog%20spektra_20190423.pdf

[16] G. XILOURIS, G. GARDIKIS, K. SARSEMBAGIEVA, A. KOURTIS, *SNMP-driven active measurements in DiffServ networks*, IEEE, 07 November, 2013, ISBN: 978-1-4673-3122-7

[17] VENKAT MOHAN, Y. R. JANARDHAN REDDY, K. KALPANA, *Active and Passive Network Measurements: A Survey*, Computer Science Department, G. Pulla Reddy Engineering College: Autonomous, Kurnool, India, 2011, ISSN: 0975-9646

[18] HRVATSKA REGULATORNA AGENCIJA ZA MREŽNE DJELATNOSTI HAKOM, *HAKOMetar*, citirano 2020-1-29, dostupno na: https://www.hakom.hr/default.aspx?id=1144

[19] HRVATSKA REGULATORNA AGENCIJA ZA MREŽNE DJELATNOSTI HAKOM, *HAKOMetar Plus*, citirano 2020-1-29, dostupno na: https://hakometarplus.hakom.hr/home

[20] HRVATSKA REGULATORNA AGENCIJA ZA MREŽNE DJELATNOSTI HAKOM, *HakometarPlus statistika mjerenja*, citirano 2020-1-30, dostupno na: https://hakometarplus.hakom.hr/statistics

[21] SPEEDTEST BY OOKLA, *Speedtest Global Index*, citirano 2020-1-30, dostupno na: https://www.speedtest.net/global-index#mobile

[22] AUSTRIAN REGULATORY AUTHORITY FOR BROADCASTING AND TELECOMMUNICATIONS (RTR), *RTR-NetTest*, citirano 2020-1-30, dostupno na: https://www.netztest.at/en/Statistik

[23] WALTER GORALSKI, *The Illustrated Network: How TCP/IP Works in a Modern Network, sec. edition*, Morgan Kaufmann, May 12, 2017, ISBN: 978-0-128-11027-0

ALGEBRA
VISOKO UČILIŠTE

ANALIZA PERFORMANSI PODATKOVNIH USLUGA ZA RAZLIČITA PROMETNA OPTEREĆENJA U JAVNOJ, POKRETNOJ MREŽI SUSTAVA LTE

Pristupnik: Karlo Čolak, 0321005967

Mentor: dr. sc. Alberto Teković, prof. v.š.