

# Utjecaj veličine SINR-a na brzinu prijenosa u 4G/5G mrežama

---

**Pavlik, Veronika**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*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:200:440798>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-12**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**UTJECAJ VELIČINE SINR-A NA BRZINU PRIJENOSA  
U 4G/5G MREŽAMA**

**Diplomski rad**

**Veronika Pavlik**

**Osijek, 2023.**

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ČETVRTA GENERACIJA (4G) MOBILNIH TELEKOMUNIKACIJSKIH MREŽA ...2</b>	
<b>2.1. Arhitektura 4G mreže .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Slojevi protokola E-UTRAN-a .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3. Struktura kanala .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4. 4G radijsko sučelje.....</b>	<b>16</b>
2.4.1. Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosioca (OFDM) .....	16
2.4.2. Višestruki pristup s ortogonalnom raspodjelom podnosioca (OFDMA) .....	20
2.4.3. Ponovno korištenje frekvencije .....	21
<b>2.4.4. Višestruki pristup s frekvencijskom podjelom s jednim nosiocem (SC-FDMA).....</b>	<b>23</b>
2.4.4. 1. Blok dijagram SC-FDMA.....	Error! Bookmark not defined.
<b>2.5. Dinamičko prilagođavanje parametara veze.....</b>	<b>25</b>
<b>2.6. Raspoređivanje resursa .....</b>	<b>27</b>
<b>2.7. Uvjeti propagacije signala i tehnike upravljanja pogreškama .....</b>	<b>29</b>
2.7.1. Ispravljanje pogrešaka unaprijed .....	32
2.7.2. Zahtjev za automatsko ponavljanje .....	34
2.7.3. Hibridni ARQ .....	34
<b>2.8. Tehnike višestrukih antena .....</b>	<b>35</b>
2.8.1. Višestruki prijenos (prostorni diverziti).....	36
2.8.2. Prostorno multipleksiranje MIMO .....	39
2.8.3. Oblikovanje snopa .....	43
<b>3. PETA GENERACIJA (5G) MOBILNIH TELEKOMUNIKACIJSKIH MREŽA .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1. Arhitektura 5G mreže .....</b>	<b>47</b>
<b>3.2. Skupovi 5G protokola.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3. Nesamostalna i samostalna arhitektura 5G mreže .....</b>	<b>53</b>
<b>3.4. Mrežno raslojavanje .....</b>	<b>55</b>
<b>4. KAPACITET MOBILNE MREŽE .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1. Shannon – Hartley teorem .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2. Shannon-ova granica .....</b>	<b>60</b>

<b>4.3. Proračun kapaciteta u 4G mreži.....</b>	<b>62</b>
4.3.1. Maksimalni kapacitet 4G ćelije .....	67
<b>5. MJERENJE PROPUSNOSTI U 4G I 5G MREŽI.....</b>	<b>69</b>
5.1. Mjerenje SINR-a i propusnosti u 4G mreži.....	70
5.2. Mjerenje SINR-a i propusnosti u 5G mreži.....	78
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>84</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>86</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>89</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>90</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>91</b>

## 1. UVOD

U današnje vrijeme bežične komunikacije su postale neizostavan dio suvremenog društva, pružajući ljudima brz i praktičan način za razmjenu informacija. Uz to razvoj mobilnih mreža poput 4G i 5G imaju ključnu ulogu u zadovoljavanju sve većih zahtjeva za brzim prijenosom podataka. Jedan od ključnih čimbenika koji utječe na brzinu prijenosa je omjer snage signala i snage interferencije i šuma – SINR (eng. *Signal-to-Interference plus Noise Ratio*). SINR predstavlja omjer korisnog signala, interferencije i šuma te ima izravan utjecaj na brzinu prijenosa podataka. Ovaj diplomski rad istražuje utjecaj SINR-a na brzinu prijenosa u 4G/5G mrežama, s posebnim naglaskom na Shannon-Hartley-ev teorem, koji pruža teorijski okvir za razumijevanje ograničenja brzine prijenosa podataka.

U drugom je poglavlju objašnjena četvrta generacija širokopolasnih mobilnih mreža (4G). Kroz ovo poglavlje se analiziraju svojstva 4G mreža, arhitektura, slojevi protokola, struktura kanala, prilagodba veze, 4G radio sučelje, tehnike kao što su OFDM, OFDMA, SC-FDMA i tehnike višestrukih antena. U trećem je poglavlju razmotrena peta generacija širokopolasnih mobilnih mreža (5G) te su objašnjeni arhitektura, skupovi protokola, dvije varijante 5G mreža (samostalnu i nesamostalnu), te raslojavanje (segmentiranje) mreže. U četvrtom je poglavlju razmatran Shannon-Hartley-ev teorem i njegova veza s 4G/5G mrežama te SINR-om. Posljednje poglavlje posvetit će se praktičnom eksperimentu koji se izvodio koristeći mjernu opremu, uključujući mobilni uređaj i aplikaciju TEMS Pocket. Tijekom eksperimenta, mjerili su se parametri poput SINR-a, RSSI-ja, RSRP-a i RSRQ-a. Rezultati mjerenja su uspoređeni sa Shannon-Hartley-evim grafom. Zadnje poglavlje daje zaključna razmatranja o utjecaju SINR-a i propusnosti na prijenos informacija.

## 2. ČETVRTA GENERACIJA (4G) MOBILNIH TELEKOMUNIKACIJSKIH MREŽA

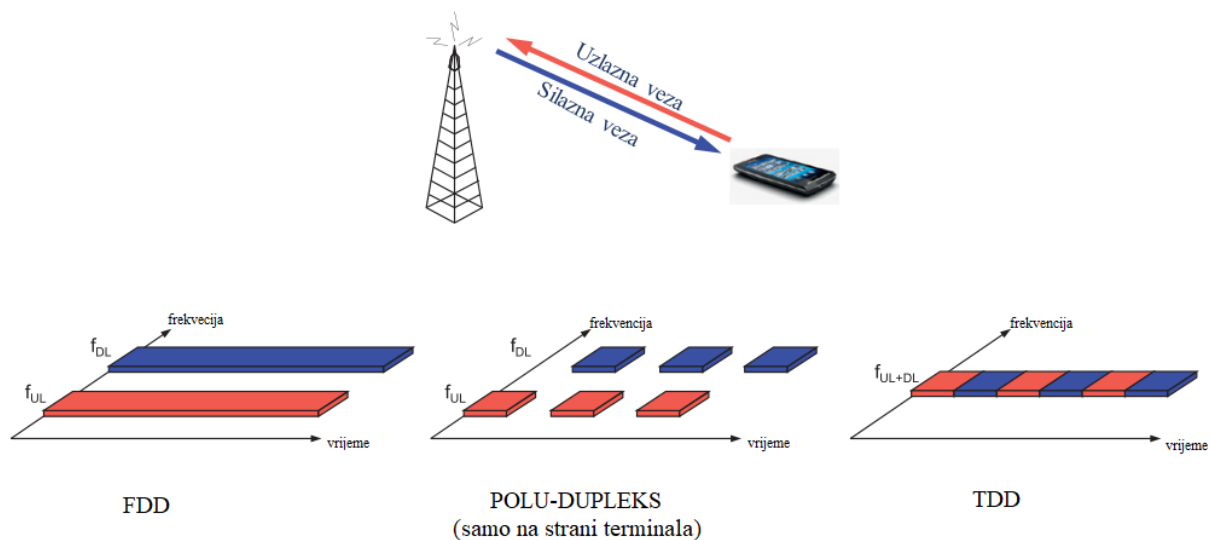
Četvrta generacija širokopojasnih mobilnih mreža (4G) nastala je kao nasljednik prethodnih generacija mobilnih mreža kao što su 2G i 3G. 4G standard je usvojen 2008. godine, a početak njegove komercijalne primjene dogodio se 2010. godine. U 4G mreže se ubraja LTE (eng. *Long Term Evolution*), koji se koristi i u Republici Hrvatskoj. 3GPP je organizacija koja je razvila i dalje razvija LTE specifikacije. Prva specifikacija LTE-a je objavljena u 3GPP izdanju 8 (krajem 2008. (3GPP Release 8), a od tada su specifikacije redovito ažurirane, s novim značajkama koje poboljšavaju performanse i rješavaju nove slučajeve upotrebe. Do izdanja 14 sva istraživanja i poboljšanja su usmjerena na 4G mrežu, a od izdanja 15 kreće se razvijati 5G mreža. Iako se počeo koristi 5G i dalje se razvija 4G, ali u manjoj mjeri. Kroz određeno vrijeme će 4G zastarjeti dok će 5G konačno biti svima dostupan. No već je u razradi i šesta generacija(6G) koja bi trebala doći vremenski brže nego što je 5G došao nakon 4G. Kroz ovaj će se diplomski ovaj će se diplomski rad LTE imenovati kao 4G.

4G nudi korisnicima mobilnu širokopojasnost i multimedijske usluge. Mobilna širokopojasnost omogućuje vrlo brzi prijenos podataka, brz pregled web stranica, videozapisa i slično. Dok multimedijske usluge pružaju više i kvalitetnije multimedijske usluge korisnicima poput video poziva, videoigara, strujanja videozapisa visoke razlučivosti bez zastoja ili usporenja ili kvarenje kvalitete slike i ostalo. Kombinacijom mobilne širokopojasnosti i multimedijskih usluga korisnicima se omogućava da na efikasan i brz način koriste napredne mobilne usluge i aplikacije koje zahtijevaju visoke brzine prijenosa podataka i dobru kvalitetu mreže. Kada je riječ o brzinama, 4G brzina u silaznoj vezi (eng. *Downlink*) je najmanje 100 Mb/s, a kreće se do 326 Mb/s. Dok u uzlaznoj vezi (eng. *Uplink*) najmanja brzina je 50 Mb/s i postiže maksimalnu brzinu od 86 Mb/s. Latencija u radijskoj pristupnoj mreži (4G) mora iznositi manje od 10 ms. Slobodno se može reći da 4G ima sposobnost adaptivnosti koja dolazi do izražaja kada su u pitanju fleksibilnost širine kanala i izbor metode dupleksa. 4G podržava fleksibilnu širinu kanala od 1.4 MHz do 20 MHz. To znači da se širina kanala može prilagoditi prema potrebama i uvjetima mreže.

[1]

Visok stupanj fleksibilnosti spektra jedna je od glavnih karakteristika 4G tehnologije radijskog pristupa. Cilj fleksibilnosti spektra je omogućiti razvoj 4G radijskog pristupa u različitim frekvencijskim pojasevima s različitim karakteristikama, uključujući različite rasporede dupleksa i različite veličine dostupnog spektra. Jedan važan dio LTE zahtjeva u smislu fleksibilnosti spektra

je mogućnost implementacije radijskog pristupa temeljenog na LTE-u u uparenom i neuparenom spektru. Stoga LTE podržava dupleks aranžmane koji se temelje na frekvenciji i vremenskoj podjeli. Na slici 2.1. su ilustrirana tri vrste dupleksa. Na lijevoj strani se nalazi dupleks s frekvencijskom podjelom - FDD (eng. *Frequency-Division Duplex*) i tu se podrazumijeva da se silazni i uzlazni prijenos odvija u različitim, dovoljno odvojenim frekvencijskim pojasevima ali se odvijaju istovremeno. Dupleks s vremenskom podjelom - TDD (eng. *Time-Division Duplex*) prikazan desno na slici (2.1) podrazumijeva da se silazni i uzlazni prijenos odvijaju u različitim vremenskim odsječcima koji se ne preklapaju znači što slijede da jedan drugog, ali koriste istu frekvenciju. Stoga TDD može raditi u neuparenom spektru, dok FDD zahtijeva upareni spektar. [1][2]



**Slika 2.1.** Dupleks s frekvencijskom i vremenskom podjelom [2]

Prilagodljivost između FDD i TDD omogućuje operatorima da odaberu odgovarajuću metodu dupleksa ovisno o njihovim potrebama, frekvencijskom spektru i karakteristikama mreže. Može se zaključiti da adaptivnost ukazuje na sposobnost prilagodbe širine kanala i izbora metode dupleksa kako bi se postigla maksimalna fleksibilnost i optimizacija performansi u različitim uvjetima mreže. 4G također podržava polu-dupleks FDD na terminalu kao što je ilustrirano u sredini slike 2.1. U polu-dupleksnom FDD-u, prijenos i prijem na određenom terminalu odvojeni su i po frekvenciji i po vremenu. Bazna stanica još uvijek koristi puni dupleks (eng. *full-duplex*) FDD budući da istovremeno može uslužiti različite terminale u uzlaznoj i silaznoj vezi. Glavna prednost polu-dupleksnog FDD-a je smanjena složenost terminala jer u terminalu nije potreban

dvostruki filter. Ovo je posebno korisno u slučaju višepojasnih terminala koji bi inače trebali više skupova dvostrukih filtera. [1][2]

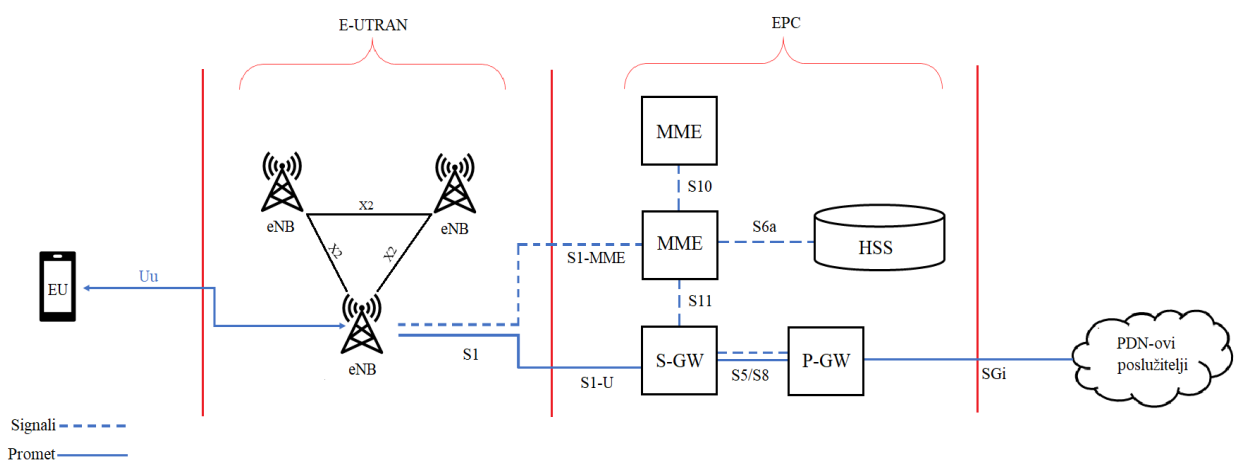
## 2.1. Arhitektura 4G mreže

Sustav 4G mreže se tvori od pristupne i jezgrene mreže te je sustav u potpunosti zasnovan na IP protokolu. Pristupna mreža ili stvarna radijska pristupna mreža (eng. RAN - *Radio Access Network*) predstavlja E-UTRAN (eng. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*), a E-UTRAN je pristupni dio EPS-a (eng. *Evolved Packet System*) odnosno 4G sustava. E-UTRAN je bežična mreža koja se sastoji od baznih stanica (eng. eNodeB - *Evolved Node B*) i pruža bežičnu mrežu između mobilnih uređaja i jezgrene mreže. Razlozi zbog kojih je došlo do razvoja pristupne mreže jest smanjenje cijene po bitu odnosno pružanje više usluga po nižoj cijeni. Nastojalo se omogućiti fleksibilno korištenje postojećih i novih frekvencijskih pojaseva, čime se povećava kapacitet mreže i omogućava bolje iskorištenje raspoloživog spektra. Pri razvoju se težilo pojednostavljenju arhitekture kako bi se jednostavnije moglo upravljalo mrežom. Isto tako zahtijevala su se otvorena sučelja koja su olakšavali interakciju s drugim aplikacijama i uređajima. Pristupna mreža se također razvijala kako bi omogućila prihvatljivu potrošnju terminala drugim riječima nastojalo se osiguravati da mobilni uređaji troše manje energije prilikom korištenja mreže kako bi se produljio životni vijek baterije i samo trajanje baterije. Jezgrena mreža ili EPC-SAE (eng. *Evolved Packet Core-System Architecture Evolution*) predstavlja arhitekturu sustava koja podržava pristupnu mrežu E-UTRAN uz smanjenje broja mrežnih elemenata u odnosu na prethodne generacije mobilnih sustava što rezultira pojednostavljenjem funkcionalnosti i efikasnijem upravljanjem mrežom. EPC-SAE je potpuno temeljena na IP protokolu, što znači da sve usluge prijenosa podataka i stvarno vremenske usluge koriste IP protokol. To omogućava bolje integraciju s postojećim IP mrežama i omogućava jednostavniju implementaciju i upravljanje mrežom. EPC-SAE isto tako omogućava smanjenje kašnjenja u prijenosu podataka i povezivanje i prijenos poziva putem mobilne mreže i fiksnih ili drugih bežičnih pristupnih tehnologija. Kombinacijom E-UTRAN i EPC-SAE se tvori paketni sustav EPS, odnosno telekomunikacijski sustav koji predstavlja četvrtu generaciju pokretnih mreža (4G).[1][3]

EPS se u potpunosti temelji na IP-u (eng. *Internet protocol*) što omogućava prijenos kako stvarno-vremenskih tako i podatkovnih usluga. Kada se mobilna stanica poveže s mrežom EPS tada joj se dodjeli IP adresa.



Slika 2.2. označava arhitekturu 4G sustava koja prikazuje proces prijenosa podataka i dva dijela 4G mreže. Prva komponenta je korisnička oprema (eng. *User Equipment - UE*), što je najčešće mobilni uređaj. Korisnička oprema se sastoji od terminalne oprema i univerzalna kartica s integriranim krugom (USIM kartica – eng. *Universal Subscriber Identity Module*). Korisnička oprema šalje podatke (promet) preko E-UTRAN-a. E-UTRAN upravlja radijskom komunikacijom između mobilnog uređaja i razvijene paketne jezgre (EPC) i sadrži samo jednu komponentu to jest razvijene bazne stanice, koje se nazivaju eNB (eng. *Evolved Node B*). Bazna stanica eNB kontrolira mobilne uređaje u jednoj ili više ćelija, a kada bazna stanica komunicira s mobilnim uređajem tada je ona poznata kao njegov servisni eNB. Korisnička oprema EU komunicira samo sa jednom baznom stanicom i jednom ćelijom istovremeno. Postoje dvije glavne funkcije koje podržava eNB. Prva je da eNB šalje i prima radijske prijenose za sve mobitele koristeći analogne i digitalne funkcije obrade signala 4G zračnog sučelja. Druga funkcija eNB je da kontrolira rad svih svojih mobilnih uređaja, šaljući im signalne poruke kao što su naredbe za primopredaju. Svaka eNB povezuje se s EPC-om preko S1 sučelja, a može se povezati i s obližnjim baznim stanicama preko X2 sučelja, koje se uglavnom koristi za signalizaciju i prosljeđivanje paketa tijekom primopredaje (eng. *handover*).[1][2]



**Slika 2.2.** Arhitektura EPS (4G sustava) [3]

Na slici 2.2. vidi se da se EPC sastoji od više komponenti u usporedbi s E-UTRAN-om. EPC se sastoji od MME (eng. *Mobility Management Entity*), S-GW (eng. *Serving Gateway*), PDN-GW (eng. *Packet Data Network (PDN) Gateway*) i HSS (eng. *Home Subscriber Server*). Uz to, u EPC mreži postoje još tri komponente koje su slične sustavima za upozoravanje na potrese i tsunamije (eng. ETWS - *Earthquake and Tsunami Warning System*), registrima identiteta opreme (eng. EIR *Equipment Identity Register*) i funkcijama kontrole politike i naplate (eng. PCRF - *Policy and*

*Charging Rules Function*). Iz E-UTRAN-a se signali i promet šalje prema EPC-u. MME i S-GW su jedine dvije komponente koje direktno primaju signale i promet od E-UTRAN-a. Uslužni prilazni čvor S-GW djeluje kao usmjerivač i prosljeđuje podatke između bazne stanice i PDN (eng. *The Packet Data Network*) pristupnika. Entitet za upravljanje mobilnošću MME kontrolira rad mobilne telefonije na višim slojevima putem signalnih poruka i poslužitelja domaćih pretplatnika HSS-a. Paketni mrežni prilazni čvor PDN-GW komunicira s vanjskim svijetom, tj. mreže paketnog prijenosa podataka PDN, koristeći SGi sučelje. Svaka mreža paketnih podataka identificirana je imenom pristupne točke (APN). PDN pristupnik ima istu ulogu kao GPRS čvor za podršku (GGSN) i uslužni GPRS čvor za podršku (SGSN) u UMTS i GSM mrežama. Poslužitelj domaćih pretplatnika (HSS) prenesen je iz UMTS-a i GSM-a i središnja je baza podataka koja sadrži informacije o svim pretplatnicima mrežnog operatera. [2]

U komunikaciji različiti entiteti LTE mreže koriste sljedeća sučelja:

- Uu (radio sučelje) nalazi se između terminala (UE) i eNB te prenosi podatke i kontrolne poruke
- X2 sučelje se nalazi između dvije eNB prenosi podatke i kontrolne poruke
- S1 sučelje se nalazi između eNB i MME/S-GW i prenosi podatke i kontrolne poruke
- S1-MME sučelje se nalazi između eNB i MME i prenosi kontrolne poruke
- S1-U sučelje se nalazi između eNB i SGW i prenosi podatke, NE prenosi kontrolne poruke
- S11 sučelje se nalazi između SGW i MME i prenosi kontrolne poruke
- S6a sučelje se nalazi između MME i HSS i prenosi kontrolne poruke
- S5 sučelje se nalazi se između SGW i PGW (ako su dva uređaja u istoj mreži) i prenosi podatke i neke kontrolne poruke
- S8 sučelje se nalazi se između SGW i PGW (ako su dva uređaja u različitim mrežama) i prenosi podatke i neke kontrolne poruke
- SGi sučelje se nalazi između PDN-GW i vanjske IP mreže(Internet) [1]

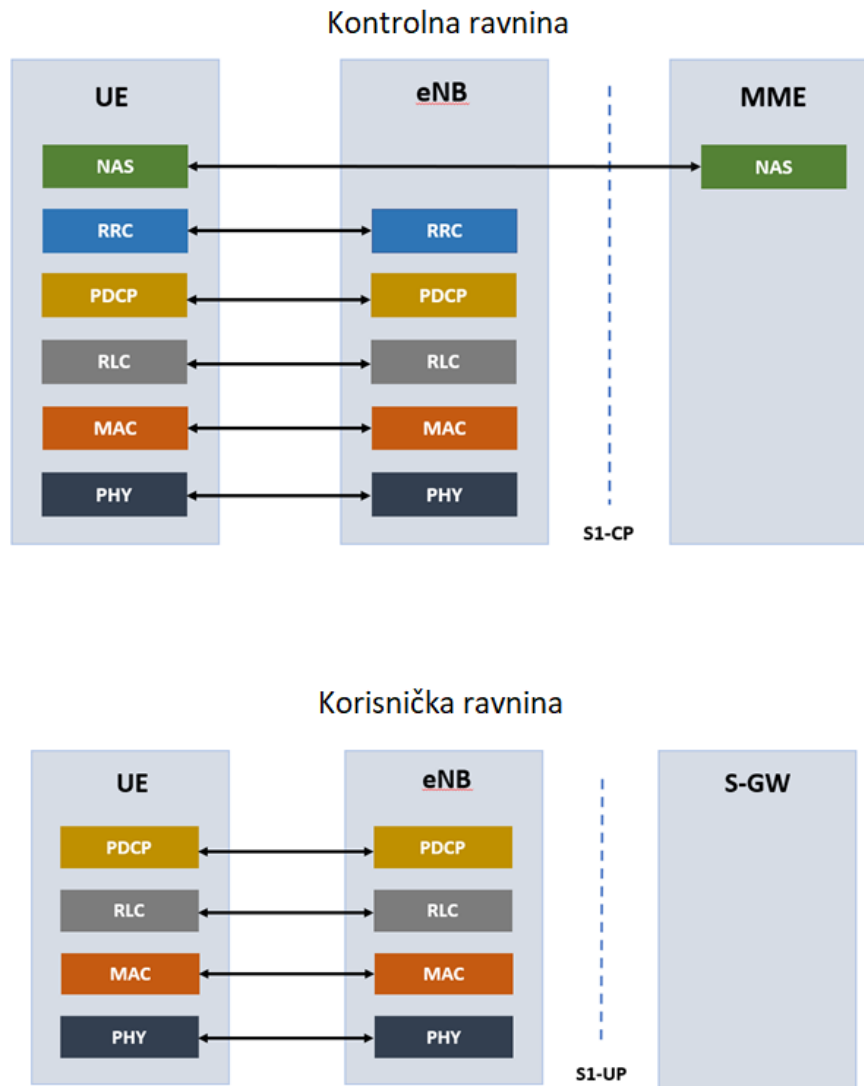
Svako od navedenih sučelja je specifično jer se iznad IP koriste protokoli specijalizirani za upravljanje mobilnošću ili izmjenom podataka kod koje se mogu uzeti u obzir mobilnosti.

## **2.2. Slojevi protokola E-UTRAN-a**

Arhitektura radijske pristupne mreže (RAN) drugim riječima E-UTRAN se sastoji od dvije razine:

- Korisnička razina (eng. UP - *User plane*)
- Kontrolna razina (eng. CP - *Control plane*)

Korisnička razina se upotrebljava za prijenos korisničkih podataka, kao što su glas, video i podaci, između korisničkih mobilnih uređaja i mreža. Uglavnom se korisnička razina koristi za prijenos podataka između korisnika i baznih stanica (eNB). Takvi podaci se prenose kroz E-UTRAN radio kanale, koji su fizički kanali za prijenos podataka između korisnika i baznih stanica u 4G mrežama. Kontrolna razina se koristi za upravljanje mrežom i kontrolu veza između korisničkih uređaja i mreže. Vršiti se i signalizacija između korisničkih uređaja, baznih stanica i EPC kako bi se uspostavile i održavale veze, vršila autentifikacija i slično. Fizička sučelja, kao što su radio veze između baznih stanica i korisničkih mobilnih uređaja, povezana su sa protokolnim stogom. Protokolni stog omogućava razmjenu podataka i signalizacijskih poruka između mrežnih elemenata. Protokolni stog se sastoji od gornjeg i donjeg sloja. Gornji sloj obuhvaća protokole koji se koriste za upravljanje podacima u korisničkoj ravnini kao i protokole koji pomažu u usmjeravanju podataka u mreži. Donji sloj odnosno transportni sloj prenosi informaciju od točke do točke, odgovoran je za usmjeravanje podataka i signalizacijskih poruka između mrežnih elemenata. Slika 2.3. ilustrira arhitekturu RAN protokola kontrolne ravnine i korisničke ravnine. Kao što se vidi na slici, mnogi entiteti protokola zajednički su korisničkim i kontrolnim razinama što omogućava efikasniju komunikaciju između korisnika i mrežnih elemenata te podržava funkcionalnost 4G mreže. [2]

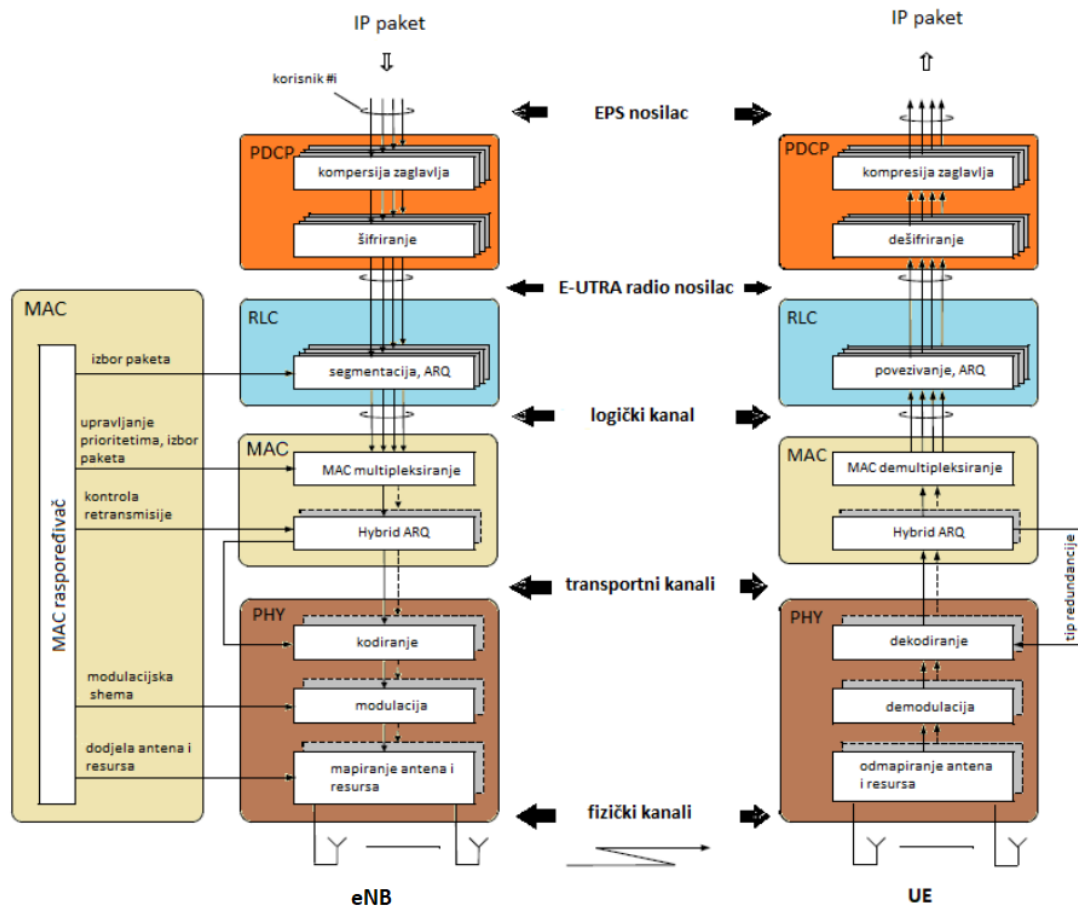


Slika 2.3. Arhitektura protokola radio sučelja

4G radijska pristupna mreža koristi jedan ili više radio nosilaca na koje se IP paketi mapiraju u skladu s njihovim zahtjevima za kvalitetom usluge (eng. QoS – *Quality of Service*). Na slici 2.4. je prikazana arhitektura 4G protokola za silaznu vezu (eng. *downlink*), a arhitektura 4G protokola za uzlaznu vezu je veoma slična. [2]

Protokol za konvergenciju paketnih podataka (eng. PDCP - *Packet Data Convergence Protocol*) koristi kompresiju IP zaglavlja kako bi smanjio broj bitova za prijenos preko radio sučelja. Za sažimanje zaglavlja koristi se robustno sažimanje zaglavlja (eng. ROHC - *Robust Header Compression*), standardizirani algoritam koji se koristi u raznim mobilnim komunikacijskim tehnologijama. PDCP ima ulogu i šifriranja podataka te osiguravanja integriteta prenesenih podataka na kontrolnoj razini. Također se brine o isporuci podataka u pravilnom redoslijedu i uklanjanju duplikata za potrebe primopredaje. Na primateljevoj strani, PDCP provodi dešifriranje

i dekompresiju podataka. Svaki radijski nositelj konfiguriran za terminal ima svoj vlastiti PDCP entitet. [2][4]



Slika 2.4. Struktura 4G protokola (silazna veza) [5]

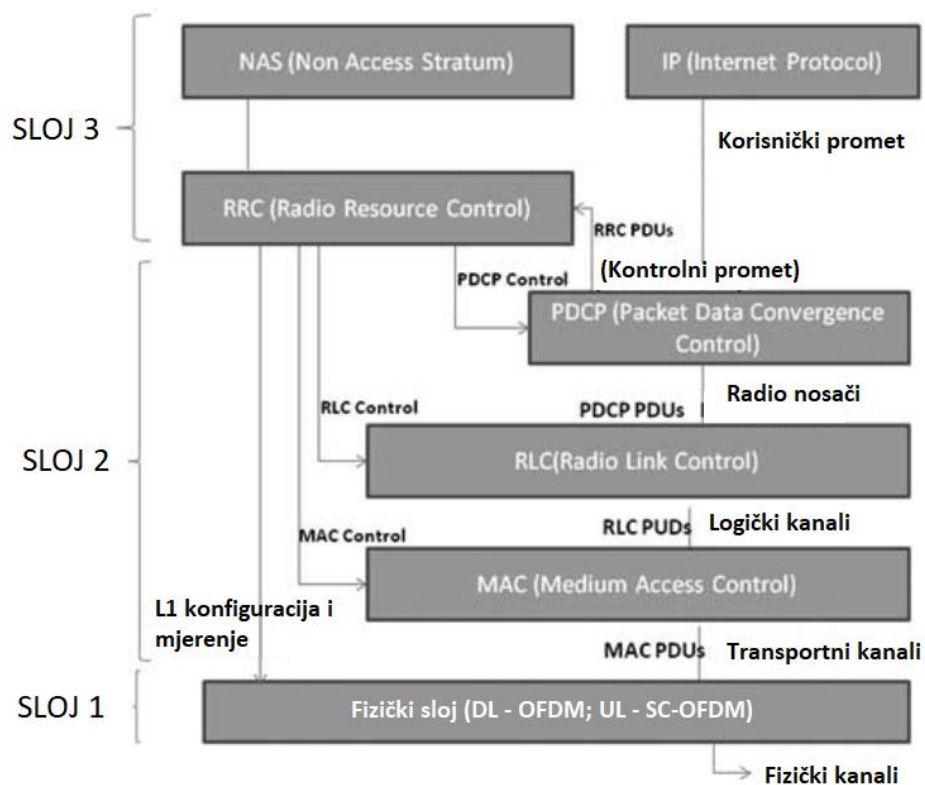
Kontrola radijske veze (eng. RLC - *Radio link control*) ima važnu ulogu u upravljanju radio vezom. Njene odgovornosti uključuju segmentaciju ili ulančavanje podataka, upravljanje ponovnim prijenosom, otkrivanje duplikata i isporuku podataka u pravilnom redosljedju višim slojevima. RLC pruža svoje usluge PDCP protokolu na razini radio nositelja. Za svaki konfigurirani radijski nositelj terminala postoji jedan RLC entitet koji obavlja te funkcije. RLC radi u 3 načina: transparentni način (TM), nepotvrđeni način (UM) i potvrđeni način rada (AM). [2]

Kontrola pristupa mediju (eng. MAC - *Medium Access Control*) ima ključnu ulogu u upravljanju višestrukim logičkim kanalima, hibridnim ARQ retransmisijama i raspoređivanjem silazne i uzlazne veze. Raspoređivanje se obavlja na strani eNB-a za silazni i uzlaznu vezu. Hibridni ARQ protokol je dio MAC protokola i prisutan je i na odašiljačkom i na prijemnom dijelu. MAC pruža

RLC-u usluge putem logičkih kanala i odgovoran za mapiranje između logičkih kanala i transportnih kanala. [2]

Fizički sloj (eng. PHY - *physical layer*) je najniži sloj i prenosi sve informacije iz transportnog kanala, MAC, kroz zračno sučelje. Fizički sloj upravlja kodiranjem/dekodiranjem, modulacijom/demodulacijom, kontrolom pogrešaka, mapiranjem s više antena i drugim tipičnim funkcijama fizičkog sloja. Fizički sloj je odgovoran za fizičku pripremu i prijenos podataka između baznih stanica i mobilnih uređaja. [2]

Slika 2.5. prikazuje kako se E-UTRAN općenito može raspodijeliti na tri sloja. U prvom sloju E-UTRAN-a se nalazi samo fizički sloj. Drugi sloj se naziva još i kontrolni sloj jer se sastoji od funkcionalnosti koje upravljaju kontrolom i signalizacijom u mreži, a tvori se od tri sloja protokola (MAC, RLC i PDCP). Treći sloj se naziva aplikacijski sloj koji obuhvaća aplikacijske protokole i usluge koje se pružaju korisnicima mobilnih mreža (primjer usluga su glas, podatci, multimedijske aplikacije, internet i ostale aplikacije koje korisnik na mobilnom uređaju može posjedovati). Aplikacijski sloj se sastoji od RCC, NAS i IP protokola. [4]



Slika 2.5. Shema za skup protokola E-UTRAN-a [4]

### 2.3. Struktura kanala

MAC sloj ima zadaću pružanja usluga RLC sloju putem različitih logičkih kanala. Svaki logički kanal ima svoju specifičnu svrhu i nosi određenu vrstu informacija. Općenito, logički kanali se mogu podijeliti na kontrolne kanale i prometne kanale. Kontrolni kanali koriste se za prijenos kontrolnih i konfiguracijskih informacija koje su neophodne za ispravan rad LTE sustava. S druge strane, prometni kanali služe za prijenos korisničkih podataka koji se šalju kroz mrežu.

Logički kontrolni kanala su:

- Zbirni kontrolni kanal (eng. BCCH – *Broadcast Control Channel*)
- Kontrolni kanal za upravljanje radio pozivima (eng. PCCH – *Paging Control Channel*)
- Opći kontrolni kanal (eng. CCCH – *Common Control Channel*)
- Namjenski kontrolni kanal (eng. DCCH – *Dedicated Control Channel*)
- Kontrolni kanal za grupno odašiljanje (eng. MCCH – *Multicast Control Channel*) [2]

Zbirni kontrolni kanal (BCCH) je silazni kanal koji se koristi za prijenos sistemskih informacija s mreže na sve terminale u ćeliji. Prije pristupa u sustav, terminal treba prikupiti informacije o sustavu kako bi saznao kako je sustav konfiguriran i kako se pravilno ponašati unutar ćelije. Kontrolni kanal za upravljanje radio pozivima (PCCH) je silazni kanal koji se koristi za obavještanje UE-a o dolaznom pozivu odnosno koristi se za pozivanje terminala čija lokacija na razini ćelije nije poznata mreži. *Paging* poruka stoga treba biti poslana u više ćelija. Opći kontrolni kanal (CCCH) se koristi za isporuku kontrolnih informacija u smjeru uzlazne i silazne veze kada ne postoji potvrđena veza između UE-a i eNB-a – tj. tijekom uspostavljanja veze. Namjenski kontrolni kanal (DCCH) se koristi za prijenos kontrolnih informacija koje se odnose na određeni UE, i u smjeru uzlazne i silazne veze. Ovaj kanal se koristi za individualnu konfiguraciju terminala kao što su različite primopredajne poruke. Kontrolni kanal za grupno odašiljanje (MCCH) je kanal na silaznoj vezi koji se koristi za prijenos kontrolnih informacija prema UE-ovima (terminalima) unutar određene ćelije. Ovaj kanal prenosi kontrolne informacije koje su potrebne za prijem grupnog kanala za više korisnika (MTCH). [2][5]

Prometni logički kanali su:

- Prometni kanal za grupno odašiljanje (eng. MTCH – *Multicast Traffic Channel*)
- Namjenski kanal prometa (eng. DTCH – *The Dedicated Traffic Channel*)

Namjenski kanal prometa (DTCH) je kanal koji se koristi za učinkovit prijenos korisničkih podataka do ili od terminala. Ovaj logički kanal omogućuje prijenos različitih vrsta korisničkih podataka uključujući i one koji nisu vezani za MBSFN (eng. *Multimedia Broadcast Multicast Service Single Frequency Network*) silazni prijenos. DTCH se koristi za prijenos svih korisničkih podataka između terminala i mreže, pružajući pouzdanu i brzu komunikaciju u oba smjera. Prometni kanal za grupno odašiljanje (MTCH) je kanal koji se koristi za prijenos korisničkih podataka za MBMS (eng. *Multimedia Broadcast Multicast Service*) usluge u silaznoj vezi (jednosmjernan kanal). [2][5]

Od fizičkog sloja, MAC sloj koristi usluge u obliku transportnih (prijenosnih) kanala. Prijenosni kanal je definiran načinom i karakteristikama informacije koja se prenosi preko radijskog sučelja. Podaci na transportnom kanalu organizirani su u transportne blokove. U svakom vremenskom intervalu prijensa (eng. TTI – *Transmission Time Interval*), prenosi se najviše jedan prijenosni blok dinamički promjenjive veličine preko radio sučelja do/od terminala ako nema prostornog multipleksiranja. Kada postoji prostorno multipleksiranje (MIMO), mogu postojati do dva prijenosna bloka po TTI-ju. Svaki prijenosni blok je povezan s odgovarajućim transportnim formatom (eng. TF - *Transport Format*) koji određuje način prijensa tog bloka preko radijskog sučelja. Transportni format obuhvaća razne informacije koje su ključne za prijenosni blok, uključujući veličinu transportnog bloka, shemu modulacije i kodiranja te mapiranje antena. Ove informacije definiraju kako će se prijenosni blok prenijeti preko radijskog sučelja, osiguravajući optimalnu učinkovitost i kvalitetu prijensa. Variranjem transportnog formata, MAC sloj može ostvariti različite brzine prijensa podataka. Kontrola brzine je stoga poznata i kao odabir transportnog formata.[2]

Za LTE, fizički sloj osigurava sljedeće transportne kanale:

Silazna veza:

- Zbirni kanal (eng. BCH - *Broadcast Channel*) je kanal koji ima fiksni transportni format, a ograničeni kapacitet. Primjenjuje se za prijenos dijelova informacija BCCH sustava, točnije tzv. *Master Information Block* (MIB)
- Dijeljeni kanal silazne veze (eng. DL-SCH - *Downlink Shared Channel*) je glavni transportni kanal koji se koristi za prijenos korisničkih i kontrolnih podataka za silaznu vezu u 4G. To je kanal s mogućnošću korištenja HARQ-a i prilagodbe veze mijenjanjem modulacije, kodiranja i snage prijensa. Kanal je moguće emitirati u cijeloj ćeliji i može



se primijeniti oblikovanje snopa. UE ušteda energije (DRX) je podržana za smanjenje potrošnje energije UE. Podržan je i MBMS prijenos.

- Pozivni kanal (eng. PCH - *Paging Channel*) je kanal koji se koristi za prijenos informacija iz PCCH logičkog kanala. PCH podržava diskontinuirani prijem (eng. DRX - *Discontinuous Reception*) kako bi terminalu omogućio štednju energije baterije. Terminal se budi samo u unaprijed određenim vremenskim trenucima kako bi primio PCH informacije. Ovo omogućuje efikasno upravljanje energijom i produljuje vijek trajanja baterije.
- Kanal za grupno odašiljanje (eng. MCH - *Multicast channel*) je kanal koji se koristi za prijenos MBMS korisničkih podataka ili kontrolnih poruka koje zahtijevaju MBSFN kombiniranje.

Uzlazna veza:

- Dijeljeni kanal uzlazne veze (eng. UL-SCH - *Uplink Shared Channel*) je uzlazni pandan DL-SCH-u – to jest, uzlazni prijenosni kanal koji se koristi za prijenos uzlaznih podataka. Kanal s mogućnošću korištenja HARQ-a i prilagodbe veze mijenjanjem snage prijenosa, modulacije i kodiranja. Može se primijeniti oblikovanje snopa.
- Kanal slučajnog pristupa (eng. RACH – *Random Access Channel*) je kanal koji se koristi za ostvarivanje vremenske sinkronizacije (asinkroni slučajni pristup) i za prijenos informacija potrebnih za dobivanje odobrenja za pristup (sinkroni slučajni pristup). Kod prijenosa se često događa istovremeni pokušaj pristupa kanalu više terminala što izaziva sukob. Za UE-ove koji imaju RRC (eng. *Radio Resource Control*) vezu postoji ograničena podrška za pristup bez sukoba.

Korisnički podaci koji se prenose s MAC sloja isporučuju se fizičkom sloju u obliku transportnih blokova. Fizički sloj odgovoran je za kodiranje, hibridnu ARQ obradu fizičkog sloja, modulaciju, obradu s više antena i mapiranje signala u odgovarajuće fizičke vremensko-frekvencijske resurse. Fizički sloj ima ulogu definiranja fizičkih kanala i fizičkih signala. Fizički kanal je skup fizičkih resursa koji se koriste za prijenos podataka i/ili kontrolnih informacija s MAC sloja. S druge strane, fizički signal je također skup fizičkih resursa, ali se koristi za podršku funkcionalnosti fizičkog sloja i ne prenosi nikakve informacije s MAC sloja. Prijenos podataka u silaznoj i uzlaznoj vezi koristi DL-SCH (eng. *Downlink Shared Channel*) i UL-SCH (eng. *Uplink Shared Channel*) kao tipove transportnih kanala. U svakom vremenskom okviru (TTI), na DL-SCH ili UL-SCH može biti najviše jedan ili dva transportna bloka. Kod agregacije nositelja, postoji jedan DL-SCH (ili

UL-SCH) po svakom komponentnom nositelju. Fizički kanal se sastoji od određenog skupa vremenskih i frekvencijskih resursa koji se koriste za prijenos odgovarajućeg transportnog kanala, kako je prikazano na slici 2.5.

Uz fizičke kanale koji se preslikavaju na transportne kanale, postoje i fizički kanali koji nemaju pripadajući transportni kanal. Ti kanali, poznati kao L1/L2 kontrolni kanali, koriste se za upravljačke informacije u silaznoj vezi (DCI) kako bi pružili terminalu potrebne informacije za ispravan prijem i dekodiranje dolaznih podataka, kao i kontrolne informacije u uzlaznoj vezi (UCI) koje se koriste za pružanje planera i stanja hibrid ARQ protokola na terminalu. [2]

Silazni fizički kanali:

- Silazni fizički dijeljeni kanal (eng. PDSCH - *Physical Downlink Shared Channel*) je glavni fizički kanal koji se upotrebljava za jednosmjerni prijenos korisničkih podataka (silazna veza) i informacija o dojavljivanju. Koristi se za prijenos DL-SCH transportnog kanala
- Silazni fizički kontrolni kanal (eng. PDCCH - *Physical Downlink Control Channel*) je fizički kanal koji prenosi kontrolnu signalizaciju u obliku kontrolnih poruka koje se koriste za upravljanje resursima, raspodjelu spektra i upravljanje mobilnošću u silaznom smjeru
- Fizički kanal za odašiljanje (eng. PBCH - *Physical Broadcast Channel*) je kanal koji odgovara BCH transportnom kanalu i prenosi dio sistemskih informacija koje su potrebne terminalu za pristup mreži
- Fizički kanal za grupno odašiljanje (eng. PMCH - *Physical Multicast Channel*) je fizički kanal koji se koristi za prijenos multicast podataka u silaznoj vezi putem MCH transportnog kanala
- Fizički kanal indikatora kontrolnog formata (eng. PCFICH - *Physical Control Format Indicator Channel*) je kanal koji terminalima daje informacije potrebne za dekodiranje skupa PDCCH-ova. Postoji samo jedan PCFICH po nositelju komponente. Označava PDCCH format u silaznoj vezi
- Fizički Hybrid-ARQ indikator kanal (eng. PHICH - *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel*) je kanal koji prenosi hibridni-ARQ potvrdu za označavanje terminalu treba li prijenosni blok ponovno poslati ili ne.

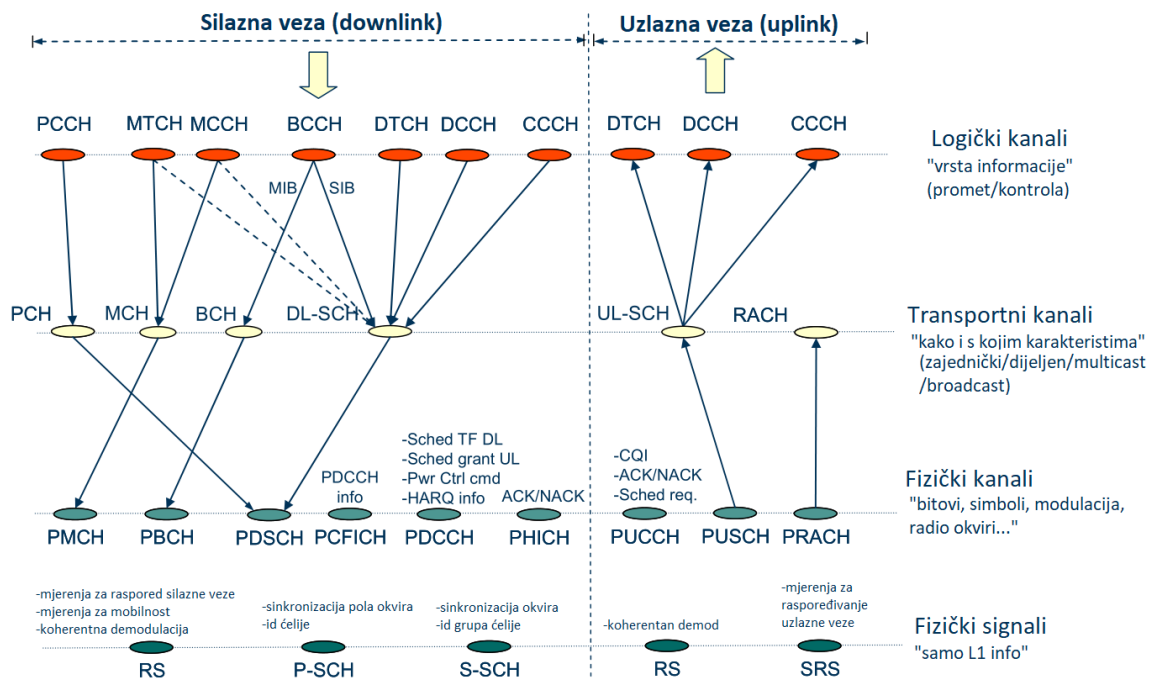
Uzlazni fizički kanali:

- Dijeljeni fizički kanal uzlazne veze (eng. PUSCH - *Physical Uplink Shared Channel*) je fizički kanal koji se koristi za prijenos uzlazne veze podataka od mobilnog uređaja prema baznoj stanici putem UL-SCH transportnog kanala
- Uzlazni fizički kontrolni kanal (eng. PUCCH - *Physical Uplink Control Channel*) je fizički kanal koji se koristi za prijenos kontrolne signalizacije u uzlaznoj vezi
- Fizički kanal slučajnog pristupa (eng. PRACH - *Physical Random Access Channel*) je kanal koji se koristi za inicijalnu komunikaciju mobilnog uređaja s baznom stanicom. Za prijenos koristi preambule za slučajni pristup putem PRACH kanala koje omogućuje mobilnom uređaju da zatraži pristup mreži ili započne komunikaciju s baznom stanicom.

Fizički signali su:

- Referentni signali (eng. RS - *Reference signal*) je signal koji se koristi u 4G mobilnim mrežama (LTE) kao dio fizičkog sloja radi različitih svrha, uključujući mjerenje kanala, sinkronizaciju, kompenzaciju višeputnih putanja i demodulaciju signala. RS se generira u baznoj stanici i šalje se prema mobilnom uređaju (korisniku) kao referenca za procjenu karakteristika kanala i pravilnu demodulaciju signala. Mobilni uređaj koristi primljeni RS za mjerenje jakosti signala, određivanje kvalitete kanala, izračunavanje kanalne matrice i prilagodbu modulacije kako bi se postigla optimalna prijenosna brzina i kvaliteta veze. Podržavaju mjerenja i koherentnu demodulaciju u uzlaznoj i silaznoj vezi.
- Primarni i sekundarni signali sinkronizacije (eng. P-SCH i S-SCH - *Primary and secondary synchronization signals*) su određeni samo za silaznu vezu i koristi ih UE u postupku pretraživanja ćelije.
- Zvučni referentni signal (eng. SRS - *Sounding Reference Signal*) se koristi u uzlaznoj vezi i podržava UL mjerenje rasporeda. SRS je signal koji mobilni uređaj šalje prema baznoj stanici kako bi omogućio baznoj stanici da izvrši mjerenja kvalitete kanala i rasporedi resurse na temelju tih mjerenja. SRS pruža informacije o kanalnoj kvaliteti i doprinosi prilagodbi modulacije, raspodjeli resursa i optimizaciji kvalitete veze.

Slika 2.6. prikazuje sve logičke kanale koji su mapirani na transportne i fizičke kanale.



Slika 2.6. Mapiranje kanala [5]

## 2.4. 4G radijsko sučelje

U ovom je poglavlju opisana digitalna bežična komunikacija, fokusirajući se na principe prijenosa i prijema radijskog signala u 4G sustavima. Objasnjeno je kako se vrši prijenos i prijem informacija, na koji način se uočavaju i rješavaju greške prilikom prijenosa, te koje metode se koriste za rješavanje tih grešaka.

### 2.4.1. Frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosioca (OFDM)

Ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje, poznato pod kraticom OFDM (eng. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) je tehnika prijenosa s više nositelja, preferirana je tehnologija prijenosa u širokopojasnim bežičnim pristupnim mrežama. Temelji se na velikom broju ortogonalnih podnositelja, od kojih svaki radi na različitoj frekvenciji. OFDM je izvorno predložen za borbu protiv međusimbolske interferencije i frekvencijski selektivnog fedinga. Međutim, također ima potencijal za shemu višestrukog pristupa, gdje se podnosioci dijele među konkurentskim korisnicima. OFDM se koristi u standardima poput 3GPP LTE (eng. *Third Generation Partnership Project-Long-Term Evolution*), LAN-u (eng. *Wireless Local Area Network*), WiMAX (eng. *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) i tehnologijama emitiranja DVB (eng. *Digital Video Broadcasting*). [8]

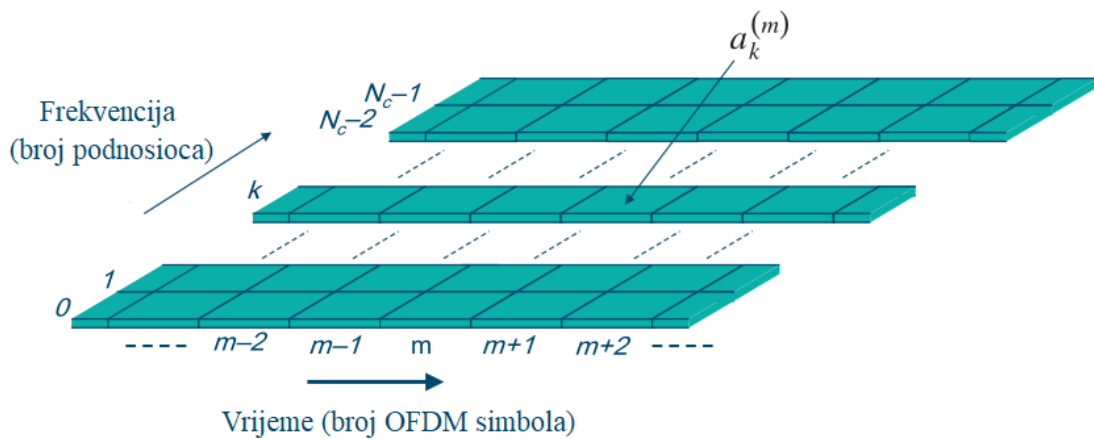
OFDM prijenos se promatra kao prijenos sa više nositelja. Osnovne karakteristike OFDM prijenosa su:

- upotrebljavanje velikog broja relativno uskopojasnih podnositelja koji se moduliraju nekom od MPSK ili MQAM modulacija,
- Usko pakiranje podnositelja u frekvencijskoj domeni s razmakom podnositelja  $\Delta f = 1/T_u$ , gdje  $T_u$  predstavlja vrijeme trajanja jednog simbola. Frekvencijski razmak podnositelja je stoga jednak brzini modulacije (brzini promjene stanja) po podnositelju  $1/T_u$ . [2]

Osnovni OFDM modulator sastoji se od skupa od  $N_c$  kompleksnih modulatora gdje svaki modulator odgovara jednom OFDM podnosiocu, što je temeljna jedinica OFDM signala. U složenoj notaciji osnovnog pojasa, osnovni OFDM signal  $x(t)$  tijekom vremenskog intervala  $mT_u \leq t < (m + 1)T_u$  se može izraziti kao:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} x_k(t) = \sum_{k=0}^{N_c-1} a_k^{(m)} e^{j2\pi k \Delta f t},$$

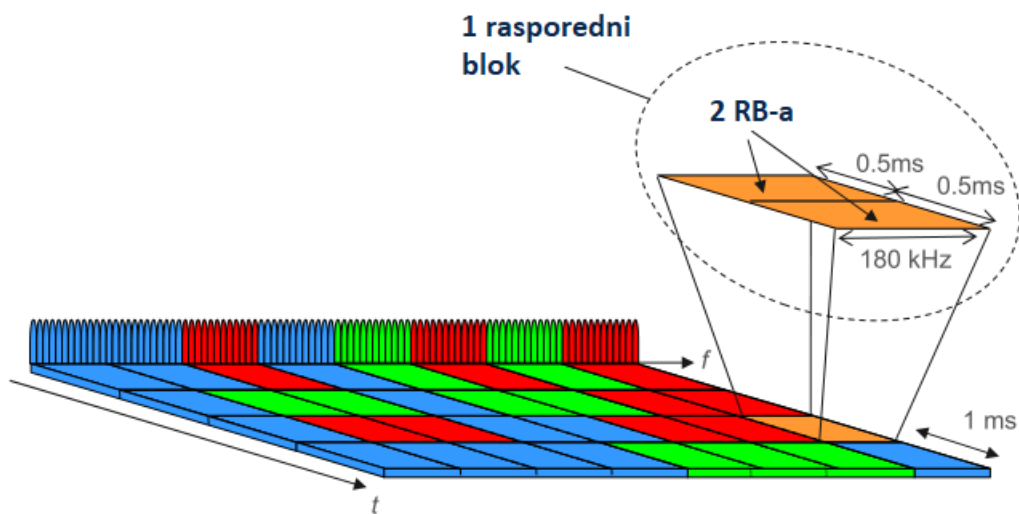
gdje je  $x_k(t)$   $k$ -ti modulacijski podnosilac s frekvencijom  $f_k = k \cdot \Delta f$ , dok je  $a_k^{(m)}$  modulacijski simbol primjenjen na  $k$ -ti podnosilac tijekom  $m$ -tog intervala OFDM simbola odnosno tijekom vremenskog intervala  $mT_u \leq t < (m + 1)T_u$ . Kako se OFDM prijenos temelji na blokovima, to znači da se tijekom svakog intervala OFDM simbola paralelno prenosi  $N_c$  modulacijskih simbola. Ti modulacijski simboli mogu biti iz skupine QPSK, 16QAM, 64QAM ili 256QAM. Kod OFDM-a, broj podnosilaca može varirati od nekoliko stotina do nekoliko tisuća, a isto tako varira i razmak između podnosilaca, koji može biti u rasponu od nekoliko stotina kHz do nekoliko kHz. Prvo što se određuje kod OFDM-a jest razmak između podnosilaca, a taj razmak ovisi o vrsti okruženja u kojem se mreža nalazi, kao i o maksimalnoj očekivanoj vremenskoj disperziji i maksimalnom očekivanom Dopplerovom pomaku. Nakon što je razmak između podnosilaca određen, broj podnosilaca se odabire na temelju pretpostavljene ukupne propusnosti ćelije. [2] Fizički kanal se prikazuje kao vremensko-frekvencijska mreža kao što je ilustrirano na slici 2.7. Svaki stupac (promatrajući os vrijeme) odgovara jednom OFDM simbolu, dok svaki red odgovara jednom OFDM podnosiocu.



Slika 2.7. Vremensko-frekvencijska mreža OFDM-a [2]

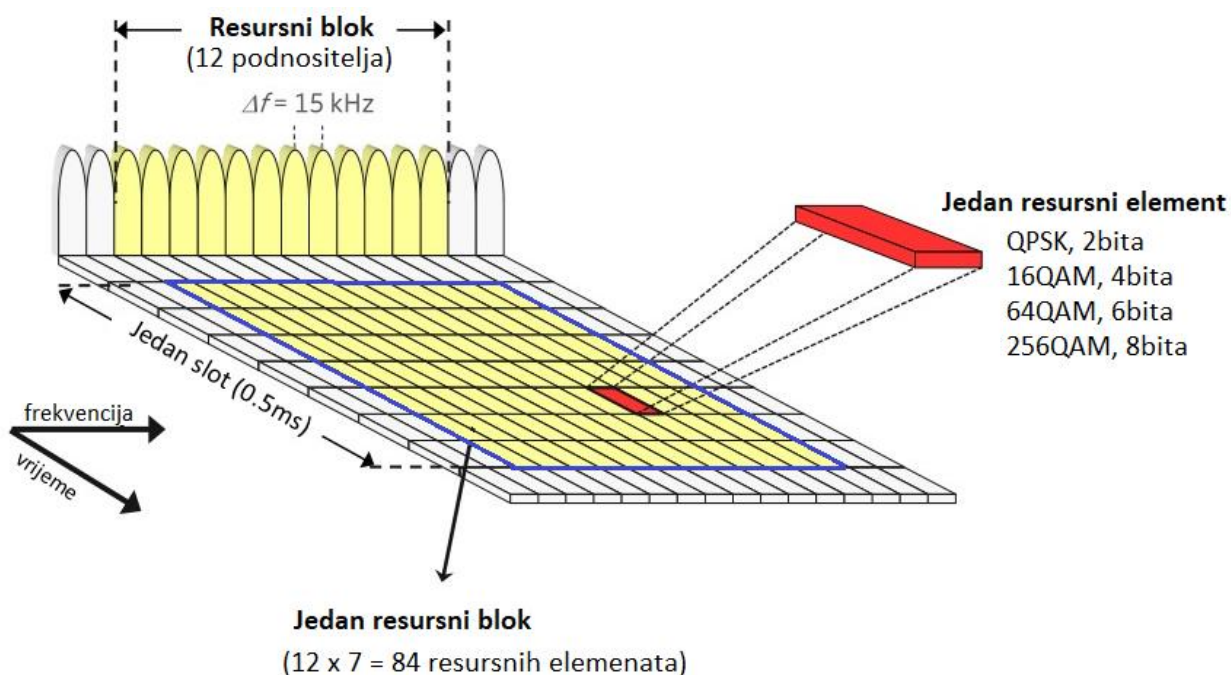
Slika 2.7. prikazuje blok dijagram za OFDM modulaciju koja kreće od predajnika. Predajnik prima bitove od viših slojeva stoga, zatim ti bitovi prolaze kroz modulaciju i time se bitovi pretvaraju u simbole koristeći određenu modulacijsku shemu. Potom simboli dolaze do serijsko-paralelnog pretvarača koji uzima blok simbola i miješa svaki simbol s jednim od signala podnosioca tako što utječe na njegovu amplitudu i fazu. 4G upotrebljava fiksni razmak između podnosioca koji iznosi 15 kHz.

Resursni blok (RB) predstavlja blok od 12 OFDM podnosioca koji definiraju rasporedni blok (eng *scheduling block*) koji je prikazan na slici 2.8. Isto tako jedan RB se sastoji od sedam OFDM simbola. Trajanje jednog simbola je  $66\mu$ , pa je ukupno trajanje 7 OFDM simbola tj. trajanje jednog RB je 0.5ms. Kako trajanje jednog rasporednog bloka (tj. 2 RB-a) iznosi 1ms ono je jednako TTI (vremenskom intervalu prijenosa) od 1 ms.



Slika 2.8. Prikaz rasporednog bloka

Svaki podnosilac je širine 15kHz, pa je ukupna frekvencijska širina jednog RB 180kHz. Budući da u jednom RB ima 12 podnosioca i 7 OFDM simbola, to znači da jedan RB sadrži 84 resursnih elemenata RE (eng. *Resource Element*). Slika 2.9. prikazuje jedan resursni blok i resursni element te njegove mogućnosti. Jedan resursni element se koristi za prijenos određenog broja bitova podataka (ovisi o modulaciji).



Slika 2.9. Jedan resursni blok i resursni element

Prema 3GPP specifikacija, LTE širina kanala (odnosno broj podnosioca) može biti vrijednost 1.4, 3, 5, 10, 15 i 20 MHz. Što je veća širina kanala, to je veća propusnost. Spektar širine kanala je podijeljen u blokove resurse (RB), pa tako je sa brojem podnosioca određen i broj resursnih blokova.

Tablica 2.1. Tablica alokacije resursnih blokova za različite širine pojasa u 4G mreži

Broj podnosilaca	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Broj resursnih blokova ( $N_{RB}$ )	6	15	25	50	75	100

U 4G sustavu za resursni element se može iskoristiti jedna od sljedeće četiri modulacije:

- QPSK (eng. *Quadrature Phase Shift Keying*) (2bita) – koristi 4 različita fazna stanja kako bi predstavio 2 bita informacije. Svako fazno stanje predstavlja 2 bita podataka što daje prijenos 2 bita po jednom RE-u
- 16QAM (eng. *16-Quadrature Amplitude Modulation*) (4 bita) - koristi 16 kombinacija faza i amplituda za predstavljanje 4 bita informacija. Svaka kombinacija predstavlja 4 bita podataka, što daje prijenos 4 bita po jednom RE-u.
- 64QAM (eng. *64-Quadrature Amplitude Modulation*) (6 bita) - koristi 64 kombinacije faza i amplituda za predstavljanje 6 bita informacija. Svaka kombinacija predstavlja 6 bita podataka, što daje prijenos 6 bita po jednom RE-u.
- 256QAM (eng. *256-Quadrature Amplitude Modulation*) (8 bita) - koristi 256 kombinacija faza i amplituda za predstavljanje 8 bita informacija. Svaka kombinacija predstavlja 8 bita podataka, što omogućuje prijenos 8 bita po jednom RE-u.

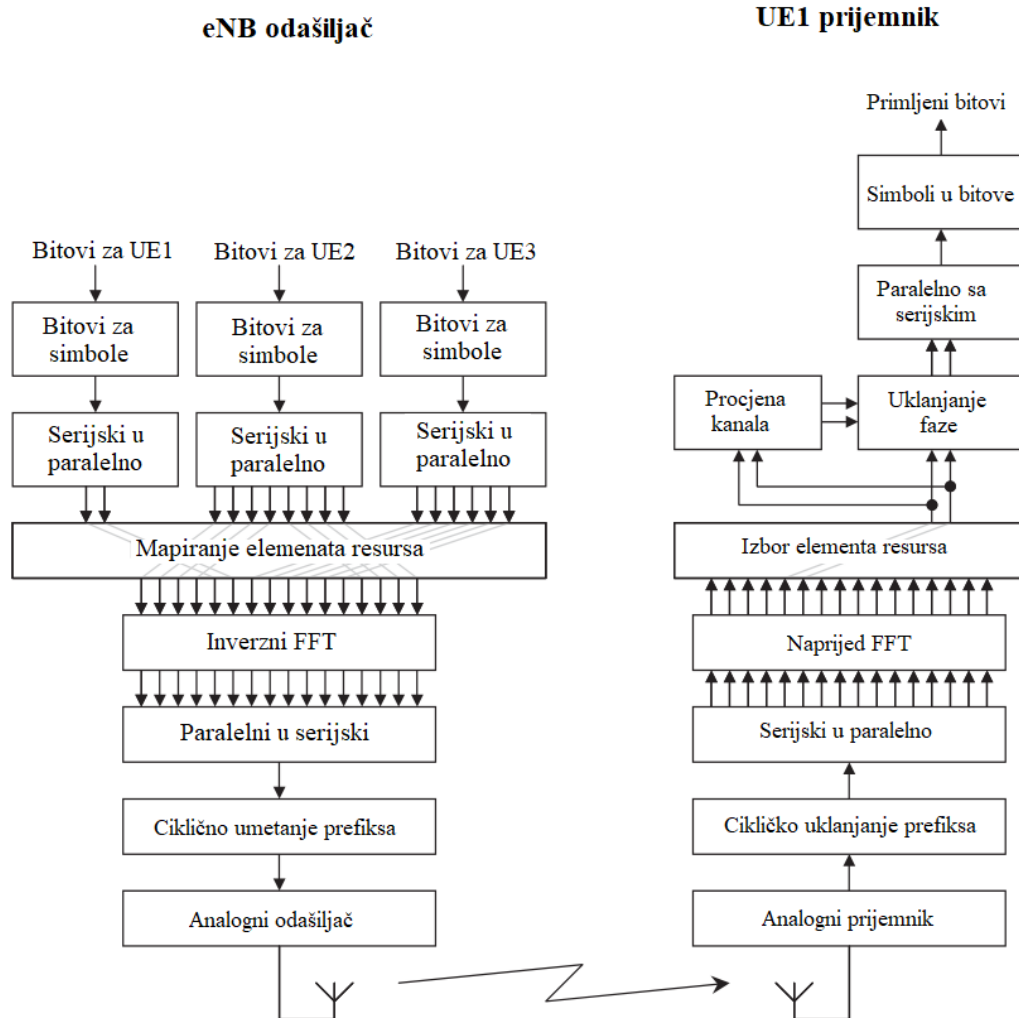
U silaznoj vezi, prijenosi prema različitim terminalima unutar ćelije obično su međusobno ortogonalni, što znači da, barem u teoriji, nema interferencije između prijenosa (nema interferencije unutar ćelije). Postizanje ortogonalnosti unutar ćelije prema dolaznoj vezi može se ostvariti primjenom vremenske (eng. TDM - *Time-Division Multiplexing*), frekvencijske (eng. FDM - *Frequency-Domain Multiplexing*) i kodne domene (eng. CDM - *Code-Domain Multiplexing*). Što se tiče paketnih podataka gdje je prijenos odnosno promet često ubrzan pokazalo se teoretski da je TDM bolji i zbog toga je on glavna komponenta u silaznoj vezi. TDM komponenta se redovito sjedinjuje s dijeljenjem radio resursa bilo u FDM ili CDM. Za 4G mrežu u silaznoj vezi za multipleksiranje se koristi kombinacija TDM-a i FDM-a.

#### **2.4.2. Višestruki pristup s ortogonalnom raspodjelom podnosioca (OFDMA)**

Višestruki pristup s ortogonalnom raspodjelom podnosioca (eng. OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) je proširenje OFDM-a za implementaciju višekorisničkog komunikacijskog sustava. OFDMA je metoda višestrukog pristupa koja razdvaja korisnike i kanale u frekvenciji i vremenu. Različiti korisnici i/ili različiti kanali su ortogonalni unutar jedne ćelije. To znači da oni ne smetaju jedni drugima u istoj ćeliji. Ovo vrijedi i za uzlaznu i za silaznu vezu u LTE-u. Slika 2.10. prikazuje blok dijagram OFDMA. Mogu se primijetiti razlike između blok dijagrama OFDM i OFDMA. Kod OFDMA su dodana tri procesa. Odašiljač ima dodatni proces



cikličko umetanje prefiksa, a prijemnik sadrži dodatne procese procjena kanala i uklanjanje faze (ekvalizacija). [7]

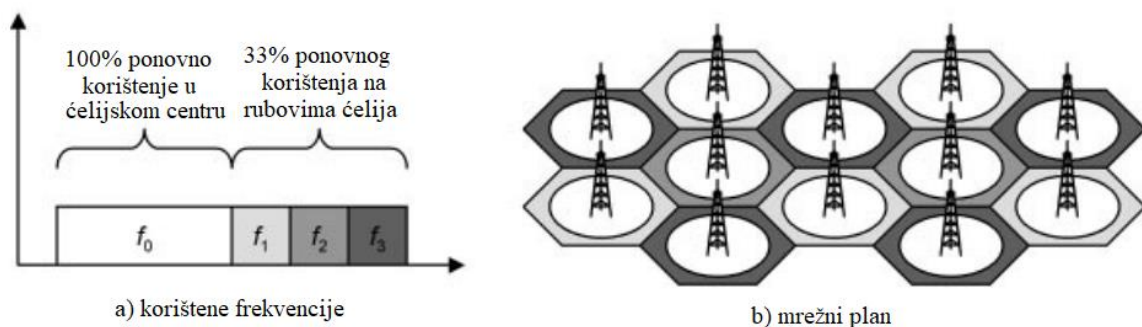


Slika 2.10. Blok dijagram OFDMA odašiljača i prijemnika [7]

### 2.4.3. Ponovno korištenje frekvencije

U mobilnom komunikacijskom sustavu jedna bazna stanica može odašiljati informacije na nekoliko mobilnih uređaja u isto vrijeme dodjeljivanjem različitih grupa podnosioca. No mobilni uređaj mora primiti signal od jedne bazne stanice u prisustvu smetnji od ostalih. Kako bi bio točan izbor podnosioca bazne stanice utječe postojanje fedinga koji je ovisan o frekvenciji. Kod OFDMA, frekvencijski pojas je podijeljen na podnosiocce, omogućavajući mobilnom uređaju mjerenje snage primljenog signala na svakom od njih putem referentnih signala. Mobilni uređaj grupira ta mjerenja iz obližnjih podnosioca i šalje rezultate baznoj stanici koristeći povratni signal, odnosno indikator kvalitete kanala (CQI). Bazna stanica koristi indikator kvalitete kanala na dva

načina. Prvo, bazna stanica može slati signale prema mobilnom uređaju koristeći podnosiocce na kojima je snaga primljenog signala najjača. Ostali mobilni uređaji mogu koristiti neželjene podnosiocce jer imaju različite obrasce fedinga. Dodjela podnosilaca se može redovito mijenjati, jednom svake milisekunde u LTE-u. Drugo, bazna stanica može koristiti rezultate kako bi odredila najbržu shemu modulacije i brzinu kodiranja koja je primjerena za određenu vezu. Pri tome je potrebno smanjiti interferenciju za što uspješnije primanje informacije na mobilnom uređaju. Svaka bazna stanica može emitirati u istom frekvencijskom pojasu i mogu se dodijeliti podnosioci unutar pojasa na fleksibilan način koristeći ponovnu upotrebu frekvencije. Slika 2.11. prikazuje primjer implementacije ponovne frekvencije prilikom korištenja OFDM-a. Može se vidjeti da svaka bazna stanica kontrolira jednu ćeliju, a sve stanica dijele isti frekvencijski pojas. Unutar tog pojasa, svaka ćelija odašilje prema obližnjim mobilnim uređajima koristeći isti skup podnosilaca, označenih sa  $f_0$ , dok za uređaje koji su na rubu ćelije koristi dio podnosilaca s frekvencijama različitim od onih koje se koriste na rubnim dijelovima susjednih ćelija. [7]



**Slika 2.11.** Primjer implementacije upotrebe ponovne frekvencije pri korištenju OFDMA a) upotreba frekvencije b) rezultirajući mrežni plan [7]

Kad su mobilni uređaji blizu svojih baznih stanica, primljeni signali su dovoljno jaki da nadjačaju sve smetnje koje utječu na prijenos i kvalitetu signala. S druge strane, što je mobilni uređaj dalji od bazne stanice, to su signali slabiji, a povećava se mogućnost izobličenja signala zbog smetnji. Kako bi se izbjegle takve situacije, nužno je da susjedne ćelije imaju mogućnost odašiljati prema tim mobilnim uređajima koristeći različite skupove podnosioaca. Polovina frekvencijskog pojasa je rezervirana za obližnje mobilne uređaje, dok je preostali dio podijeljen u tri skupa za korištenje udaljenih mobilnih uređaja. Ta tri skupa su označeni sa  $f_1, f_2, f_3$ , što rezultira faktorom ponovne upotrebe od 67%.

#### 2.4.4. Višestruki pristup s frekvencijskom podjelom s jednim nosiocem (SC-FDMA)

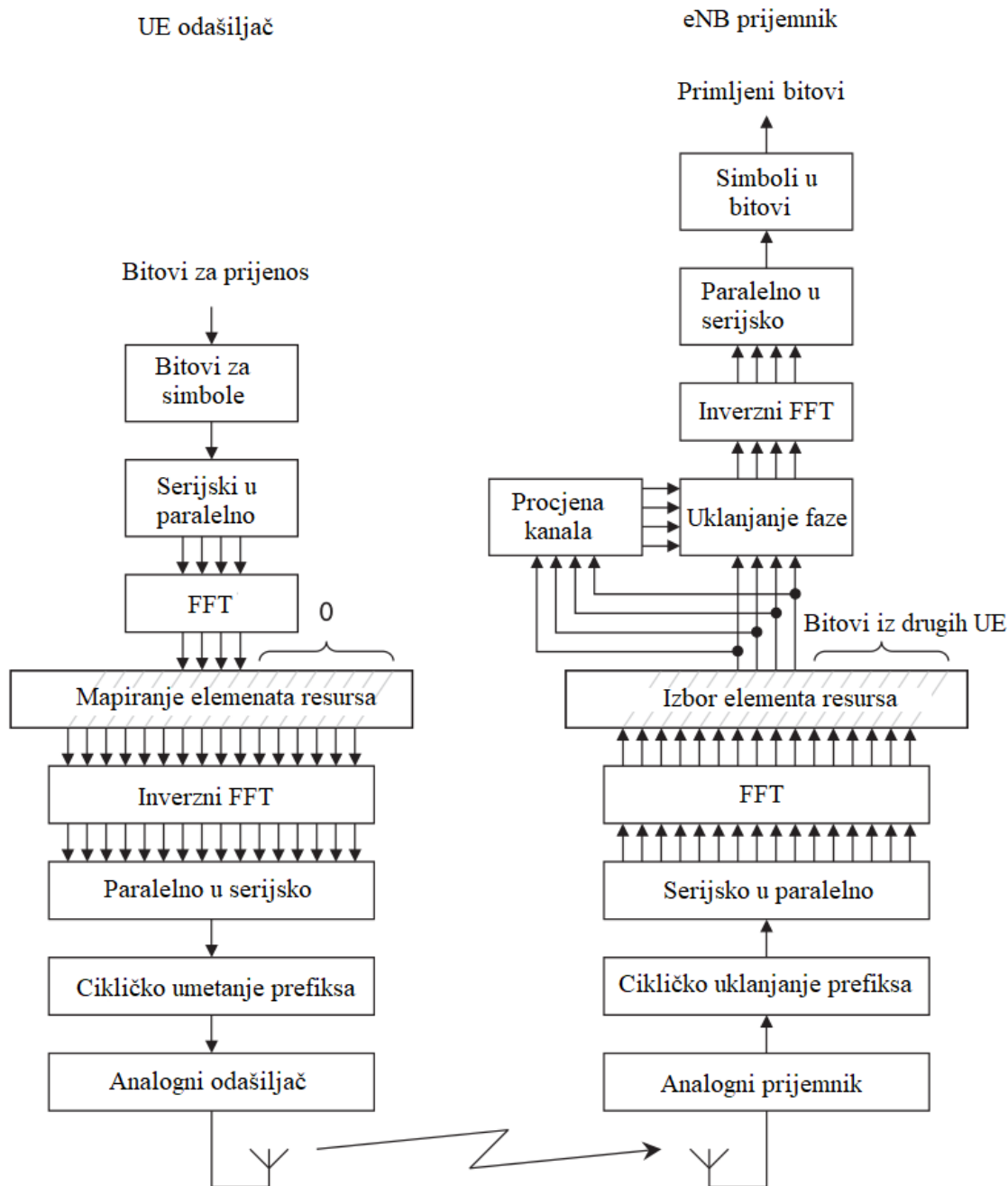
Višestruki pristup s frekvencijskom podjelom s jednim nosiocem (eng. SC-FDMA - *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) je tehnika modulacije koja se koristi u 4G i 5G mobilnim mrežama za uzlaznu vezu. Glavna karakteristika SC-FDMA je korištenje jednog nosioca (eng. *single carrier*) za prijenos podataka, za razliku od OFDM-a koji koristi veći broj nosilaca (tj. podnosilaca). Ovo čini SC-FDMA energetski učinkovitijim i pogodnijim za mobilne uređaje s ograničenom snagom baterije. Zahvaljujući ovom pristupu, SC-FDMA omogućuje bolju iskorištenost raspoloživog spektralnog prostora i smanjuje potrošnju energije, što je ključno za produljenje vijeka trajanja baterije mobilnih uređaja.

Još jedna važna prednost SC-FDMA je njegova otpornost na intersimbolsku interferenciju (eng. ISI - *Inter Symbol Interference*) koja se javlja u visoko raspršenim i preopterećenim mrežnim okruženjima. Ovaj faktor čini SC-FDMA idealnim izborom za mobilne komunikacijske sustave, gdje su promjenjivi uvjeti komunikacije česti, kao što su pokretljivost korisnika i različite gustoće mreže.

OFDMA vrlo dobro radi na 4G silaznoj vezi, no postoji jedan nedostatak, a to je da je snaga odaslanih signala podložna poprilično velikim varijacijama. Ove varijacije mogu prouzročiti probleme za pojačalo snage odašiljača. U slučaju da je pojačalo linearno, tada je izlazna snaga proporcionalna ulazu, slijedom čega je izlazni valni oblik točno onakav kakav je bio zahtjevan. U slučaju da je pojačalo nelinearno, izlazna snaga neće biti proporcionalna ulazu, te se dobije izobličen izlazni valni oblik. Ako dođe do bilo kakvog izobličenja u valnom obliku u vremenskoj domeni, to će se odraziti na spektar snage u frekvencijskoj domeni, koji će također biti izobličen. Tada će se signal „preliti“ u susjedne frekvencijske pojaseve i uzrokovati smetnje drugim prijateljima. Za silaznu vezu koriste se odašiljači sa skupim linearnim pojačalima snage pa se, zahvaljujući tome, OFDMA tehnologija može učinkovito primjenjivati za prijenos podataka s baznih stanica prema mobilnim uređajima, pružajući visoke brzine i kvalitetan signal. No, situacija je drugačija za uzlaznu vezu. Mobilni odašiljački uređaji moraju biti jeftiniji i kompaktniji, što znači da nemaju opciju korištenja skupih linearnih pojačala snage. Ovo ograničenje čini OFDMA vrlo neprikladnim za LTE uzlaznu vezu zbog čega se za nju koristi SC-FDMA. [7]

Višestruki pristup s frekvencijskom podjelom jednog nositelja (SC-FDMA) je ilustriran na slici 2.12. U SC-FDMA blok dijagramu postoje tri razlike u odnosu na OFDMA. Osnovna razlika je što SC-FDMA odašiljač primjenjuje dodatni FFT između koraka serijske u paralelnu pretvorbu i mapiranja elemenata resursa. Ovo miješa simbole na način koji minimizira varijacije snage, kako

bi se osigurala stabilnost i pouzdanost prijenosa podataka. Pritom se koristi inverzna brza Fourierova transformacija (IFFT) u prijemu kako bi se rekonstruirali originalni simboli iz primljenog signala. Druga i veoma bitna razlika je da se ova tehnika odnosno SC-FDMA koristi samo na uzlaznoj vezi zbog čega mobilni odašiljač koristi samo neke od podnosioca – neki su postavljeni na nulu dok su drugi dostupni za druge mobilne uređaje u ćeliji. Svi mobilni uređaji odašilju koristeći samo jedan kontinuirani blok podnosioca bez ikakvih unutarnjih praznina. Ovo specifično svojstvo OFDMA sustava se naziva SC-FDMA koje je ujedno i neophodno kako bi se varijacije snage zadržale na najnižoj mogućoj razini. Za potrebe razumijevanja SC-FDMA je potrebno promatrati samo tri koraka prijenosa: FFT, mapiranje elementa resursa i inverzni FFT. Ulaz u FFT je niz simbola u vremenskoj domeni, dok FFT pretvara te simbole u frekvencijsku domenu. Mapiranje elemenata resursa pomiče simbole na željenu središnju frekvenciju, a inverzni FFT simbole ponovno vraća u vremensku domenu. Kroz ove korake bi odašiljeni signal trebao biti kao izvorni modulirani valni oblik, osim pomaka na drugu središnju frekvenciju. Kako je snaga QPSK-a signala konstantna, a u ostalim vrstama modulacije koje koristi 4G snaga signala vrlo malo varira, to znači da je postignut prijenos signala s približno konstantnom snagom. [7]

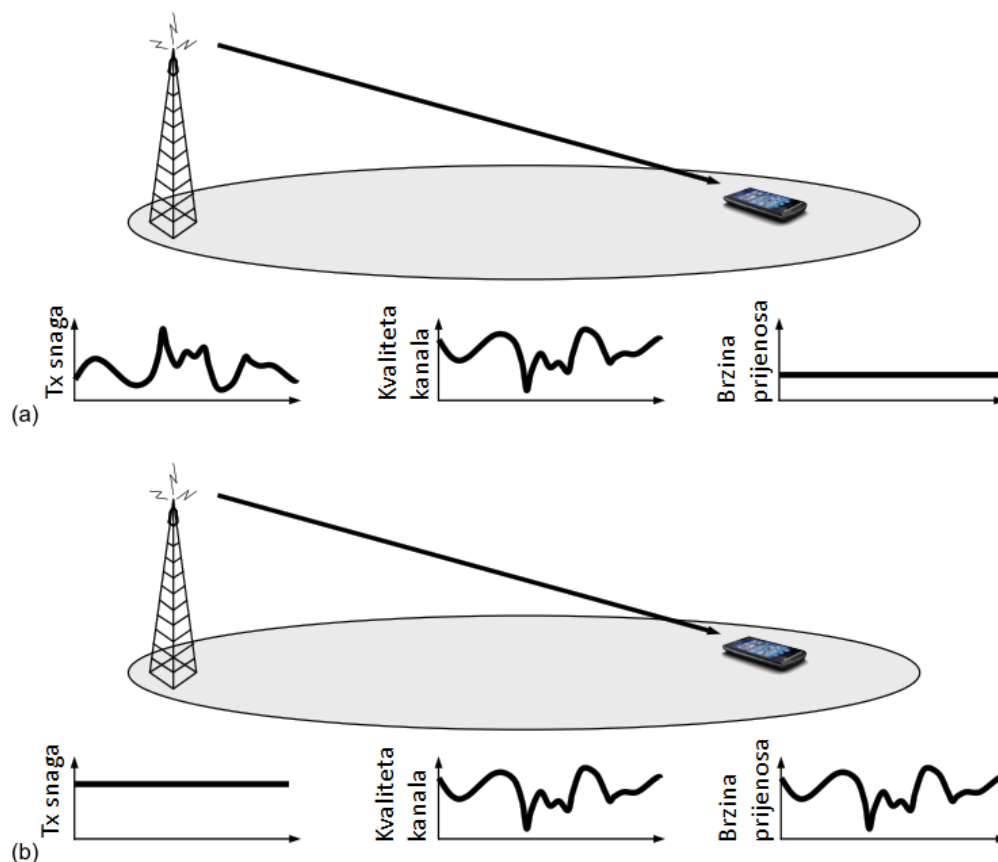


Slika 2.12. Blok dijagram SC-FDMA odašiljača i prijemnika. [7]

## 2.5. Dinamičko prilagodavanje parametara veze

U prošlosti, mobilni komunikacijski sustavi temeljeni na CDMA, poput WCDMA i CDMA2000, koristili su dinamičku kontrolu snage odašiljača radi kompenzacije varijacija u trenutnim uvjetima kanala. Glavni cilj adaptacije je održavanje konstantnog omjera  $E_b/N_0$  (omjera energije po bitu i gustoće spektralne snage šuma) na prijemniku kako bi se postigao uspješan prijenos podataka, bez

povećanja vjerojatnosti pogreške na neprihvatljivu razinu. Dinamička kontrola snage odašiljanja povećava snagu odašiljača kada se radioveza u lošim radio uvjetima. Stoga je snaga prijensa u biti obrnuto proporcionalna kvaliteti kanala, kao što je prikazano na slici 2.13. a). U kontekstu paketnog podatkovnog prometa nema velike potrebe za osiguravanjem konstantne brzine prijensa podataka preko radio veze. S gledišta korisnika, poželjno je da brzina prijensa podataka preko radijskog sučelja bude što veća. Kada nije nužna stalna brzina prijensa podataka, alternativa kontroli snage odašiljanja je adaptacija veze kroz dinamičku kontrolu brzine. Pomoću kontrole brzine, brzina prijensa podataka se dinamički prilagođava kako bi se kompenzirali različiti uvjeti kanala. Kada su uvjeti kanala povoljni, brzina prijensa podataka se povećava, a kad su nepovoljni (mali odnos  $E_b/N_0$ , višestazni prijens) brzina prijensa pada. Slika 2.13. b) prikazuje kako se kontrola brzine održava na željenoj razini putem podešavanja brzine prijensa podataka ( $R$ ), umjesto podešavanja snage prijensa ( $P$ ). Kontrola brzine se može smatrati učinkovitijom od kontrole snage iz razloga što kontrola brzine osigurava da pojačalo snage uvijek odašilje s punom snagom. S druge strane, kod kontrole snage, pojačalo snage često nije potpuno iskorišteno jer je snaga prijensa manja od maksimalne vrijednosti. [2]

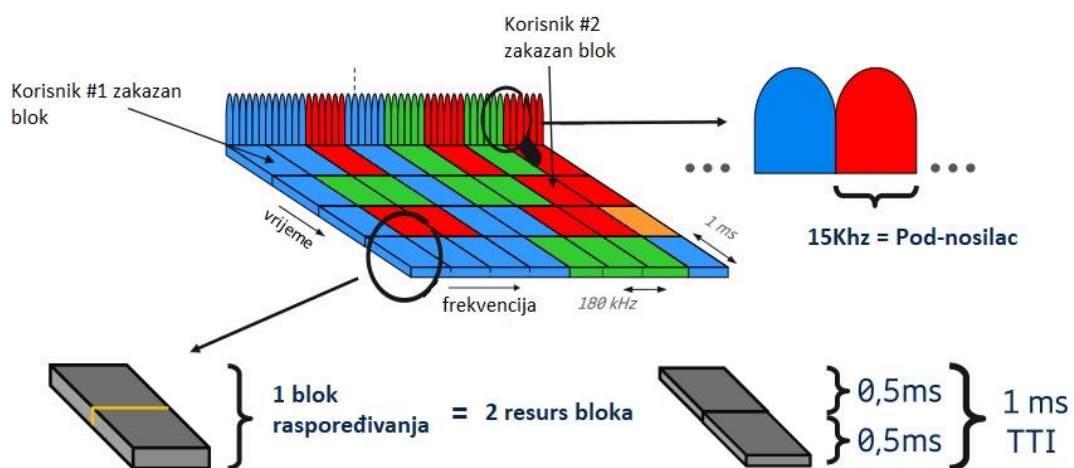


Slika 2.13. a) Prikaz kontrole snage b) Prikaz kontrole brzine [2]

## 2.6. Raspoređivanje resursa

Raspoređivanje resursa (eng. *Scheduling*) je postupak koji se koristi u bežičnim komunikacijskim sustavima kako bi se efikasno i dinamički dodijelili radiofrekvencijski i vremenski resursi korisnicima te na taj način omogućiti prijenos podataka, glasa i drugih komunikacijskih usluga. Raspoređivanje resursa se provodi dinamički, jer uvjeti u bežičnoj mreži mogu varirati ovisno o prometu, lokaciji korisnika, zagušenju mreže i drugim čimbenicima. Ovaj postupak ima za cilj optimizirati iskorištavanje dostupnog radiofrekvencijskog spektra, povećati kapacitet mreže, minimizirati interferencije te pružiti kvalitetnu uslugu korisnicima. Raspoređivanje resursa i načela koja se primjenjuju za dijeljenje tih resursa među korisnicima ovise o karakteristikama radijskog sučelja. Neki od ključnih čimbenika koji utječu na ovu raznolikost uključuju: usmjerava li se raspoređivanje na uzlaznu ili silaznu vezu te jesu li prijenosi različitih korisnika međusobno ortogonalni ili se preklapaju. U ovom će se poglavlju prikazat postupak raspoređivanja resursa u silaznoj vezi. Raspoređivanje resursa u uzlaznoj vezi je vrlo slično, s određenim razlikama između veza. [2]

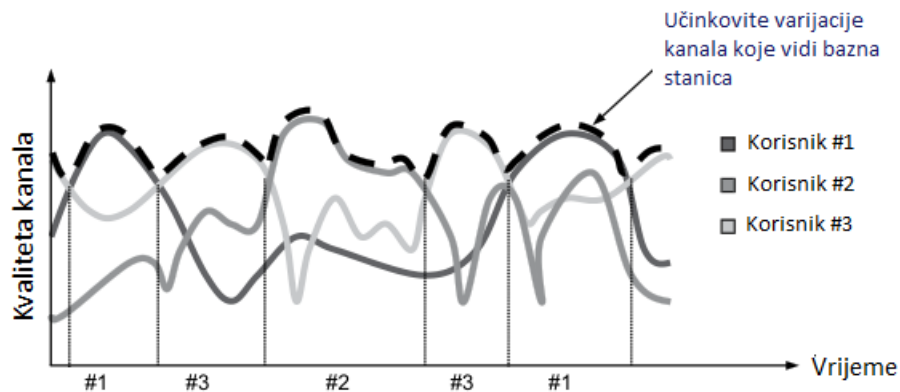
Raspoređivanje se odvija na temelju jednog pod-okvira koji traje 1ms što prikazuje slika 2.14. Pod-okvir se sastoji od dva resursna bloka RB (eng. *Resource block*) gdje pojedini resurs traje 0.5ms odnosno 2 resursna bloka traju 1ms. To ukupno trajanje pod-okvira je vrijeme za koje će 4G odlučiti koje će RB-ove dodijeliti korisniku svake 1 ms.



Slika 2.14. Struktura bloka raspoređivanja

Postoje različiti načini na koje se mogu dodjeljivati resursi. Dijeljenje resursa ili raspoređivanje ovisno o kanalu je kada se za vrijeme raspoređivanja resursa uzimaju u obzir samo trenutni uvjeti

radijske veze. Raspoređivanje maksimalne brzine ili max-C/I raspoređivanje je dodjeljivanje maksimalne brzine korisniku s trenutno najboljim uvjetima radio veze. Kako za različite radio veze unutar ćelije radijski uvjeti obično variraju neovisno, u svakom trenu skoro uvijek postoji bar jedna radio veza kojoj je kvaliteta kanala gotovo najveća. Kanal s najvećom kvalitetom će se koristiti za prijenos i dodajući kontrolu brzine, koja će također biti najveća moguća, stvara se sustav visokog kapaciteta (slika 2.15.).[2]



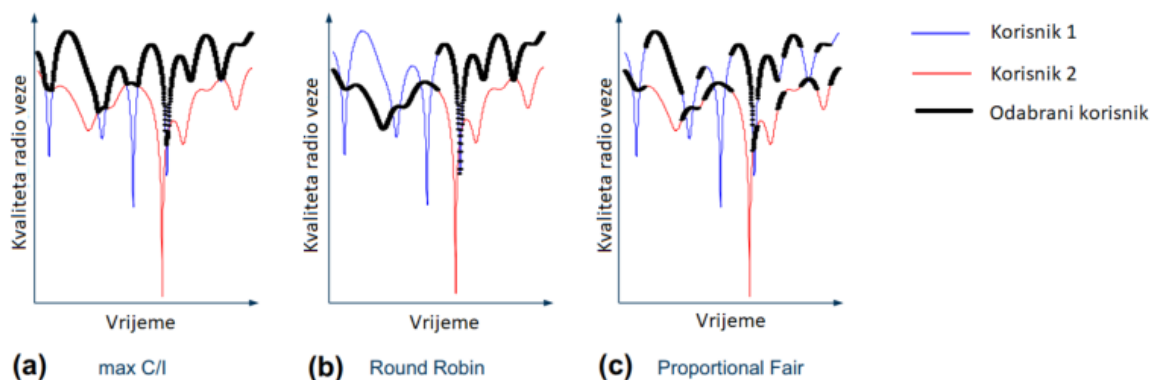
Slika 2.15. Raspoređivanje ovisno o kanalu [6]

Dobitak koji je dobiven odašiljanjem korisnicima s povoljnim uvjetima radijske veze je poznat kao višekorisnička raznolikost. Što je višekorisnička raznolikost veća, veća je i varijacija kanala i količina korisnika u ćeliji. Matematički, max-C/I raspoređivanje se može izraziti kao raspoređivanje korisnika  $k$  koji je dan sa:

$$k = \arg \max_i R_i$$

gdje je  $R_i$  trenutna brzina prijenosa podataka za  $i$ -tog korisnika. U slučaju da u prosjeku svi terminali doživljavaju slične uvjete kanala i velike varijacije u trenutnim uvjetima kanala zbog posljedica brzih višestrukih fadinga, svi će korisnici imati istu prosječnu brzinu prijenosa podataka. U slučaju da su uvjeti kanala s kojima se susreće pojedini terminal lošiji u usporedbi s uvjetima na kanalima drugih terminala, taj terminal može duže vremena imati slabiju kvalitetu kanala u odnosu na druge. To će rezultirati raspoređivanjem koje će biti nepravedno prema terminalima s lošim kanalnim uvjetima, a najlošiji terminal možda nikad neće biti raspoređen. Slika 2.16. a) prikazuje primjer max-C/I raspoređivanja koje se događa između dva korisnika s različitom prosječnom kvalitetom kanala. [2] Isti korisnik raspoređen je gotovo cijelo vrijeme i kao rezultat se dobije najveći kapacitet sustava iako ova situacija često nije prihvatljiva sa stajališta kvalitete usluge.





**Slika 2.16.** Prikaz ponašanja tri različita rasporeda za dva korisnika s različitim prosječnom kvalitetom kanala: a)max-C/I, b)round-robin, c)proportional fair [2]

Druga alternativna strategija raspoređivanja je kružno raspoređivanje (eng. *Round Robin*), što je ilustrirano na slici 2.16. b). Kružno raspoređivanje izmjenjuje korisnike u upotrebljavanju zajedničkih resursa, bez obzira na trenutačne uvjete kanala. Kružno raspoređivanje se može smatrati pravednim raspoređivanjem jer svaka komunikacijska veza dobiva jednaku količinu resursa kao i količinu vremena, ali se kapacitet mreže često ne koristi dovoljno dobro. Treći primjer raspoređivanja je proporcionalno pravedno raspoređivanje (eng. *proportional fair*), prikazano na slici 2.16. c), koje pokušava iskoristiti brze varijacije u uvjetima kanala što je više moguće, dok još uvijek zadovoljava određeni stupanj pravednosti među korisnicima. Drugim riječima, zajednički resursi se dodjeljuju korisniku s relativno najboljim uvjetima radijske veze odnosno u svakom trenutku, korisnik  $k$  je odabran za prijenos prema:

$$k = \arg \max_i \frac{R_i}{\bar{R}_i}$$

gdje je  $R_i$  je trenutna brzina prijenosa podataka za korisnika  $i$  dok je  $\bar{R}_i$  prosječna brzina prijenosa podataka za korisnika  $i$ . Prosjek se izračunava za određeno razdoblje prosjeka vremena  $T_{PF}$ . Kako bi se osigurala učinkovita upotreba kratkoročnih varijacija kanala i istovremeno ograničili dugoročne razlike u kvaliteti usluge na prihvatljivu razinu, vremenska konstanta  $T_{PF}$  se uobičajeno postavlja na razinu od približno jedne sekunde. [2]

## 2.7. Uvjeti propagacije signala i tehnike upravljanja pogreškama

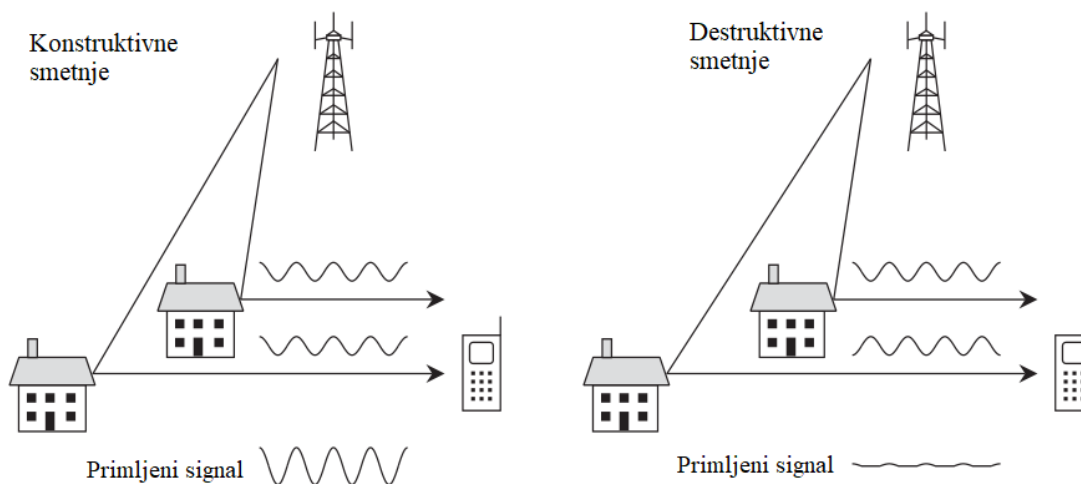
Signal koji se širi od odašiljača do prijammnika postupno gubi svoju snagu, što se manifestira kroz gubitke propagacije ili gubitke puta. Ovaj fenomen rezultira smanjenjem prijemne snage  $P_R$  u

usporedbi s odašiljačkom snagom  $P_T$ . Gubitak propagacije, označen kao PL, može se izračunati prema sljedećoj formuli:

$$PL = \frac{P_T}{P_R}$$

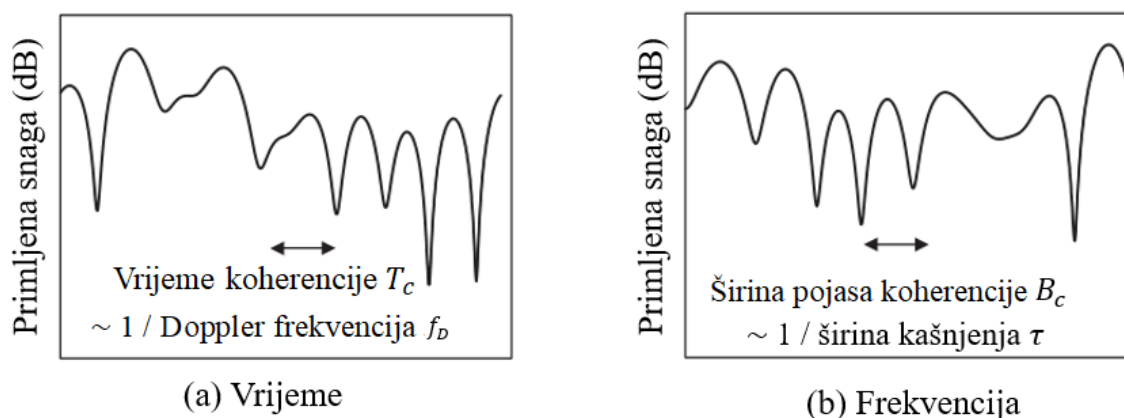
Kada signal putuje kroz prazan prostor, njegova energija se širi na sfernu površinu dimenzija  $4\pi r^2$  na udaljenosti  $r$  od odašiljača. Gubitak širenja tj. gubitak propagacije postaje proporcionalan  $r^2$ . Međutim, u mobilnim mrežama, signal može biti dodatno apsorbiran ili reflektiran od strane prepreka kao što su na primjer zgrade ili tlo, što dodatno utječe na gubitak širenja. Na temelju eksperimentalnih podataka, otkriveno je da je gubitak propagacije u mobilnim mrežama otprilike proporcionalan  $r^m$ , gdje vrijednost  $m$  obično leži između 3,5 i 4. Dodatno, primljeni signal je izobličen zbog šuma i smetnji drugih odašiljača. Ti učinci uzrokuju da prijatelj nije u mogućnosti napraviti potpuno točnu procjenu odašiljane amplitude i faze signala, te dolazi do pogrešne detekcije. Vjerojatnost pogreške ovisi o omjeru snage signala i snaga šuma i smetnji (SINR) na prijatelju, ali i o modulacijskom postupku. Ako je udaljenost signala u prostoru signala veća, a to je kod modulacijskih postupaka s manje stanja (npr. QPSK), vjerojatnost pogreške je manja kod istog SINR-a. U suprotnom, kod primjene modulacijskih shema s većim brojem stanja kao što je 256QAM potreban je veći SINR za istu vjerojatnost pogreške. Za regulaciju brzine prijenosa u ovisnosti o kvaliteti kanala 4G sustav iskorištava dinamičko prebacivanje između različitih modulacijskih shema. Na primjer, ako se koristi 256-QAM, a SINR opadne, što rezultira velikom vjerojatnošću greške, sustav će automatski prebaciti na 64-QAM, 16-QAM ili QPSK modulaciju kako bi smanjio broj grešaka.[7]

Šum i gubitak propagacije nisu jedini problemi s kojima se susreće prijenos signala u bežičnim mobilnim sustavima. Kada u prostoru postoji refleksija signala, koja nastaje kada signal naiđe na prepreku kao što su zgrade, prometni znakovi, tlo, automobili i slično, to znači da zrake mogu putovati različitim putevima od odašiljača do prijatelja. Ova pojava naziva se višestavno prostiranje (eng. *multipath*). Na prijatelj dolazi više zraka koje se mogu na različite načine zbrajati kao što je prikazano na slici 2.17. Postoje dvije vrste smetnji, odnosno interferencije – konstruktivna (eng. *constructive interference*) i destruktivna interferencija (eng. *destructive interference*). Konstruktivna interferencija se događa kada se faze dolaznih zraka (snopova elektromagnetskog vala koji putuju po različitim putanjama) podudaraju te se međusobno pojačavaju, stvarajući kvalitetan signal. Destruktivna interferencija nastaje kada se faze signala razlikuju za približno  $\pi$  radijana, što rezultira poništavanjem zraka. [7]



Slika 2.17. Generiranje konstruktivnih smetnji, destruktivnih smetnji i fedinga u višestaznom okruženju[7]

Kada postoje destruktivne smetnje, dolazi do opadanja snage primljenog signala na vrlo nisku razinu, što rezultira situacijom poznatom kao slabljenje ili feding (eng. *fading*). Kada dođe do pojave fedinga, povećava se vjerojatnost pogrešaka, što čini komunikacijski mobilni sustav nepouzdanim za prijenos signala. Mobilni uređaj je prijenosan, što znači da korisnikovo kretanje s jednog mjesta na drugo konstantno mijenja geometriju putanje zraka. Također, ova promjena stvara različite oblike interferencije, kako konstruktivne, tako i destruktivne. Zato je feding funkcija vremena što je ilustrirano na slici 2.18.



Slika 2.18. Feding kao funkcija (a) vremena i (b) frekvencije [7]

Zbog kretanja terminala mijenjaju se i amplitude i faze primljenog signala tijekom vremena, s relativno malim promjenama unutar tzv. vremena koherencije  $T_c$ . Vrijeme koherencije  $T_c$  može se procijeniti prema formuli:

$$T_c \approx \frac{1}{f_D}$$

gdje je  $f_D$  Dopplerova frekvencija mobilnog uređaja, a ona se može izračunati prema formuli:

$$f_D = \frac{v}{c} f_c$$

gdje je  $f_c$  frekvencija nositelja,  $v$  brzina mobilnog uređaja, te  $c$  brzina svjetlosti ( $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ). Kada se promijeni frekvencija nositelja, mijenja se i valna duljina radio signala, što uzrokuje promjenu uzorka interferencije između konstruktivnog i destruktivnog, što znači da je fading također funkcija frekvencije (prikazano na slici 2.18.). Amplitude i faze frekvencijskih komponenata primljenog signala variraju i u frekvencijskoj domeni, pri čemu je unutar pojasa koherencije  $B_c$  ta promjena još uvijek mala. Pojas koherencije može se procijeniti na sljedeći način:

$$B_c \approx \frac{1}{\tau}$$

gdje je  $\tau$  raspon kašnjenja višestaznih komponenti signala u radijskom kanalu, što je razlika između dolaska zrake koja prelazi najkraći put i one koja prelazi najduži put. Raspon kašnjenja radijskog kanala se može izračunati na sljedeći način:

$$\tau = \frac{\Delta L}{c}$$

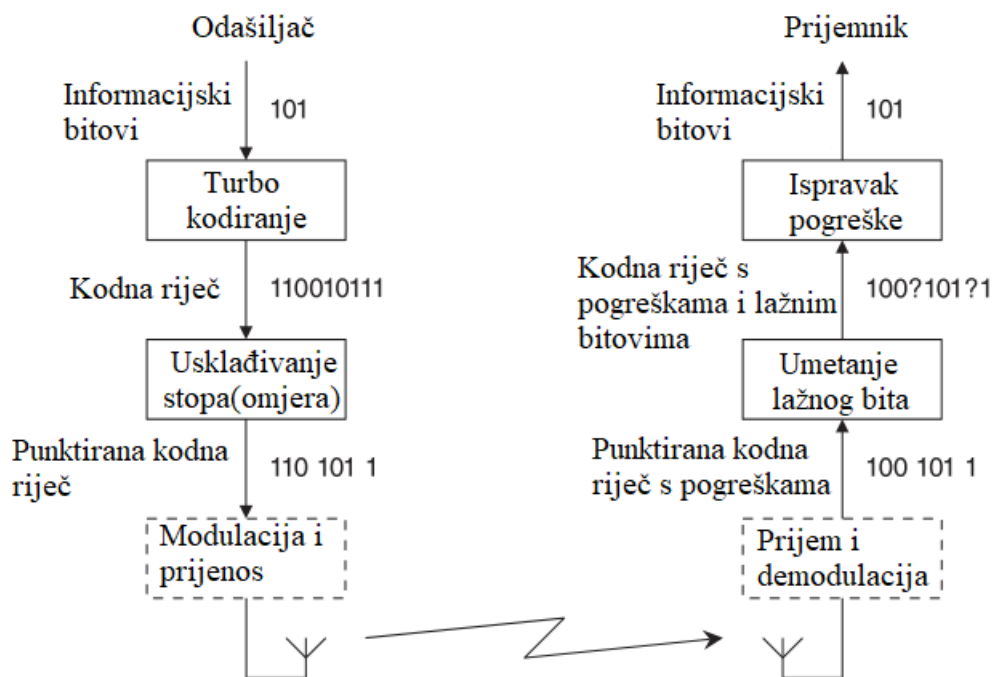
gdje  $\Delta L$  predstavlja razliku između duljine puta najduže i najkraće zrake. [7]

Kako bi se osigurala visoka pouzdanost prijenosa u radijskim komunikacijskim sustavima, pa tako i u 4G mrežama se koriste tehnike zaštite od pogrešaka.

### 2.7.1. Ispravljanje pogrešaka unaprijed

FEC (eng. *Forward Error Correction*) važna je tehnika za ispravljanje pogrešaka unaprijed. FEC prenosi informaciju koja je predstavljena pomoću kodne riječi, obično sadržavajući dva ili tri puta više bitova u odnosu na samu informaciju koja se prenosi. Ovi dodatni bitovi pružaju redundantne podatke koji omogućuju prijammniku da obnovi izvorni niz informacija. Omjer kodiranja predstavlja odnos broja informacijskih bitova i broja odaslanih bitova. Bežični odašiljač može uvijek prilagoditi brzinu kodiranja kroz dvostupanjski proces, prikazan na slici 2.19. Prva faza

uključuje prolazak informacijskih bitova kroz kodere s fiksnom omjerom koda. Za tu svrhu, LTE koristi poznati algoritam turbo kodiranja s fiksnom omjerom koda od 1/3.

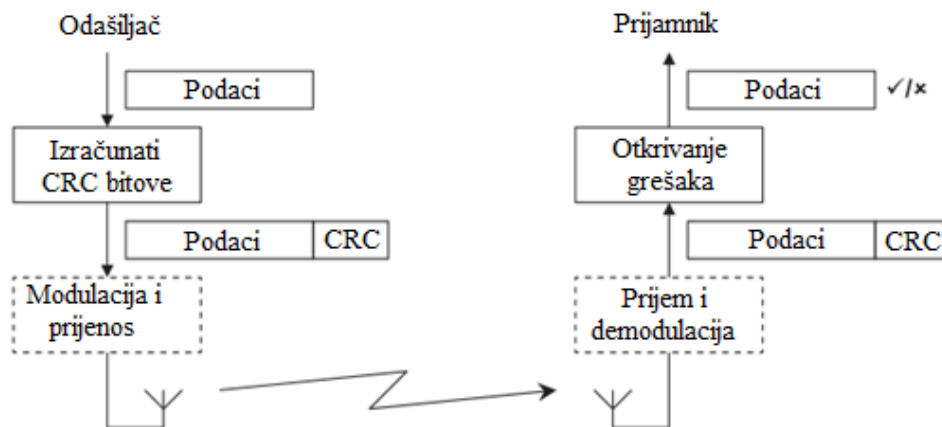


Slika 2.19. Blok dijagram odašiljača i prijmnika koji upotrebljavaju FEC i usklađuju brzine [7]

Druga faza, nazvana usklađivanje brzine, uključuje odabir određenih kodiranih bitova za prijenos, dok se drugi odbacuju putem procesa nazvanog punktiranje. Prijemnik također ima kopiju algoritma za punktiranje kako bi mogao umetnuti lažne bitove na mjesta gdje su informacije odbačene. Nakon toga, podaci se šalju kroz turbo dekođer za ispravljanje pogrešaka. Promjene u omjeru koda imaju sličan učinak kao i promjene u modulacijskoj shemi. Ako je omjer koda mali, preneseni podaci sadrže mnogo više redundantnih bitova, što omogućuje prijmniku ispravljanje velikog broja pogrešaka i uspješan rad pri niskom SINR-u, ali s nižom brzinom prijenosa informacija. S druge strane, ako je omjer koda blizu 1, količina informacija je veća, ali sustav postaje osjetljiviji na pogreške. LTE iskorištava ovaj kompromis slično kao i ranije spomenuto, koristeći visoki omjer koda kada je primljeni SINR visok, a niži omjer koda ako je primljeni SINR nizak. [7]

### 2.7.2. Zahtjev za automatsko ponavljanje

Zahtjev za automatskim ponavljanjem (ARQ), također poznat kao jedna od tehnika za upravljanje greškama, prikazan je na slici 2.20. Odašiljač uzima blok informacijskih bitova i koristi ih za izračunavanje dodatnih bitova, koji se nazivaju ciklička provjera redundantnosti (eng. *CRC - Cyclic Redundancy Check*). Ti bitovi se pridodaju informacijskom bloku, nakon čega se cijeli skup podataka prenosi na uobičajeni način. Primatelj odvaja informacijske i CRC bitove iz primljenog bloka te koristi informacijske bitove za izračunavanje očekivanih CRC bitova. Ako se promatrani i očekivani CRC bitovi podudaraju, to znači da je informacija ispravno primljena te primatelj šalje pozitivnu potvrdu natrag odašiljaču (takozvani ACK – eng. *ACKnowledgment*). Međutim, ako se CRC bitovi razlikuju, to ukazuje na pogrešku u prijenosu, pa primatelj šalje negativnu potvrdu (NACK) kako bi zatražio ponovni prijenos podataka. Tehnika ARQ omogućuje pouzdan prijenos podataka putem bežičnih komunikacijskih sustava, jer osigurava da su podaci ispravno primljeni i, u slučaju greške, zahtijeva njihov ponovni prijenos. [7]

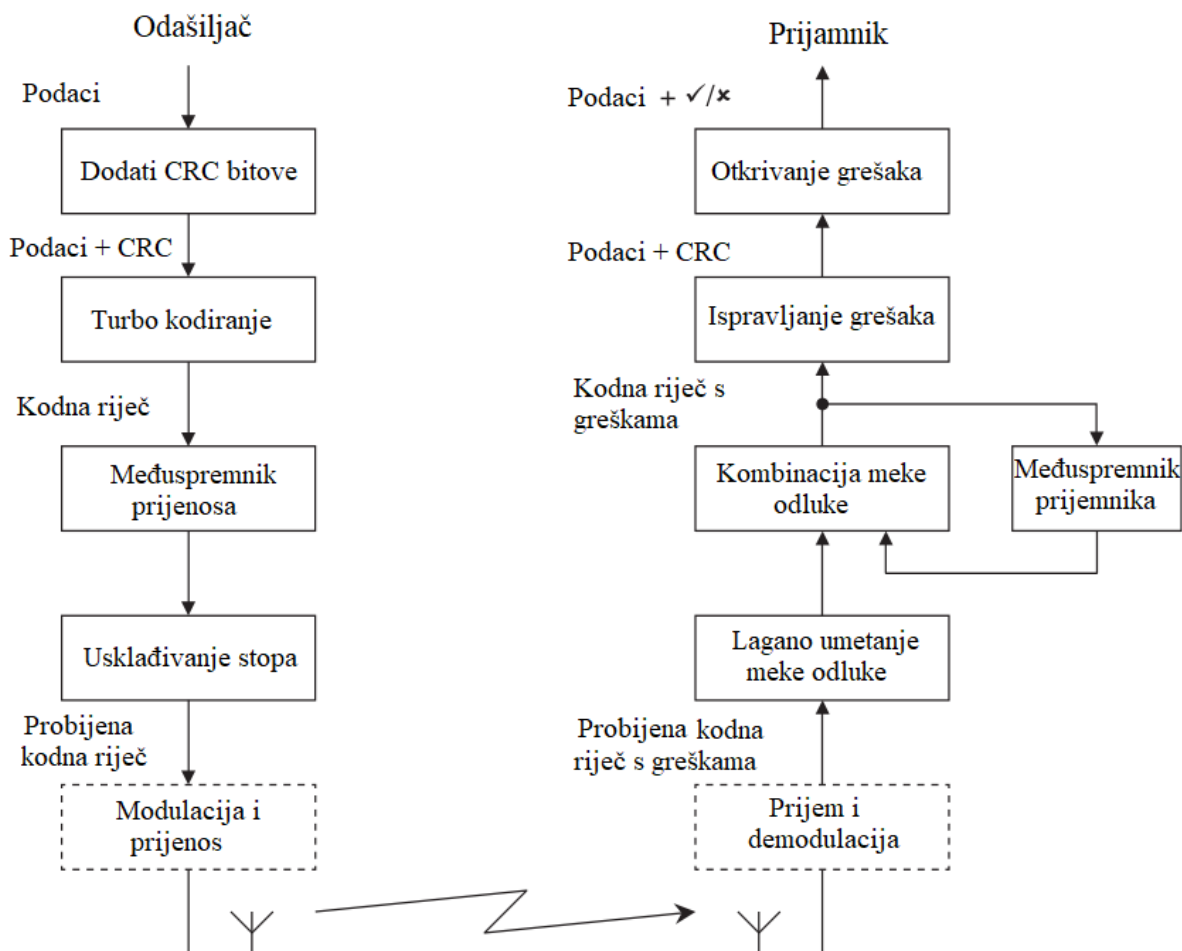


Slika 2.20. Blok dijagram u kojemu odašiljač i prijamnik koriste ARQ [7]

### 2.7.3. Hibridni ARQ

Općenito ARQ kao tehnika radi dobro, no postoji jedna manjkavost. Ukoliko blok podataka ne prođe cikličku provjeru redundantnosti prijamnik tada odbacuje taj blok podataka iako taj blok sadrži određenu količinu ispravnih bitova. Kako bi se nekako ipak mogli iskoristiti ti bitovi, mora se kreirati snažniji prijamnik. Takva ideja je implementirana u hibridni ARQ koji je ilustriran na slici 2.21. Odašiljač kao i obično šalje podatke, dok prijemnik demodulira dolazne podatke te prosljeđuje meke odluke do sljedeće faze. Postavljaju se meke nulte odluke da bi se svi bitovi koje je odašiljač uklonio uzeli u obzir i rezultat toga bi se pohranili u međuspremnik kao kodna riječ.

Kodna riječ prolazi kroz fazu otkrivanja i ispravljanja pogreške te se šalju pozitivne ili negativne potvrde odašiljaču. Ukoliko se dogodi neuspjeh kod cikličke provjere redundantnosti, odašiljač će ponoviti slanje podataka. Tada će prijemnik kombinirati podatke iz prvog i iz drugog prijenosa uz dodavanje meke odluke. Takav postupak povećava energiju signala na prijemniku te se time odmah povećava i vjerojatnost prolaska CRC-a. [7]



Slika 2.21. Blok dijagram odašiljača i prijamnika koji koriste hibridni ARQ [7]

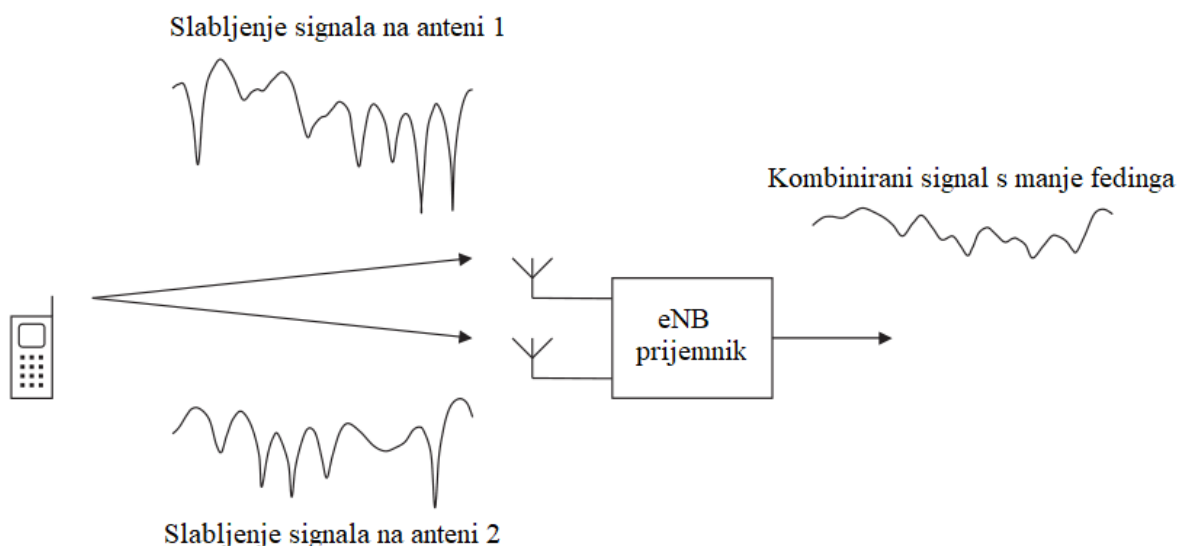
## 2.8. Tehnike višestrukih antena

4G je od početka kreiran na način da bazne stanice i mobilni uređaji koriste više antena za radijski prijenos i prijam. Postoje tri osnovne vrste višestrukih antena koje imaju različite ciljeve i koje se provode na različite načine, a to su obrada višestrukog prijenosa (diverzitija) (eng. *Diversity processing*), prostorno multipleksiranje (eng. *Spatial multiplexing*) i oblikovanje snopa (eng. *Beamforming*). Najpoznatija i najčešća tehnika koja se koristi je obrada višestrukog prijenosa koja

povećava snagu primljenog signala i smanjuje količinu slabljenja putem korištenja više antena na odašiljaču, prijammniku ili oboje. Druga tehnika je prostorno multipreksiranje, pri kojoj odašiljač i prijammnik koriste više antena kako bi se povećala brzina prijenosa podataka. Prostorno multipleksiranje često se opisuje kao korištenje višestrukih ulaznih i višestrukih izlaznih MIMO (eng. *Multiple Input Multiple Output*) antena. Treća tehnika je oblikovanje snopa, koju primjenjuje odašiljač, odnosno bazna stanica, koristeći više antena kako bi postigla što veću pokrivenost ćelije. Kroz rad će se opisati samo obrada višestrukog prijenosa i prostorno multipleksiranje.

### 2.8.1. Višestruki prijenos (prostorni diverziti)

U uzlaznoj se vezi često primjenjuje tehnika višestrukog prijema, što je ilustrirano na slici 2.22. Bazna stanica koristi dvije prostorno pomaknute antene kako bi uhvatila dvije kopije primljenog signala. Signali dolaze do prijemnih antena s različitim faznim pomacima, koji se eliminiraju putem specifične procjene kanala za svaku antenu. Nakon toga, bazna stanica je u mogućnosti sumirati signale koji su u fazi, čime se izbjegava rizik od destruktivne interferencije. Oba signala sastoje se od više slabijih zraka te su oboje izloženi efektu fedinga. U slučaju da su dva pojedinačna signala istovremeno pod utjecajem dubokog fedinga, kao rezultat snaga kombiniranog signala može biti niska.



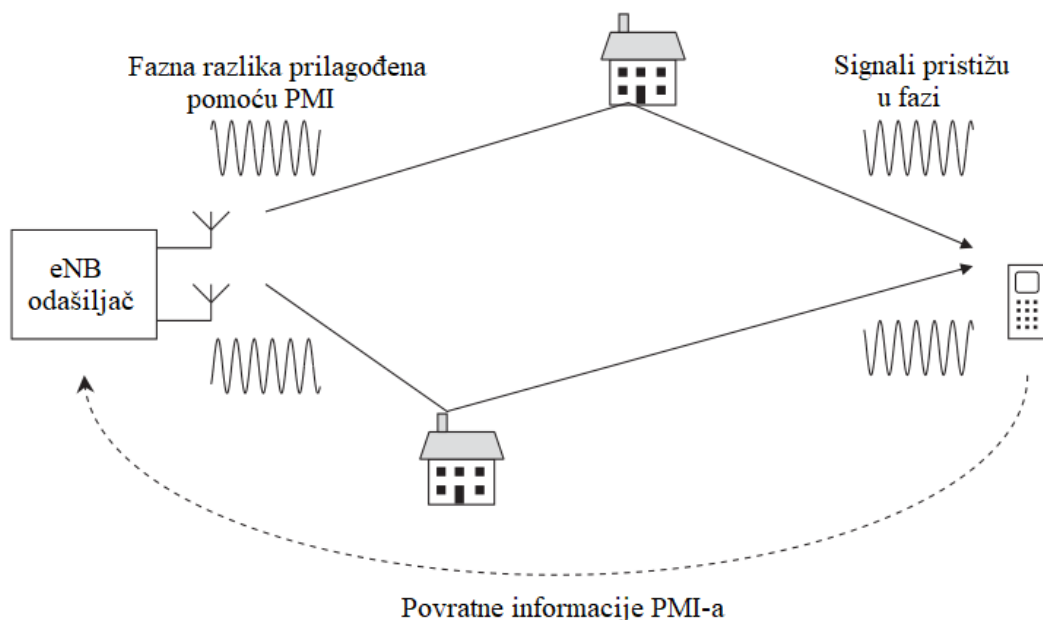
Slika 2.22. Smanjenje fedinga upotrebom diverzitetetskog prijennika [7]

Međutim, ako su antene dovoljno udaljene jedna od druge (barem nekoliko valnih duljina nosive frekvencije), geometrija slabljenja za ta dva skupa biti će značajno različita. To rezultira time da



će signali iskusiti slabljenje u potpuno različitim trenucima, čime je ukupno slabljenje kombiniranog signala smanjeno. Kao rezultat toga, smanjuje se ukupna stopa pogreške. Obično bazne stanice imaju više od jedne prijemne antene, a u slučaju 4G mreže pretpostavlja se da mobilni uređaji također koriste dvije prijemne antene, stoga LTE sustavi mogu iskoristiti višestruki prijem na silaznoj i uzlaznoj vezi. Uobičajeno je da su antene mobilnih uređaja međusobno bliže nego antene baznih stanica, što može umanjiti prednosti višestrukog prijema. U ovakvoj situaciji se mogu primijeniti antene koje detektiraju dvije neovisne polarizacije dolaznog signala (polarizacijski diverziti). [7]

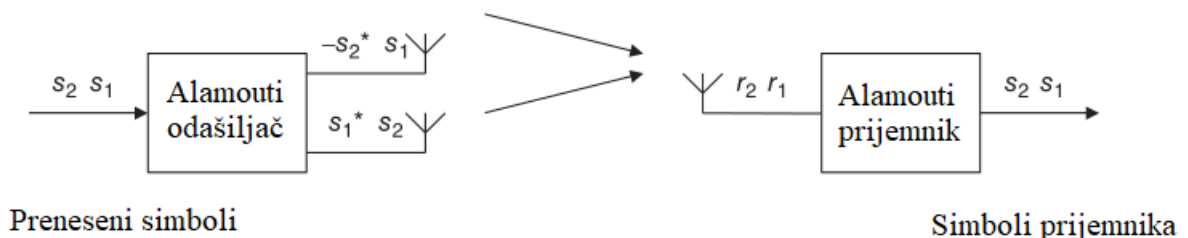
Višestruko odašiljanje minimizira učinak fedinga odnosno slabljenja upotrebom dvije ili više antena na odašiljaču. Vrlo slično je višestrukome prijemu, no postoji opasnost da se signali kombiniraju na jednoj prijemnoj anteni, što predstavlja rizik od mogućnosti pojave destruktivnih interferencija. Postoje dva moguća načina kako bi se mogla savladati ovakva vrsta problema. Prvi način je višestruki prijenos u zatvorenoj petlji (slika 2.23) dok je drugi način višestruki prijenos u otvorenoj petlji (slika 2.24.). Višestruki prijenos u zatvorenoj petlji podrazumijeva da odašiljač šalje dvije kopije signala na očekivani način, ali istovremeno primjenjuje fazni pomak na jedan ili oba signala prije slanja. Na takav način se osigurava da ta dva signala dopru do prijemnika u fazi, odnosno bez destruktivnih interferencija.



**Slika 2.23.** Princip rada zatvorene petlje višestrukog prijema [7]

Fazni pomak se određuje putem indikatora matrice prethodnog kodiranja PMI (eng. *Precoding Matrix Indicator*) koji se računa na prijammniku te se prosljeđuje odašiljaču. Jednostavni PMI može označavati dvije moguće opcije. Prva opcija je slanje obadva signala bez faznog pomaka, no u slučaju da opcija prouzroči destruktivne interferencije tada će se automatski pokrenuti druga opcija. Druga opcija obavlja slanje drugog signala sa faznim pomakom od  $180^\circ$ . Fazni pomaci koji se pojavljuju u prijenosu ovise o valnoj duljini signala nosioca, odnosno o njegovoj frekvenciji, što znači da je optimalni odabir PMI također funkcija frekvencije. Kako bi se odredio najbolji izbor PMI mora se također promatrati položaj mobilnog uređaja, što znači da što se mobilni uređaj brže i više kreće to je češća promjena PMI što uzrokuje vremensko kašnjenje odnosno zastarijevanja PMI. Zaključak je da je višestruki prijenos u zatvorenoj petlji primjenjiv za spore i kvazistacionarne mobilne uređaje. [7]

Tehnika koja se upotrebljava u otvorenoj petlji je poznata kao Alamoutijeva tehnika, koja je ilustrirana na slici 2.24. U ovoj izvedbi, odašiljač upotrebljava dvije antene da bi poslao dva simbola, koja su označena kao  $s_1$  i  $s_2$ , tijekom dva uzastopna vremenska koraka. U inicijalnom koraku odašiljač šalje  $s_1$  posredstvom prve antene, a  $s_2$  posredstvom druge antene. U sljedećem koraku se događa obrnuti postupak – šalje se  $s_2^*$  posredstvom prve antene, dok  $s_1^*$  se šalje posredstvom druge antene. Oznaka \* predstavlja promjenu predznaka imaginarne komponente kod odašiljača upotrebom procesa kompleksne konjugacije.



Slika 2.24. Princip rada Alamoutijeve tehnike za različitost prijenosa otvorene petlje [7]

Onda će prijmnik provesti dva uzastopna mjerenja primljenog signala koji će dogovarati dvjema različitim kombinacijama sa  $s_1$  i  $s_2$ . Nakon toga, se mogu riješiti dobivene jednadžbe kako bi se rekonstruirali dva prenesena simbola. Postoje dva ključna zahtjeva: oblici slabljenja moraju ostati relativno konzistentni između prvog i drugog vremenskog koraka, te dva signala ne smiju biti istovremeno izložena slabljenju. Oba zahtjeva obično su ispunjena. Valja napomenuti da je za brze mobilne uređaje najbolje koristiti višestruki prijenos u otvorenoj petlji. [7]

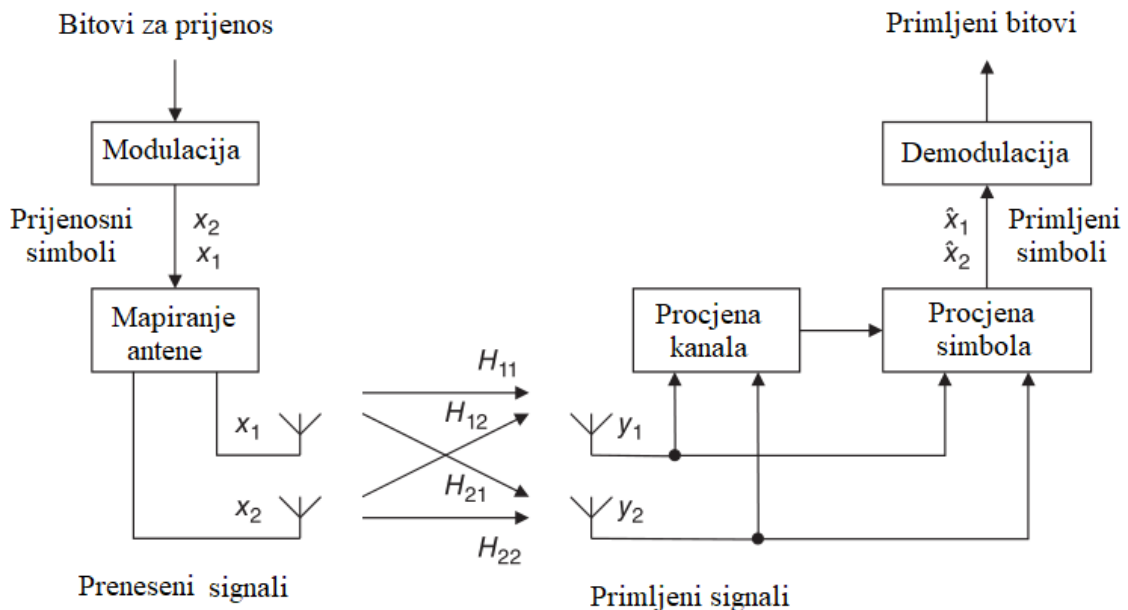
### 2.8.2. Prostorno multipleksiranje MIMO

Prostorno multipleksiranje se uspostavlja kada odašiljač i prijammnik imaju više antena te se tada uspostavljaju višestruki paralelni tokovi podataka između odašiljača i prijemnika, da bi se povećala brzina prijenosa podataka. U sustavu s  $N_T$  odašiljačkim i  $N_R$  prijemnim antenama, koji se često označava kao  $N_T \times N_R$  sustav prostornog multipleksiranja, vršna brzina prijenosa podataka je proporcionalna  $\min(N_T, N_R)$ . Osnovni princip sustava prostornog multipleksiranja je ilustriran na slici 2.25. Sustav se sastoji od odašiljača i prijammnika koji se svaki sastoji od dvije antene. Kod odašiljača postupak mapiranja antene koristi dva po dva simbola iz modulatora koje šalje jedan po jedan svakoj anteni. Kako antene istovremeno odašilju dva simbola, tako se udvostruči brzina prijenosa podataka. Simboli putuju do prijemnih antena kroz četiri odvojene radio staze pa se primljeni signali mogu napisati na sljedeći način:

$$y_1 = H_{11}x_1 + H_{12}x_2 + n_1$$

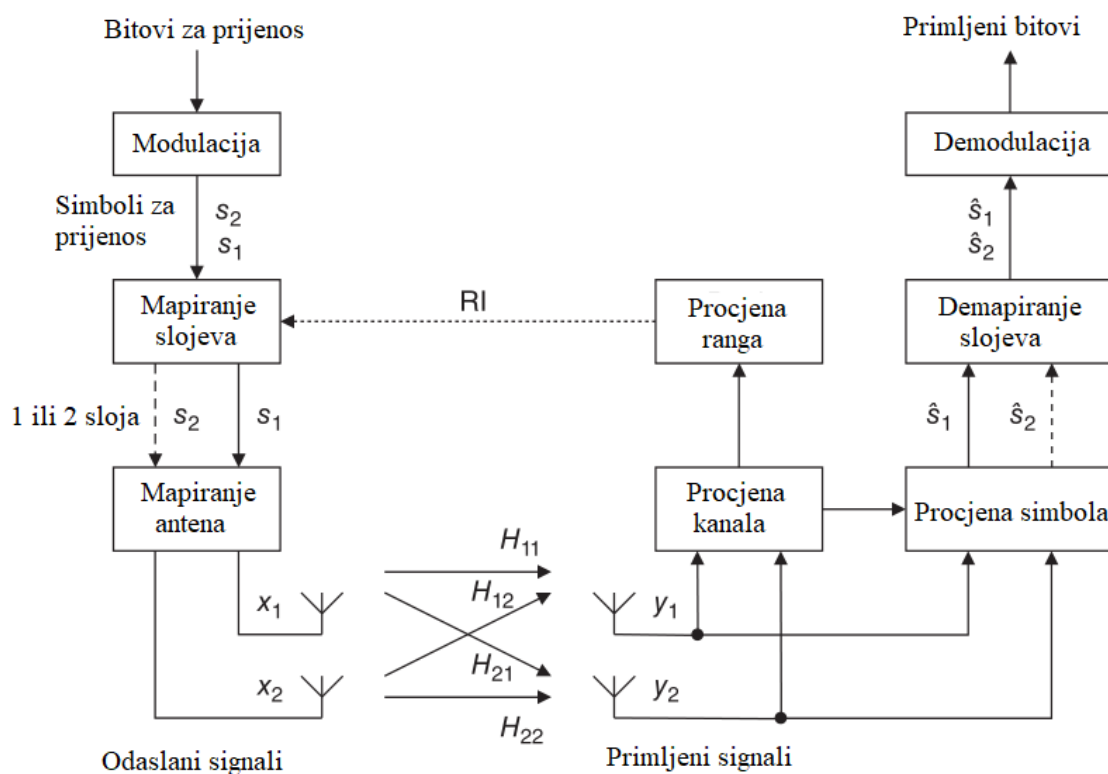
$$y_2 = H_{21}x_1 + H_{22}x_2 + n_2$$

gdje  $x_1$  i  $x_2$  označavaju signale koji su poslani s dvije antene za odašiljanje,  $y_1$  i  $y_2$  označavaju signale koji dolaze do dvije antene za prijem te  $n_1$  i  $n_2$  predstavljaju primljeni šum i smetnju.  $H_{ij}$  predstavljaju način na koji su odaslani simboli prigušeni i fazno pomaknuti dok putuju do prijemne antene  $i$  i od odašiljačke antene  $j$ . [7]



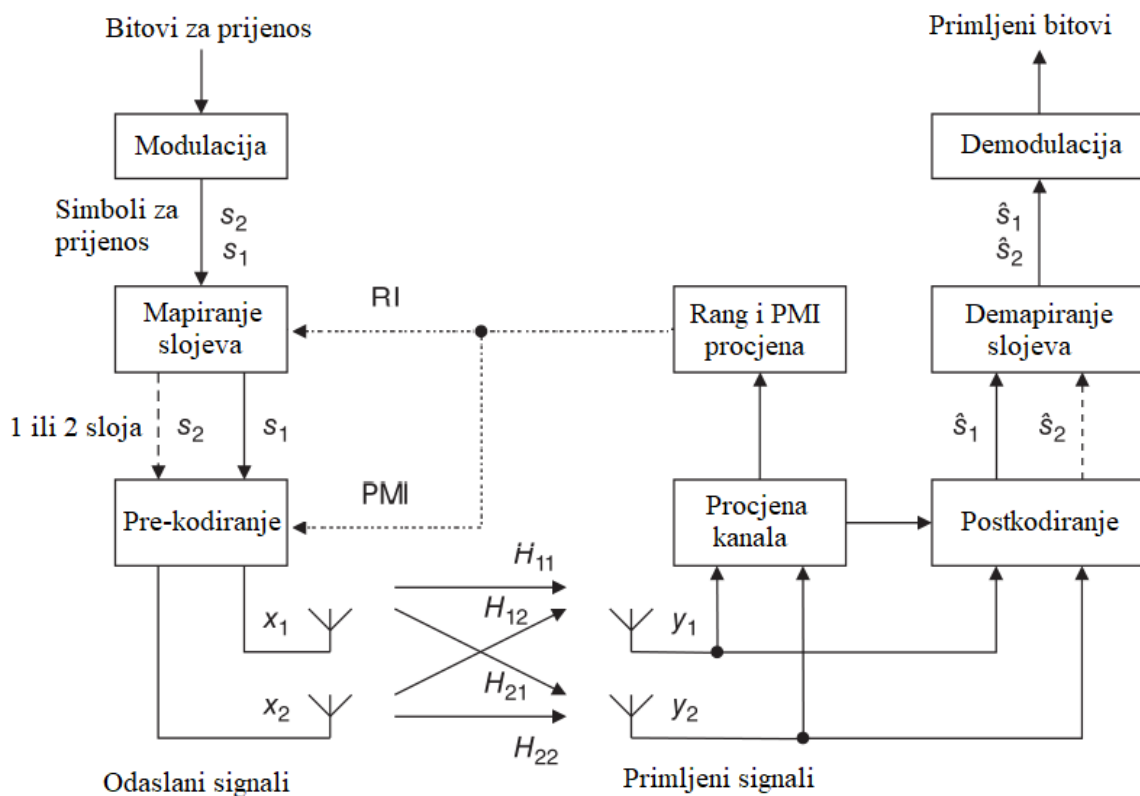
Slika 2.25. Osnovni principi  $2 \times 2$  sustava prostornog multipleksiranja [7]

U silaznoj vezi, MIMO se koristi za povećanje propusnosti kod visokog SNR-a. U prostornom multipleksiranju, odašiljačke antene šalju različite podatkovne tokove na više prijemnih antena. Tokovi se odvajaju i rekonstruiraju na mobilnom uređaju. Ovaj način prijenosa (slika 2.26.) ne zahtijeva dodatni spektralni pojas ili snagu. Višestazno širenje omogućuje signalima s različitih antena da dosegnu uređaje u različitim vremenima. Planiranje mreže mora uzeti u obzir višestazno širenje signala za postizanje obećane propusnosti. Okruženje mora podržavati refleksije signala i adekvatan razmak između antena kako bi se smanjio utjecaj slabljenja. U sustavima kao što je 2x2 MIMO, dobitci se ostvaruju u dobrim kanalnim uvjetima s malo interferencije. U prostornom multipleksiranju, mreža koristi indikatore nivoa i CQI od uređaja za optimizaciju modulacije i kodiranja. Na rubu ćelije ili u lošim uvjetima, MIMO povećava robusnost podatkovnog prijenosa koristeći višestruko odašiljanje (odašiljački diverziti). Odašiljači šalju identične podatkovne tokove za povećanje SNR-a i robusnosti. UE rekonstruira jedan podatkovni tok iz višestrukih signala koji prelaze različite putanje. [7]



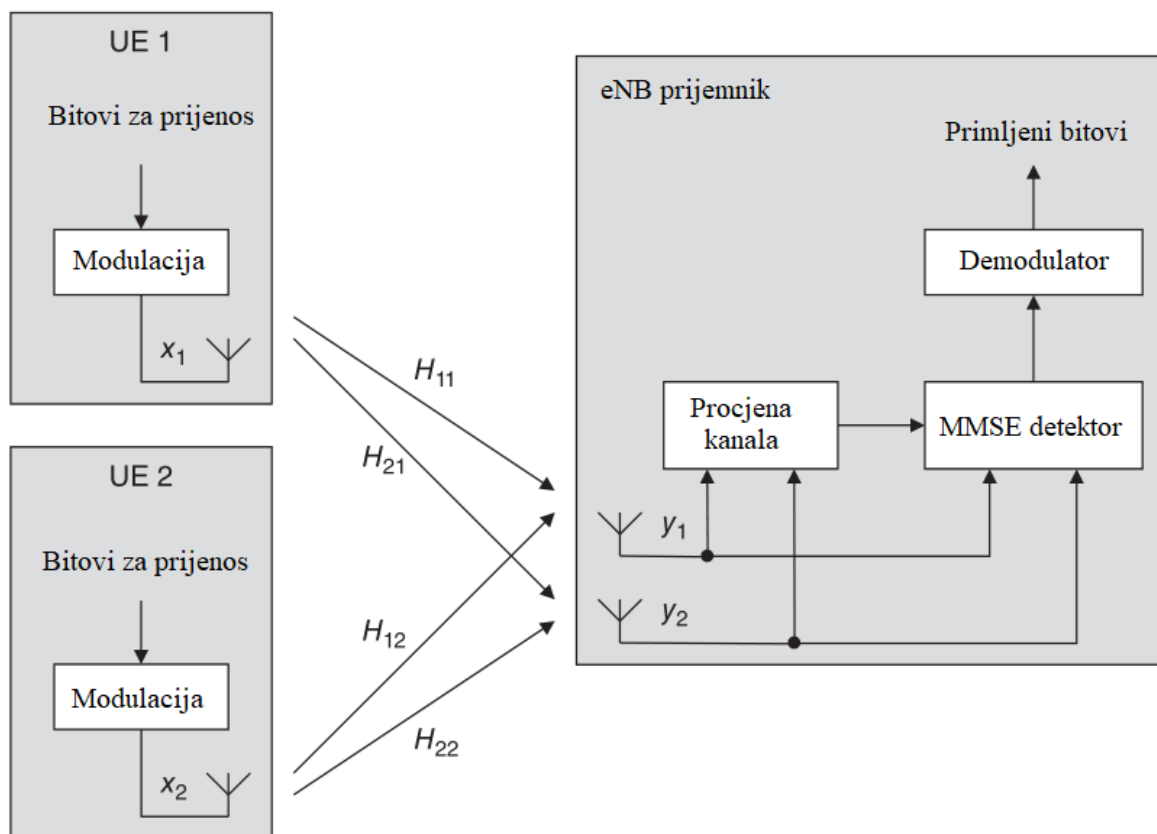
Slika 2.26. Rad sustava prostornog multipleksiranja  $2 \times 2$  otvorene petlje [7]

Na slici 2.27. je prikazano prostorno multipleksiranje zatvorene petlje. Prijemnik mjeri kvalitetu kanala koje upotrebljava na temelju čega šalje baznoj stanici dvije veličine, indikaciju ranga i indikator matrice prethodnog kodiranja (PMI). Fazni pomak se određuje putem indikatora matrice prethodnog kodiranja PMI (eng. *Precoding Matrix Indicator*) koji se računa na prijammniku te se prosljeđuje odašiljaču. Jednostavni PMI može označavati dvije moguće opcije. Prva opcija je slanje obadva signala bez faznog pomaka, no u slučaju da opcija prouzroči destruktivne interferencije tada će se automatski pokrenuti druga opcija. Druga opcija obavlja slanje drugog signala sa faznim pomakom od  $180^\circ$ . Odašiljač označava svoj izbor za svaki blok odaslatih podataka pomoću kontrolne informacije niske razine, kako bi se osiguralo da prijammnik može ispravno obraditi podatke. Ova tehnika je implementirana u LTE, a poznata je kao prostorno multipleksiranje zatvorene petlje (slika 2.27.). Izraz 'zatvorena petlja' odnosi se specifično na petlju koja je stvorena vraćanjem PMI-a.



**Slika 2.27.** Rad sustava prostornog multipleksiranja  $2 \times 2$  zatvorene petlje [7]

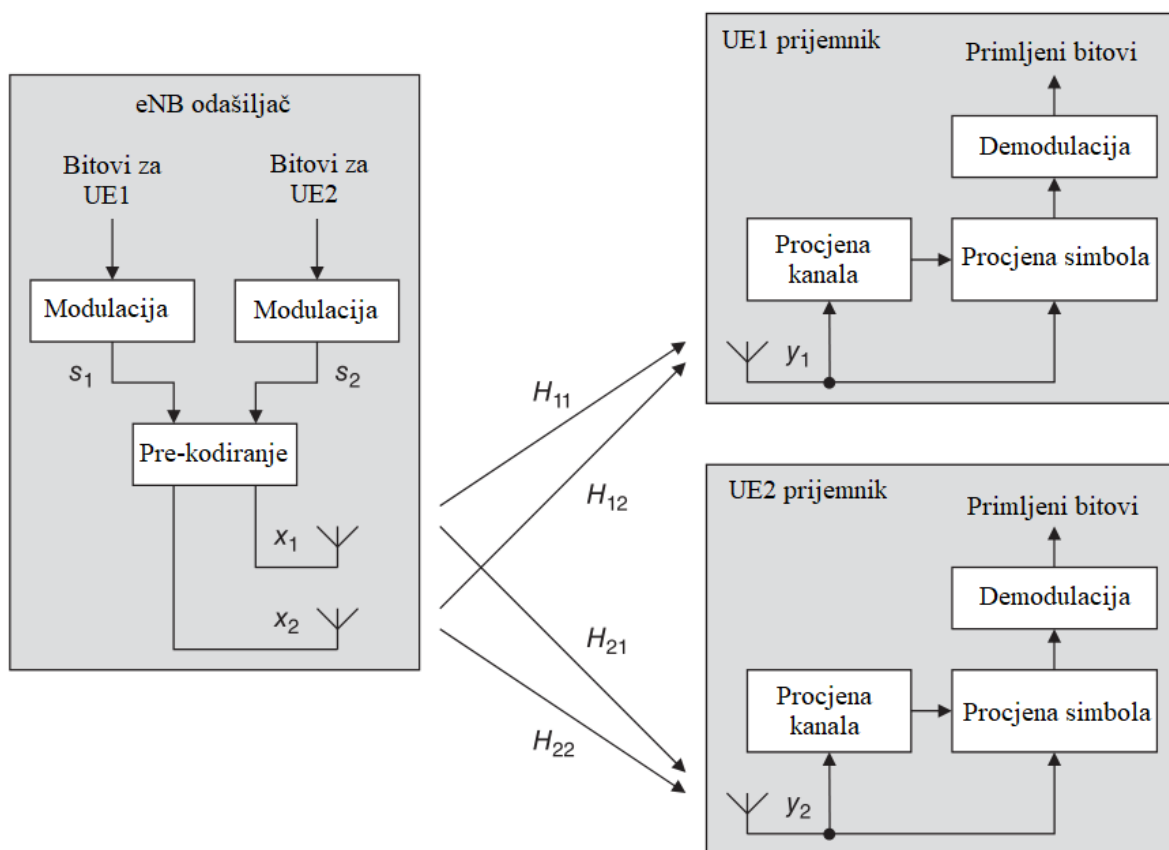
Slika 2.28. prikazuje tehniku u kojoj se koriste dvije odašiljačke i dvije prijemne antene, koje dijele isto vrijeme odašiljanja i frekvenciju. Međutim, u odnosu na do sada opisanim tehnikama koje su opisane kao MIMO za jednog korisnika (SU-MIMO, tj. *Single User MIMO*), ova tehnika uključuje mobilne antene na dva odvojena mobilna uređaja, umjesto na jednom uređaju. Ovakva metoda poznata je kao MIMO za više korisnika ili skraćeno MU-MIMO (što dolazi od engleskog izraza *Multiuser-MIMO*). Kod MU-MIMO mobilni uređaji odašilju u isto vrijeme i na istoj nosivoj frekvenciji, no ne upotrebljava se prethodno kodiranje. Kada bazna stanica primi prijenose razdvoji ih na određene načine kao što je detektor minimalne srednje kvadratne pogreške. Ovakva vrsta tehnike će funkcionirati samo ako je matrica kanala u dobrom stanju. Postoje dva razloga zbog kojih će ova tehnika dobro funkcionirati. Prvi razlog je velika vjerojatnost da su mobilni uređaju udaljeni pa će time i njihove staze zraka vrlo vjerojatno biti vrlo različite. Drugi razlog je da bazna stanica može slobodno odabrati mobilne uređaje koji sudjeluju, pa će tako ti odabrani mobilni uređaju voditi do matrice kanala koja je dobrog ponašanja.



Slika 2.28. Implementacija višekorisničkog MIMO-a na uzlaznoj vezi [7]

Višekorisnički MIMO kod uzlazne veze ne povećava vršnu brzinu prijenosa podataka pojedinačnog mobilnog uređaja, ali je i dalje koristan zbog povećanja propusnosti ćelije. Isto tako

se može implementirati korištenjem jeftinih mobitela koji imaju samo jedno pojačalo snage i jednu odašiljačku antenu, a ne dvije. Iz navedenih razloga, višekorisnički MIMO standardna je tehnika u uzlaznoj vezi LTE izdanja 8. Jednokorisnički MIMO je uveden u uzlaznu vezu tek u izdanju 10. Također se može primijeniti višekorisnički MIMO na silaznu vezu, kao što je ilustrirano na slici 2.29. Međutim, postoji jedan problem, mobilni uređaj UE1 može mjeriti svoj primljeni signal  $y_1$  i elemente kanala  $H_{11}$  i  $H_{12}$ . Međutim, nema saznanja o drugom primljenom signalu  $y_2$ , ili o drugim elementima kanala  $H_{21}$  i  $H_{22}$ . Suprotna situacija vrijedi za mobilni uređaj UE2. Niti jedan mobilni uređaj nema potpuno znanje o elementima kanala ili primljenim signalima, pa se ne mogu koristiti tehnike kao u uzlaznoj vezi. Rješenje je implementacija silazne veze višekorisničkog MIMO-a prilagodbom druge tehnike višestrukih antena, poznate kao oblikovanje snopa.

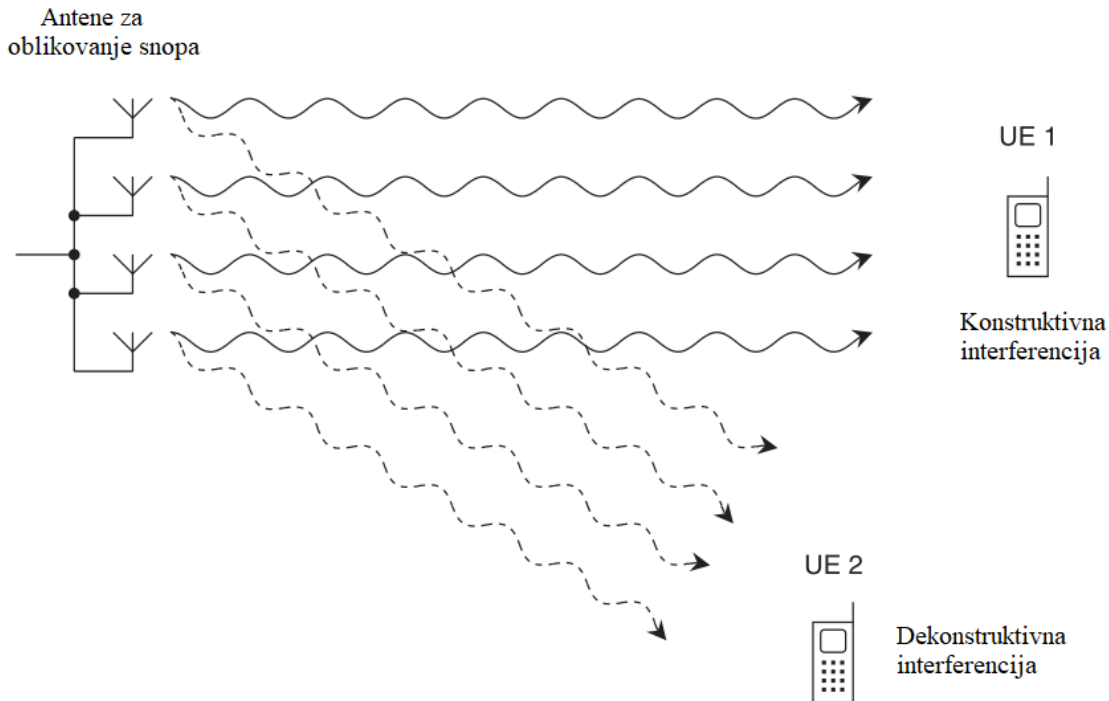


Slika 2.29. Implementacija višekorisničkog MIMO-a na silaznu vezu [7]

### 2.8.3. Oblikovanje snopa

Oblikovanje snopa (eng. *Beamforming*) je tehnika kod koje bazna stanica i dalje posjeduje više antena, ali njihov razmak je manji nego prethodno opisanih tehnika, obično pola valne duljine nosive frekvencije. Isto tako pretpostavlja se da postoji malo višestaznog širenja između bazne stanice i mobilnog uređaja. Koristeći takvu geometriju mobilni uređaj prima visoko korelirane

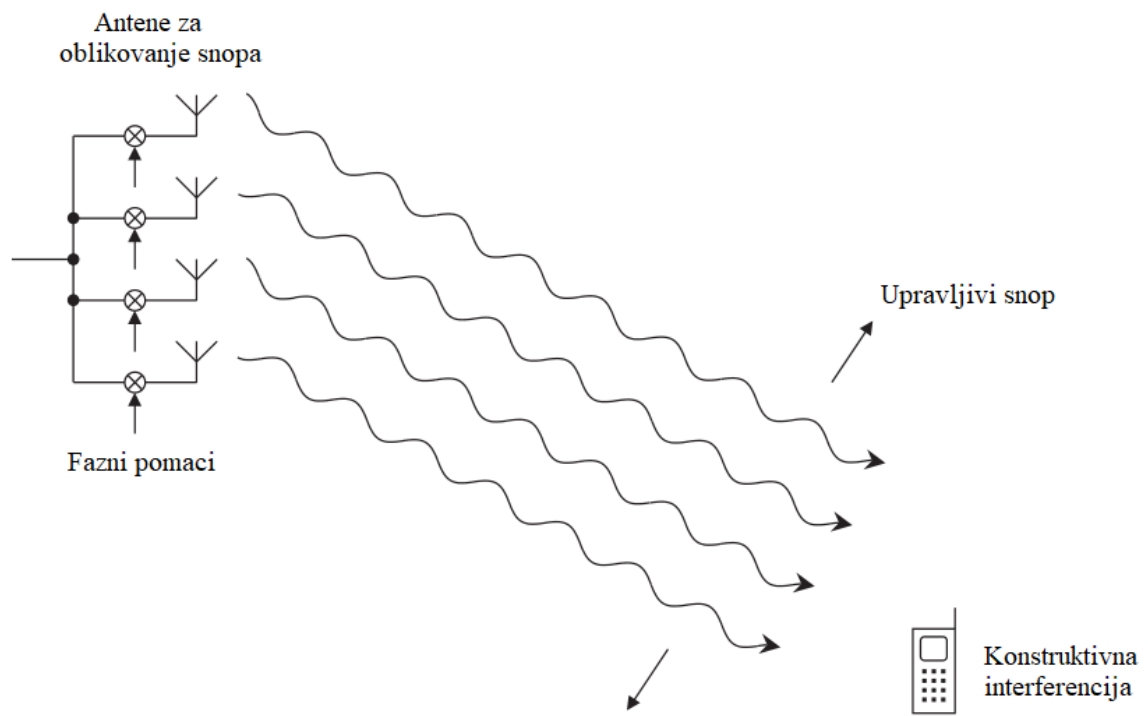
signale s odašiljačkih antena bazne stanice, tako da su tehnike prostornog multipleksiranja neprikladne. Suprotno tome, višestruke antene povećavaju pokrivenost ćelije slijedeći načela ilustrirana na slici 2.30. Ovdje je mobilni uređaj UE1 daleko od bazne stanice, na liniji vidljivosti koja je pod pravim kutom u odnosu na antenski niz. Signali sa svake antene dolaze do mobilnog uređaja u fazi i konstruktivno interferiraju pa je snaga primljenog signala velika. [7]



**Slika 2.30.** Osnovna načela oblikovanja snopa [7]

Nasuprot tome, mobilni uređaj UE2 je pod kosim kutom i prima signale od alternativnih antena koje su  $180^\circ$  izvan faze. Signali destruktivno interferiraju pa je snaga primljenog signala mala. Može se reći da se stvara dijagram zračenja čiji je glavni snop usmjeren prema mobilnom uređaju UE1, dok se smjer nule u dijagramu zračenja odredi u smjeru mobilnog uređaja UE2. Kako je širina snopa uža od širine snopa samo jedne antene, tako je odašiljačka snaga usmjerena prema mobilnom uređaju UE1. Rezultat toga jest povećanje dometa bazne stanice u smjeru mobilnog uređaja UE1. Slika 2.31. prikazuje da se primjenom fazne rampe na antene u antenskom sustavu eNB može električki upravljati smjerom glavnog snopa zračenja antene





**Slika 2.31.** Upravljanje snopom korištenjem skupa faznih pomaka [7]

### 3. PETA GENERACIJA (5G) MOBILNIH TELEKOMUNIKACIJSKIH MREŽA

S povećanjem broja korisnika i količine prometa u mrežama te pojavom novih aplikacija i uređaja koji su spojeni na internet pojavila se potreba nadogradnje 4G mreža i razvijanja novog sustava - pete generacije mobilnih mreža ili 5G (ili 5G NR). 5G je definiran 3GPP-om specifikacijom od izdanja 15, a funkcionalno je pokrenut u lipnju 2018. i potpuno specificiran do rujna 2019. 5G je namijenjen za široku upotrebu u različitim područjima kao što su internet stvari IoT (eng. *Internet of Things*), automatizacija u industriji, autonomna vozila i drugo. 5G predstavlja veliki iskorak u odnosu na prethodne generacije gledajući specifikacije i karakteristike.[9] Zahtjevi na 5G sustav su sljedeći:

- veći kapacitet koji omogućava istovremeno povezivanje s puno većim brojem uređaja nego prije,
- minimalno kašnjenje koje omogućava gotovo trenutačnu akciju koja je vrlo bitna na primjer u medicini zbog sve većeg broja operacija na daljinu,
- veća mobilnost koja omogućava korisnicima da se kreću bez ograničenja u smislu da će mreža konstantno omogućavati stabilnu i neprekidnu vezu bez obzira na područje ili zonu u kojoj se nalazi.
- veća stabilnost koja otvara vrata za dodatna područja upotrebe 5G mreže kao što je medicina, autoindustrija i slično,
- veća dostupnost što znači da će pristup Internetu biti gotovo bilo gdje dostupan bez obzira na udaljenost, visinu, naseljenosti područja.

Pri tome se od 5G sustava traži ispunjavanje sljedećih karakteristika:

- brzina prijenosa mora biti od 1 do 20Gbit/s do ruba ćelije
- vremensko kašnjenje koje je manje ili jednako 1ms – ono se može ostvariti kada je korisnik poslužen s manje od 1km udaljenosti i kada postoji puno manjih ćelija
- osiguranje 1000 puta veće brzine prijenosa po jedinici površine tj. 1 Tbit/s/km<sup>2</sup> (10Mbit/s/m<sup>2</sup> za hotspot)
- povećana širina pojasa do 400MHz
- mogućnost povezivanja od 10 do 100 puta većeg broja povezanih uređaja, dostižući tako 1 milijun uređaja po kvadratnom kilometru

- zadovoljavanje zahtjeva za 99,999% dostupnosti, što 5G predstavlja kao sustav za sigurnu i pouzdanu komunikaciju
- 100% pokrivenosti omogućuje korisnicima da ostanu povezani bez obzira na svoju lokaciju
- 90% smanjenja korištenja energije u mreži u odnosu na 2010. godinu
- izuzetno dug vijek trajanja baterije do 10 godina za niskonaponske uređaje [10]

3GPPP je razvio 5G NR (eng. *New Radio*) standard za novu radijsku pristupnu tehnologiju (RAT – *Radio Access Technology*) koja se globalno primjenjuje za zračno sučelje u 5G mrežama. 5G NR se može podijeliti u tri faze standardizacije:

1. Faza standardizacije 5G NR je pokrenuta u izdanju 15. U toj fazi je cilj bio poboljšati mobilnu širokopojasnost (eng. eMBB - *Enhanced Mobile Broadband*) te je ovdje stvorena 5G mreža koja radi uz potporu 4G jezgrene mreže. 5G mreža koja funkcionira pomoću 4G se naziva nesamostalna (eng. NSA - *Non-standalone*) 5G NR.
2. Faza standardizacije 5G NR je pokrenuta u izdanju 16. koje je izdano 2020. godine. U drugoj fazi se poboljšala ultra pouzdana i nisko latentna komunikacija (eng. eURLLC - *enhanced Ultra Reliable Low Latency Communication*), MIMO i ostalo. Specificirana je i Samostalna mreža (eng. SA - *Stand-alone*) 5G NR odnosno stvorena je potpuno nova 5G NR mreža koja ne zahtjeva nikakvu pomoć od 4G mreže kako bi mogla funkcionirati. To znači da svi elementi (bazne stanice, jezgrene mreže) rade unutar 5G tehnologije.
3. U zadnjoj specifikaciji objavljenj 2022. godine u izdanju 17 definirana su unaprjeđenja vezana za mobilnu širokopojasnost eMBB, ultra pouzdanu i nisko latentnu komunikaciju eURLLC i masivnu komunikaciju uređaja (eng. mMTC - *Massive Machine Type Communication*). [10]

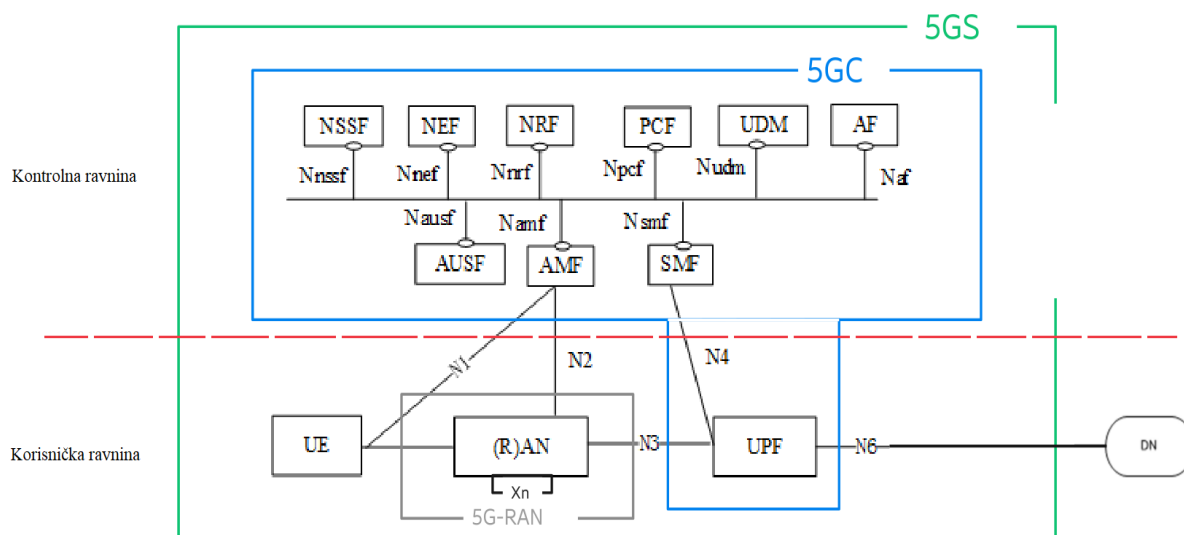
### 3.1. Arhitektura 5G mreže

Arhitektura 5G mreže sadrži tri dijela kao i arhitekture prethodnih mreža. Prvi dio arhitekture je korisnička oprema (UE) koja sadrži mobilni uređaj i USIM, drugi dio arhitekture je radio pristupna mreža koja se u 5G označava kao NG-RAN (eng. *Next-Generation Radio Access Network*), a treći dio je jezgrene mreža koja se označava kao 5GC (eng. *5G Core Network*), (slika 3.1.).



Slika 3.1. Arhitektura 5G mreže [9]

Glavni element radio pristupne mreže odnosno NG RAN je bazna stanica - gNB (eng. *next-Generation NodeB*). gNB omogućava brzu komunikaciju, nisku latenciju, posjeduje veću fleksibilnost, pruža podršku za razne frekvencijske opsege te ima poboljšanu alokaciju resursa u odnosu na bazne stanice eNB u 4G mrežama. Radio sučelje je nazvano NR-Uu, a ima funkciju kao i u 4G da prenosi kontrolne poruke i podatke te služi za komunikaciju UE i gNB. gNB može biti centralna jedinica (gNB-CU) ili se može podijeliti na jednu ili više gNB distribuiranih jedinica (gNB-DU) koje su povezani F1 sučeljem. Jezgrena mreža, tj. 5GC, na slici 3.1 je predstavljena elementom AMF/UPF. AMF (eng. *Access and Mobility management Function*) je funkcija upravljanja pristupom i mobilnošću koja komunicira s korisničkom opremom UE i pristupnom mrežom NR-RAN. UPF (eng. *User Plane Function*) je funkcija korisničke ravnine koja upravlja korisničkim podacima zajedno s AMF. Između NG RAN i 5GC se nalazi referentna točka koja se naziva NG (eng. *New Generation*), a sastoji se od nekoliko sučelja koji su prikazani na slici 3.2. [9]



Slika 3.2. Dijagram 5GS arhitekture

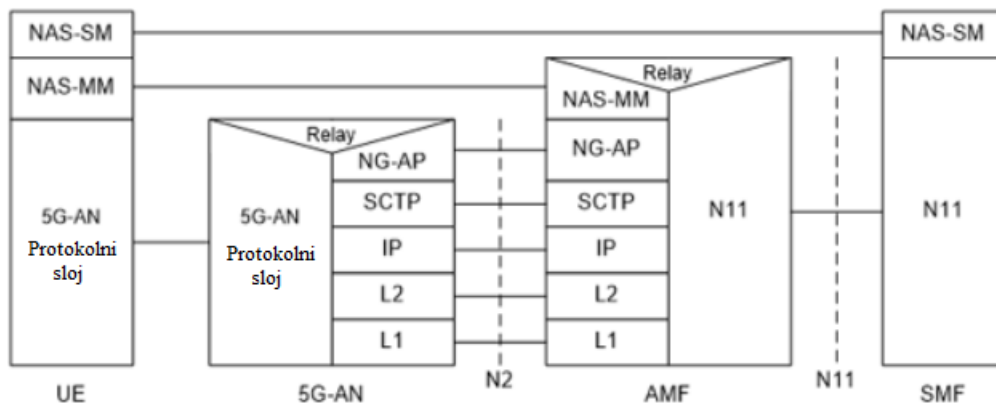
Arhitektura 5GC oslanja se na okvir arhitekture temeljene na uslugama u oblaku (eng. SBA - *Service Based Architecture*), gdje su elementi arhitekture definirani u smislu mrežnih funkcija (NF), a ne tradicionalnih mrežnih entiteta. Putem sučelja zajedničkog okvira, bilo koji NF nudi svoje usluge svim drugim ovlaštenim NF-ovima i/ili bilo kojim korisnicima kojima je dopušteno koristiti te pružene usluge. Takav SBA pristup nudi modularnost i mogućnost ponovne upotrebe. 5GC koristi SBA radi podrške autentifikaciji, sigurnosti, upravljanju serijama i objedinjavanju prometa s uređajima koji su spojeni. Na slici 3.2. se vidi odjeljivanje kontrolne i korisničke ravnine odnosno stvorena su sučelja za dvije ravnine koje su različite po svojim funkcijama koje obavljaju. Kontrolna ravnina upravlja sesijom, provodi IP alokaciju adresa, provodi autentifikaciju i sigurnost, upravlja mobilnošću te signalizacijom između jezgre i uređaja. Korisnička ravnina usmjerava i prosljeđuje pakete, provodi inspekciju paketa, filtrira pakete te provjerava kvalitetu usluge. DN (eng. *Data Networks*) predstavlja podatkovnu mrežu odnosno Internet. Funkcija odabira mrežnog isječka (eng. NSSF - *Network Slicing Selection Function*) izabire najbolji mrežni segment koji je dostupan za uslugu koju korisnik traži. [10] Sve 5G mrežne funkcije (NF-ovi) su centralno pohranjene u funkciji mrežnog repozitorija (eng. NRF - *Network Repository Function*) mreže operatera. NRF pruža API koji je temeljen na standardima koji omogućuje 5G NF-ovima da se registriraju i pronađu jedni druge. Ključni element potreban za izvođenje nove arhitekture temeljene na uslugama (SBA) u jezgri 5G je NRF. [11]

Funkcija kontrole politike (eng. PCF - *Policy Control Function*) upravlja prometom korisničkih podataka kako se ne bi premašio ugovoren kapacitet nositelja. [10] Unificirano upravljanje

podacima (eng. UDM - *Unified Data Management*) obično služi kao pohrana poruka s praćenjem stanja, koja čuva informacije u lokalnoj memoriji. UDM pruža usluge drugim SBA funkcijama kao što su AMF, SMF i NEF. [12] Aplikacijska funkcija (eng. AF - *Application Function*) kontrolira aplikacije (s mogućim uključivanjem i u korisničku ravninu kada je potrebno). [10] Funkcija poslužitelja za provjeru autentičnosti (eng. AUSF - *Authentication Server Function*) koristi se pri autentifikaciji, omogućuje AMF-u autentifikaciju UE-a i pristup uslugama 5GC. [11] Funkcija upravljanja sesijom (eng. SMF - *Session Management Function*) i pozivima, no u skladu s time kontaktira UPF. 5G podržava dvije važne nove tehnike. Prva tehnika je odvajanje kontrolne i korisničke ravnine (eng. *Control Plane and User Plane Split*), a druga je raslojavanje mreže (eng. *Network Slicing*).

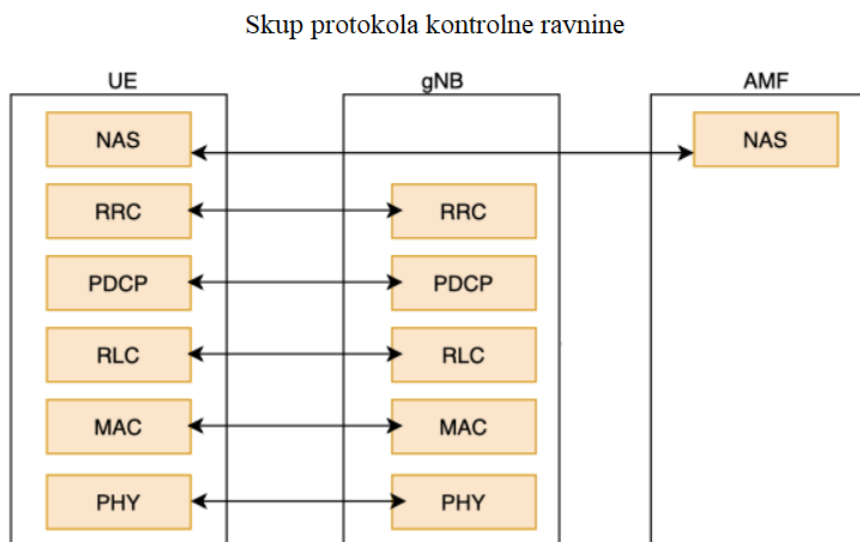
### 3.2. Skupovi 5G protokola

Slika 3.3. prikazuje kontrolnu ravninu između UE i AMF te UE i SMF. NAS-SM podržava upravljanje sesijom između UE-a i SMF-a, ono podržava uspostavu, modifikaciju i izdavanje PDU sesije korisničke razine. NAS-MM podržava funkcionalnost upravljanja registracijom, funkcionalnost upravljanja vezom i aktivaciju i deaktivaciju veze s korisničkom ravninom. Nadalje, NAS-MM je odgovoran za šifriranje i zaštitu integriteta NAS signalizacije. [9]



**Slika 3.3.** Stog protokola kontrolne ravnine između UE-a, 5G-AN-a, AMF-a i SMF-a [9]

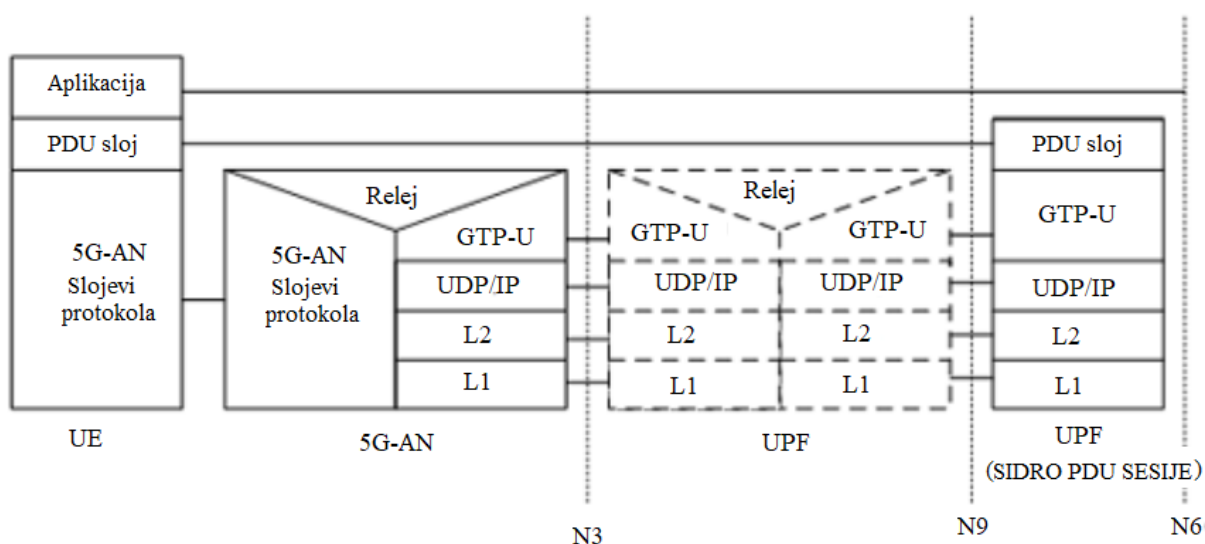
Što se tiče 5G-AN sloja protokola katkada zna biti drukčiji zbog strukture 5G-AN, no najčešće je oblika kao u 4G, kao što je prikazano na slici 3.4. Razlika je što 4G umjesto AMF-a koristi MME i drugačiju baznu stanicu tj. gNB. Slično kao u LTE-u i tu će NAS poruka biti ugrađena u RRC poruku i poslana gNB-u. gNB će proslijediti NAS poruku AMF-u. [9]



**Slika 3.4.** 5G skup protokola kontrolne ravnine [13]

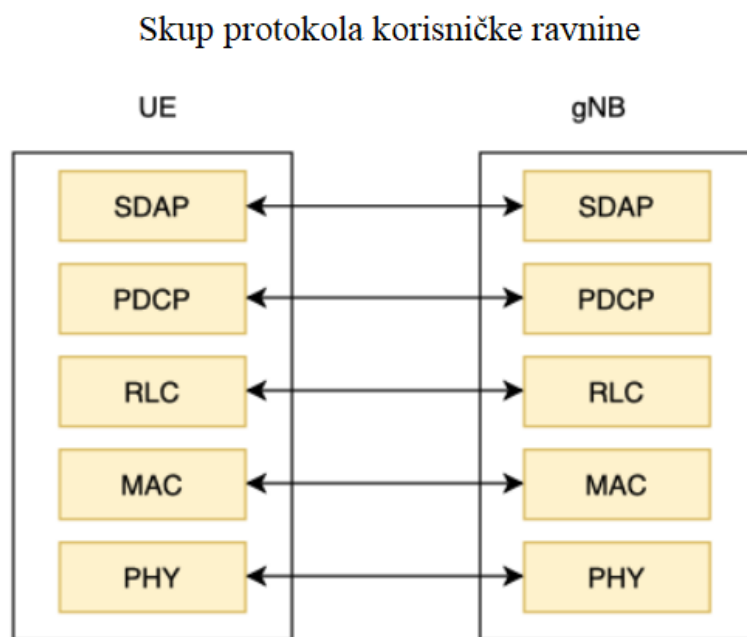
NG-AP je NG aplikacijski protokol, dok je SCTP (eng. *Stream Control Transmission Protocol*) protokol koji jamči isporuku signalnih poruka između AMF-a i 5G-AN čvora.

Slika 3.5. prikazuje korisničku ravninu između UE-a i AMF-a te UE-a i SMF-a. Ovdje PDU sloj odgovara PDU-u koji se prenosi između UE-a i DN-a preko PDU sesije. Ukoliko PDU sesija pripada vrsti IPv4 onda odgovara paketima IPv4, a ako je Ethernet tipa onda odgovara Ethernet okvirima.



**Slika 3.5.** Stog protokola korisničke ravnine između UE-a, 5G-AN-a i UPF-a [9]

Protokol GPRS tuneliranja za korisničku ravninu (eng. GTP-U - GPRS *Tunnelling Protocol for the User plane*) je protokol koji podržava tuneliranje korisničkih podataka preko N3 (između 5G-AN čvora i UPF-a) i N9 (između različitih UPF-ova 5GC-a). GTP-U će enkapsulirati sve PDU-e krajnjeg korisnika. Omogućuje enkapsulaciju na razini PDU sesije, pri čemu i ovaj sloj nosi oznaku koja ga veže s QoS protokolom. Što se tiče 5G-AN ovdje skup protokola tj. slojeva ovisi o samom AN-u. Slika 3.6. prikazuje detaljniji prikaz 5G-AN, koji je zapravo vrlo sličan 4G stogu protokola. U 5G-AN je uveden dodatni sloj SDAP (eng. *Service Data Adaptation Protocol*) koji se koristi kako bi se upravljalo QoS protokolom preko 5G radio sučelja. UDP/IP predstavljaju mrežne protokole okosnice. [9]

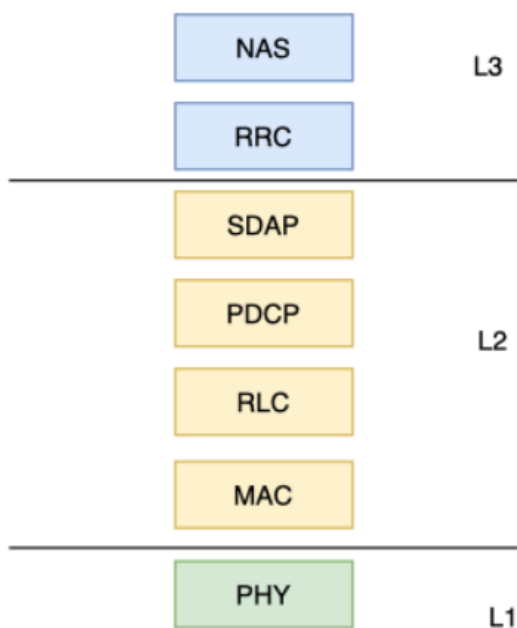


**Slika 3.6.** 5G skup protokola korisničke ravnine[13]

Slika 3.7. prikazuje slojeve snopa 5G protokola koji se mogu općenito podijeliti na tri sloja. Prvi sloj je fizički sloj, dok se drugi sloj naziva sloj podatkovne veze te se u njemu nalaze MAC, RLC, PDCP, SDAP. Treći sloj ujedno i zadnji zvan aplikacijski sloj, koji se sastoji od NAS i RRC. [13]



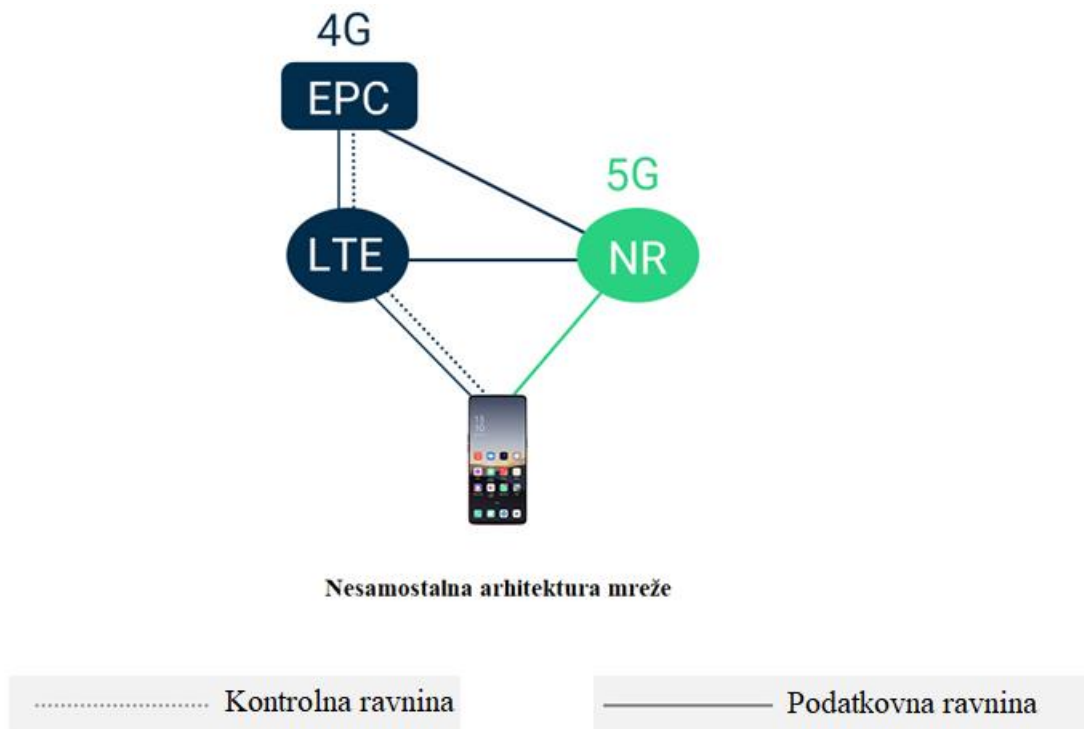
5G protokolni skup sa slojevima



Slika 3.7. Prikaz općenite podijele 5G protokolnog skupa sa slojevima [13]

### 3.3. Nesamostalna i samostalna arhitektura 5G mreže

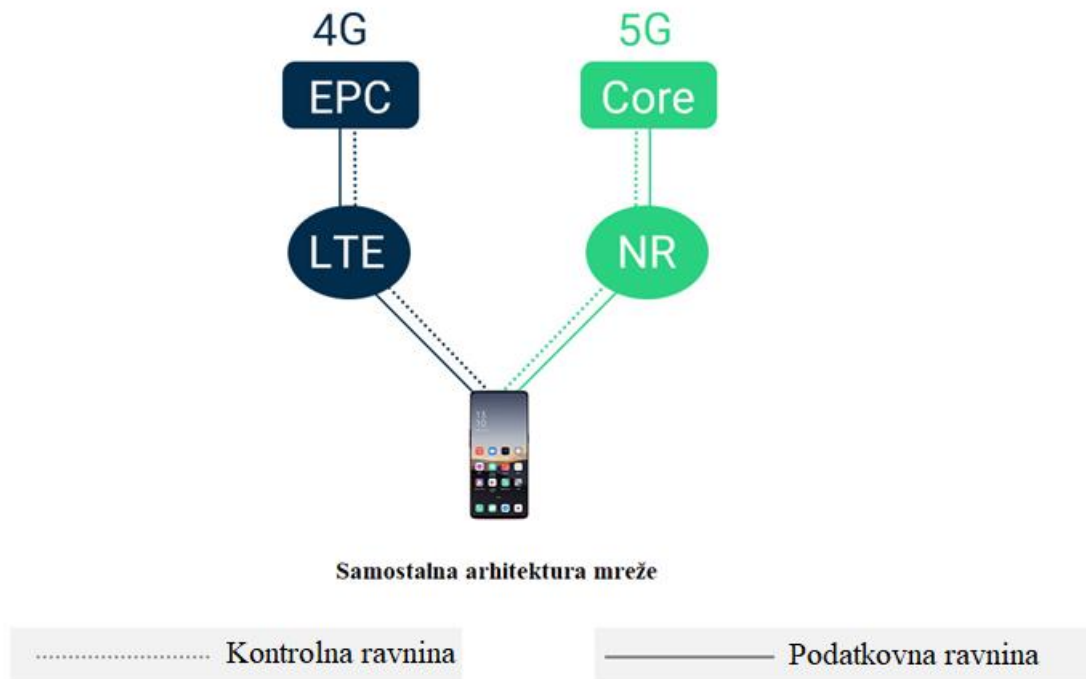
5G nesamostalna arhitektura (eng. 5G NSA - *5G non-standalone*) je prva verzija 5G mrežne arhitekture, koja je prethodila 5G samostalnoj mreži (eng. 5G SA - *5G standalone*). 5G NSA je dizajnirana tako da i dalje koristi 4G infrastrukturu na način da se 5G RAN i njegovo novo radio (NR) sučelje postavi i poveže s 4G LTE mrežom, što znači korištenje 4G radijskog pristupa za signalizaciju u kontrolnoj ravnini i 4G jezgrenoju mreži (EPC) (slika 3.8.). U ovakvoj vrsti arhitekture 5G radio (NR) se ne može samostalno povezati s jezgrenom mrežom 4G LTE kontrolne ravnine. Umjesto toga, 5G radio (NR) ovisi o baznoj stanici makro ćelije 4G eNB za svu signalizaciju kontrolne ravnine, dok se 5G NR koristi za korisničku ili podatkovnu razinu. Globalno, 5G NSA omogućava bežičnim operaterima brzu i jednostavnu dostavu početnih 5G usluga korisnicima, unaprjeđujući pokrivenost i propusnost u odnosu na 4G LTE. [14] Prednost koju pruža NSA 5G je smanjenje troškova, jednostavna implementacija, brzo uvođenje mreže među korisnike. [15]



**Slika 3.8.** 5G nesamostalna arhitektura (NSA) mreže [16]

5G samostalna arhitektura (eng. 5G SA - *standalone architecture*) predstavlja novostvorenu mobilnu mrežnu arhitekturu koja omogućuje sve usluge i mogućnosti planirane za 5G tehnologiju. Ova arhitektura ne ovisi o 4G infrastrukturi i time omogućava potpuno neovisno pružanje funkcionalnosti. SA posjeduje novu 5G paketnu jezgrenu arhitekturu i 5G RAN kao i njegovo New Radio (NR) sučelje, koje se sastoji od makro ćelijskih baznih stanica gNodeB (gNB). Kada su jezgrena arhitektura i 5G RAN povezani čine i rade kao samostalni entitet. 5G jezgrena mreža pruža signalizaciju kontrolne ravnine, dok 5G radijska pristupna mreža (RAN) pruža korisničku (ili podatkovnu) ravninu (slika 3.9), što znači prijenos podatkovnog prometa između korisničkog uređaja i mreže. Zato ovakva arhitektura uklanja bilo kakvu ovisnost o 4G jezgrenoj i radijskoj mreži. 5G paketna jezgrena arhitektura nudi nove, izvorno ugrađene mrežne funkcije i mogućnosti unutar tih funkcija. Na primjer, nove mogućnosti uključuju: rezanje mreže, odvajanje kontrole i korisničke ravnine (CUPS), virtualizaciju, automatizaciju, podršku za brzine od više gigabita u sekundi (Gbps) i ultra-pouzdanu komunikaciju niske latencije (URLLC). Rezultat toga jest da je 5G jezgrena mreža dizajnirana na način da u potpunosti iskoristi dodatni kapacitet (propusnost)

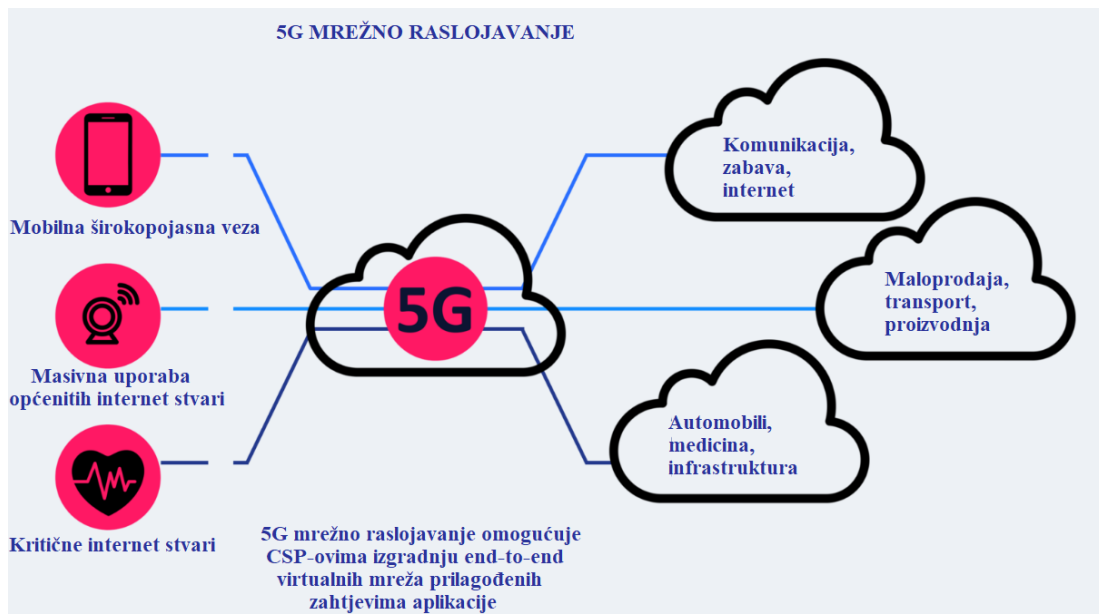
i smanjenu latenciju koju novi 5G radio (NR) može pružiti. [14] Prednosti SA 5G su smanjenje potrošnje energije i za mobilni uređaj i za cijelu mrežu, poboljšanje latencije i povećanje ograničenja propusnosti [15]



Slika 3.9. 5G samostalna arhitektura (SA) mreže [16]

### 3.4. Mrežno raslojavanje

Mrežno raslojavanje (eng. *network slicing*) je vrsta arhitekture virtualnog umrežavanja koje omogućava postojanje više logičkih „isječaka“ čije su funkcionalnosti optimizirane za određenu namjenu, a svi rade na jednoj fizičkoj jezgri unutar 5G mrežne infrastrukture (slika 3.10). Mrežno raslojavanje pripada grupi u kojoj se nalazi softverski definirano umrežavanje (eng. SDN - *Software-Defined Networking*) i virtualizacija mrežnih funkcija (eng. NFV - *Network Functions Virtualization*), to su dvije blisko povezane tehnologije mrežne virtualizacije koje pomiču moderne mreže prema automatizaciji temeljenoj na programskoj podršci. SDN i NFV daju puno bolju fleksibilnost mreže kroz podjelu mrežne arhitekture u virtualne elemente. Mrežno raslojavanje omogućuje stvaranje više virtualnih mreža na zajedničkoj fizičkoj infrastrukturi. To znači da se mreža može podijeliti na mnoge isječke, a jedan isječak mreže (eng. *slice*) je logička mreža koja posluhuje jednu aplikaciju ili jednog poslovnog korisnika. Svaki isječak se za korisnika ponaša kao zasebna mrežu s rezerviranom rezervom resursa. [10][17]

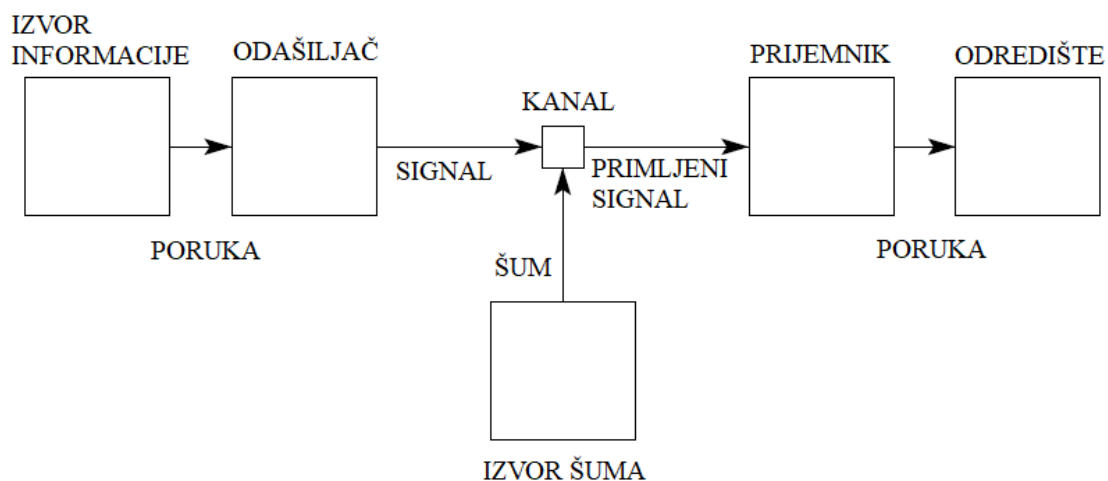


**Slika 3.10.** Prikaz raslojavanja 5G mreže [17]

## 4. KAPACITET MOBILNE MREŽE

### 4.1. Shannon – Hartley teorem

Godine 1948. C. E. Shannon objavio je rad „*A Mathematical Theory of Communication*“ – [18], kojim je postavio temelje teorije informacija, definirao je entropiju i pojam informacije kojoj je odredio mjernu veličinu. U radu se bavio komunikacijskim kanalima, vjerojatnostima pristiglih poruka na odredište, utjecajem šuma i smetnji na prijenos poruka - provodio je kriptografiju i pritom definirao osnove proračuna kapaciteta komunikacijskog kanala. Kroz rad i razna istraživanja Shannon je promatrao prijenose podataka kroz kanale na koje je utjecao šum ili određene smetnje koje su prouzročile greške pri prijenosu ili gubitak informacija. Definirao je matematički model komunikacijskog sustava koji se sastoji od izvora informacije, odašiljača, kanala, izvora šuma, prijavnika i odredišta – slika 4.1.



Slika 4.1. Shematski dijagram općeg komunikacijskog sustava [18]

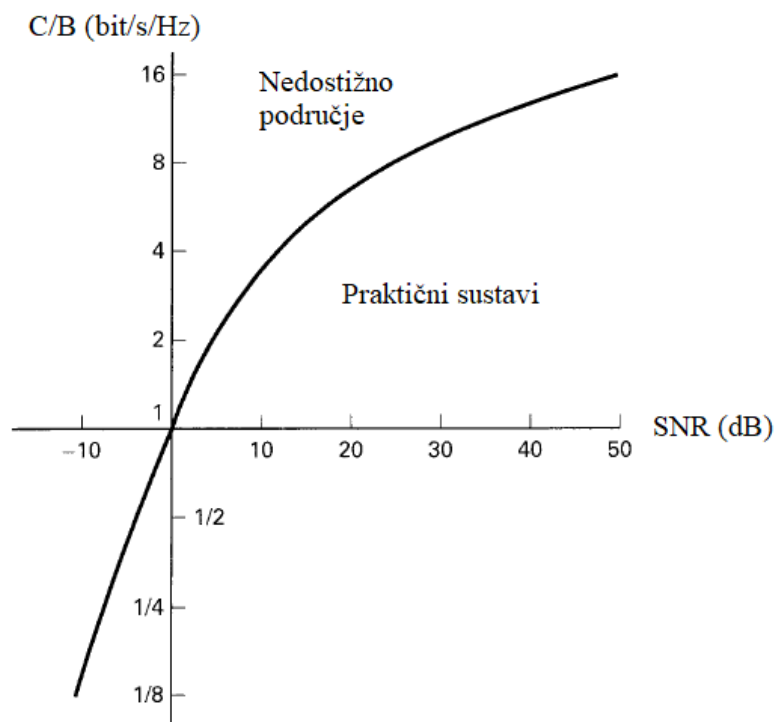
Izvor informacije stvara poruku ili niz informacija koji se predaju odašiljaču. Odašiljač prima poruku i pretvara je u signal, ali signal se (pre)oblikuje u oblik koji je prikladan za prijenos kroz kanal te ga odašilja kroz kanal. Kanal je medij koji se koristi za prijenos signala od odašiljača do prijavnika. Na kanal utječe izvor šuma koji donosi smetnje odnosno šum. Prijemnik prima signal i rekonstruira ga u poruku. Odredište je osoba ili uređaj kojoj je poruka namijenjena. Shannon kroz svoj rad propituje koliko i kako se može maksimalno iskoristiti kapacitet kanala uz što manju vjerojatnost greške u prijenosu informacija. Uz pomoću ranijih zapisa Hartley-a, Shannon je potvrdio kako je logaritamska funkcija najbolja za proračun kapaciteta komunikacijskih sustava te je definirao mjernu jedinicu za količinu informacije koju je nazvao bit. Proračunima vezanim za

teoriju informacija (vjerojatnosti događaja, entropija) dolazi do definiranja kapaciteta komunikacijskog kanala koji predstavlja maksimalnu brzinu prijenosa informacija kroz kanal. Shannon je definirao kapacitet kanala kod postojanja aditivnog bijelog Gaussovog šuma (eng. AWGN - *Additive White Gaussian Noise*) kao funkciju prosječne snage primljenog signala  $S$ , prosječne snage šuma  $N$  i širine frekvencijskog pojasa kanala  $B$ . Tako je dobiven teorem odnosno formula za kapacitet kanala.

$$C = B * \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (4-1)$$

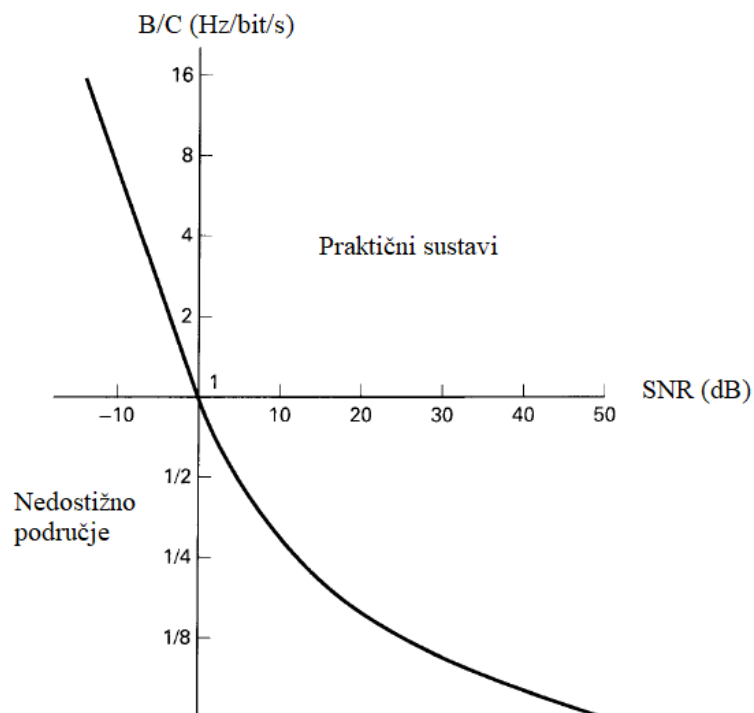
$C$  predstavlja kapacitet komunikacijskog kanala odnosno maksimalni mogući protok podataka kroz kanal u određenom vremenskom intervalu koji je izražen u bitima po sekundi (b/s). Što je veći kapacitet kanala to se veća količina podataka prenese u istome vremenskom intervalu.  $B$  predstavlja frekvencijski pojas kanala i izražen je u hercima (Hz).  $S/N$  je omjer snaga signala i šuma u komunikacijskom kanalu. Ako je  $S/N$  veći onda je signal bolji i jači u odnosu na šum pa je i izobličenje signala zbog šuma manje, a time je kvaliteta signala veća. Prema Shannon-ovoj teoriji i formuli što je veći  $S/N$  to je veći kapacitet pa protok podataka kroz kanal može biti veći. Povećanjem  $S/N$  povećava se kapacitet kanala, ali iznad određene granice povećanje kapaciteta s povećanjem  $S/N$  postaje vrlo malo zbog logaritamske ovisnosti ove dvije veličine. Nakon objave Shannon-ovog rada, Ralph Hartley je na temelju toga rada dodao teoreme o kapacitetu širokopoljanskih kanala. [18]

Teorija kaže da je moguće prenijeti informacije preko kanala kapaciteta  $C$  bilo kojom brzinom  $R$ , uz  $R \leq C$ , s proizvoljnom malom vjerojatnošću pogreške korištenjem dovoljno složene sheme kodiranja. U slučaju da je  $R > C$  tada nije moguće pronaći kod kojim bi se mogla postići dovoljno mala vjerojatnost pogreške. Shannon preko teorema dokazuje kako vrijednosti  $S$ ,  $N$  i  $B$  postavljaju granice brzine prijenosa, a ne vjerojatnosti pogreške. Pomoću formule kapaciteta kanala (4-1) se može definirati dijagram u kojoj se prikazati granica za dostižnu izvedbu u praktičnim realnim sustavima. Slika 4.2. prikazuje normalizirani kapacitet kanala  $C/B$  izraženo u bitovima/s/Hz kao funkciju omjera snage signala i snage šuma (SNR). [18]



Slika 4.2. Normalizirani kapacitet kanala u odnosu na SNR kanala

Sličan dijagram se nalazi na slici 4.3 koji prikazuje normaliziranu propusnost kanala  $B/C$  izraženo u Hz/bit/s kao funkcija SNR u kanalu. [19][20][21]



Slika 4.3. Normalizirana propusnost kanala u odnosu na SNR u kanalu

Pri korištenju dijagrama sa slike 4.3 treba imati na umu da je snaga šuma proporcionalna širini frekvencijskog pojasa kanala, B:

$$N = N_0 B, \quad (4-2)$$

Uvrštavanjem izraza (4-2) u formulu za kapacitet (4-1) dobije se izraz:

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N_0 B} \right), \quad (4-3)$$

Poseban je slučaj kada je brzina prijenosa R jednaka kapacitetu kanala C, tj.  $R = C$ , tada se može koristiti izraz:

$$\frac{S}{N_0 C} = \frac{E_b}{N_0} \quad (4-4)$$

$E_b/N_0$  je izraz koji se upotrebljava u digitalnim komunikacijama, normalizirana verzija SNR-a.  $E_b$  predstavlja energiju po bitu i predstavlja umnožak snage signala S i vremena trajanja jednog bita T.  $N_0$  predstavlja spektralnu gustoću snage šuma te se može opisati kao snaga šuma N koja je podijeljena širinom pojasa B. Što je veći  $E_b/N_0$ , to će sustav imati bolju performansu u prisustvu šuma i bit će potrebno manje energije za prijenos podataka. Ako se (4-4) uvrsti u (4-3) dobije se

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left[ 1 + \frac{E_b}{N_0} \left( \frac{C}{B} \right) \right], \quad (4-5)$$

$$2^{C/B} = 1 + \frac{E_b}{N_0} \left( \frac{C}{B} \right) \quad (4-6)$$

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{B}{C} (2^{C/B} - 1) \quad (4-7)$$

## 4.2. Shannon-ova granica

Kod određene vrijednosti  $E_b/N_0$  postoji granica ispod koje neće biti moguće postojanje komunikacije bez greške pri bilo kojoj brzini informacija. Koristeći identitet

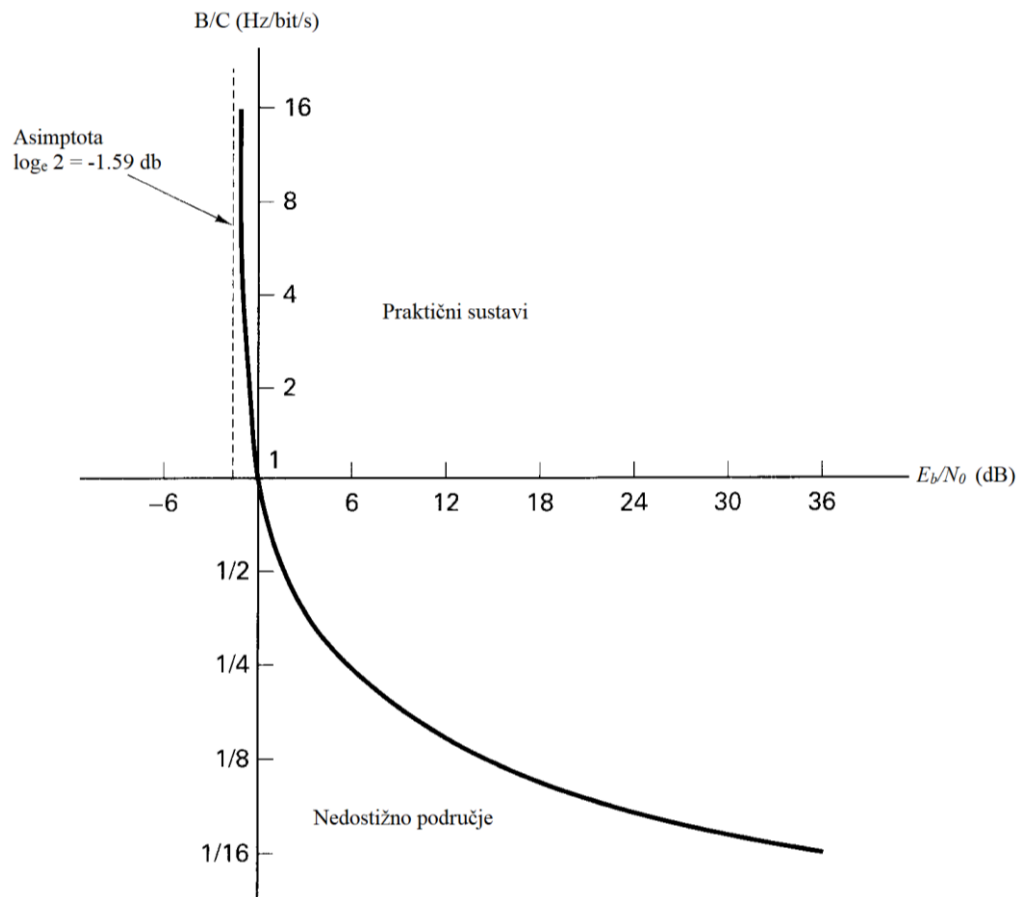
$$\lim_{x \rightarrow 0} (1 + x)^{1/x} = e \quad (4-8)$$

Primjenom (4-8) može se izračunati granica vrijednosti  $E_b/N_0$ , pri čemu se je x

$$x = \frac{E_b}{N_0} \left( \frac{C}{B} \right) \quad (4-9)$$



Slika 4.4 prikazuje dijagram B/C u odnosu na  $E_b/N_0$  koji je u skladu s formulom (4-5). Opisuje se asimptotsko ponašanje krivulje kada je krivulja  $C/B \rightarrow 0$  ili  $B/C \rightarrow \infty$



Slika 4.4. Normalizirana propusnost kanala u odnosu na kanal  $E_b/N_0$

Potom slijedi iz izraza (4-5)

$$\frac{C}{B} = x \log_2(1 + x)^{1/x} \quad (4-10)$$

Uvrštavanjem (4-9) u (4-10) slijedi

$$1 = \frac{E_b}{N_0} \log_2(1 + x)^{1/x} \quad (4-11).$$

Za granični slučaj  $C/B \rightarrow 0$ , primjenom (4-8) dobije se:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{\log_2 e} = 0.693 \quad (4-12)$$

odnosno u decibelima je to

$$\frac{E_b}{N_0} = -1.6 \text{ dB}. \quad (4-13)$$

Izraz (4-13) predstavlja Shannon-ovu granicu, koja se u praksi ona ne može postići. Shannon-ov rad je dao teoretski temelj i dokaz za postojanje kodova koji bi poboljšali performanse ili smanjili odnos snage signala i snaga šuma potreban za postizanje prijenosa informacije određenim kanalom. [19]

### 4.3. Proračun kapaciteta u 4G mreži

G. Basilashvilij u [22] analizira kapacitet u LTE mrežama i navodi da u skladu sa Shannon-Harley-vim teoremom postoji čvrsto ograničenje količine podataka koji se može prenijeti u određenoj propusnosti:

$$C \approx n * B * \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right), \quad (4-14)$$

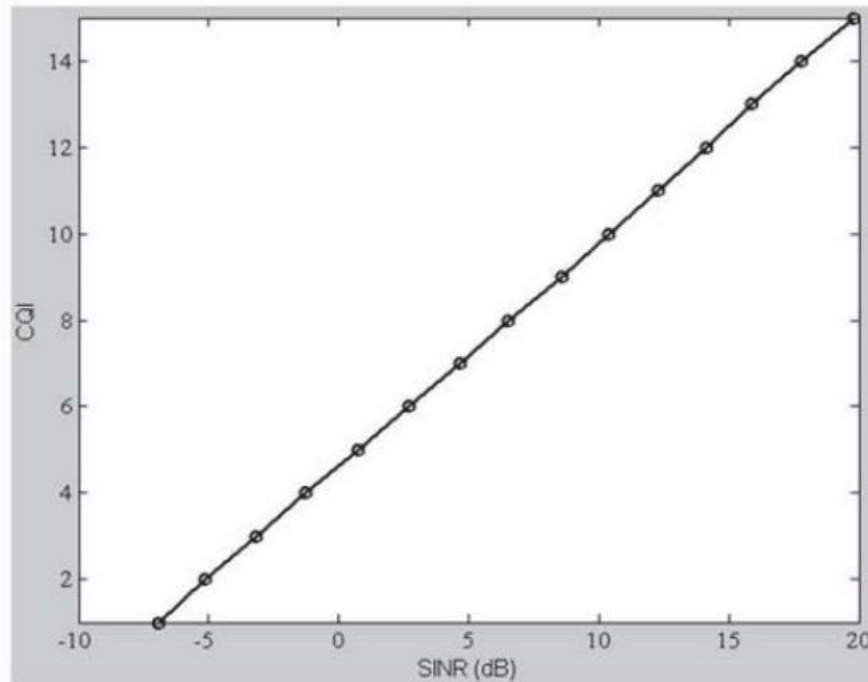
gdje C predstavlja kapacitet kanala (bit/s), n je broj odašiljačkih antena, B širina kanala te S/N koji predstavlja odnos signal/šum. Teorem definira maksimalnu brzinu kojoj se informacija može prenijeti preko komunikacijskog kanala (odnosno zračnog sučelja – 4G) određene propusnosti u prisutnosti šuma i smetnji. Može se uspostaviti granica za maksimalnu količinu informacija bez pogrešaka po vremenskoj jedinici koja se može prenijeti s određenom širinom pojasa u prisutnosti šuma, uz pretpostavku da je snaga signala ograničena i da Gaussov proces šuma karakterizira poznata spektralna gustoća snage.[22]

Drugi pokazatelj kvalitete signala, koji se može očitati iz formule (4-14), je omjer signala i šuma. Uobičajena praksa je koristiti SINR odnosno omjer signala i šuma i interferencije kao pokazatelj kvalitete mreže. Okvirno u signalizacijskoj mreži procjena SINR-a je temeljan na signalima sinkronizacije (eng. PSS/SSS - *Primary Synchronization Signal / Secondary Synchronization Signal*) što rezultira različitim SINR-om od procijenjenog SINR-a koji je temeljen na referentnim signalima. Prema [22] prosječni SINR podnosioca se može odrediti na sljedeći način:

$$SINR = \frac{RSRP}{(I+N)} \quad (4-15)$$

gdje N označava snagu toplinskog šuma, a I predstavlja prosječnu snagu smetnje. RSRP je mjera koja se upotrebljava za procjenu jakosti signala koji stiže od bazne stanice. RSRP, zajedno sa SINR i drugim mjerenjima, pomaže kod donošenja odluke o pristupu mreži, prelasku s ćelije na ćeliju i slično. Pri mjerenju se sve veličine mjere preko istog frekvencijsko pojasa te se normaliziraju na širinu pojasa jednog podnosioca. U OFDM-u se često pretpostavlja da je interferencija vlastite stanice zanemariva i prema tome interferenciji doprinosi samo interferencija od druge ćelije. ]

Treća veličina koja prikazuje kvalitetu mreže je indikator kvalitete kanala CQI. CQI sadrži informacije koje korisnička oprema UE šalje uzlaznom putanjom do eNB-a koji je pokazatelj kvalitete primljenog kanala. Trenutni SINR, koji je izračunat na korisničkoj opremi UE, se preslikava u CQI vrijednosti te se taj proces naziva preslikavanje SINR u CQI. Na slici 4.5. je prikazan preslikavanje SINR u CQI s pragom za BLER (eng. *Block Error Rate*) od 10%. Unutar BLER praga, svaka CQI vrijednost odgovara određenom indeksu sheme modulacije i kodiranja MCS.[22]



**Slika 4.5.** SINR u CQI preslikavanje s 10% BLER(eng. Block Error Rate) pragom [22]

Na temelju poznatog MSC-a može se izračunati brzina prijenosa podataka za korisnika. Na temelju podataka brzine prijenosa može se odrediti učinkovitost svakog RE. Tablica 4.1. prikazuje odgovarajući MCS i učinkovitost, u ovom slučaju izraženu u bitovima/RE, svake CQI kategorije za 10% BLER praga. PRB koji koristi normalni ciklički prefiks sadrži 168 resursnih elemenata (RE). Pod pretpostavkom da PRB ima 148 elemenata resursa za 10% BLER prag i 20 RE se koristi za potrebe upravljanja i signalizacije, trenutna brzina podataka može se izračunati na temelju tablice 4.1. i ukupnog broja RE-ova specificiranih za prijenos podataka silaznom vezom. Trenutna brzina prijenosa podataka svakog korisnika,  $R(t)$ , može se izračunati na sljedeći način:

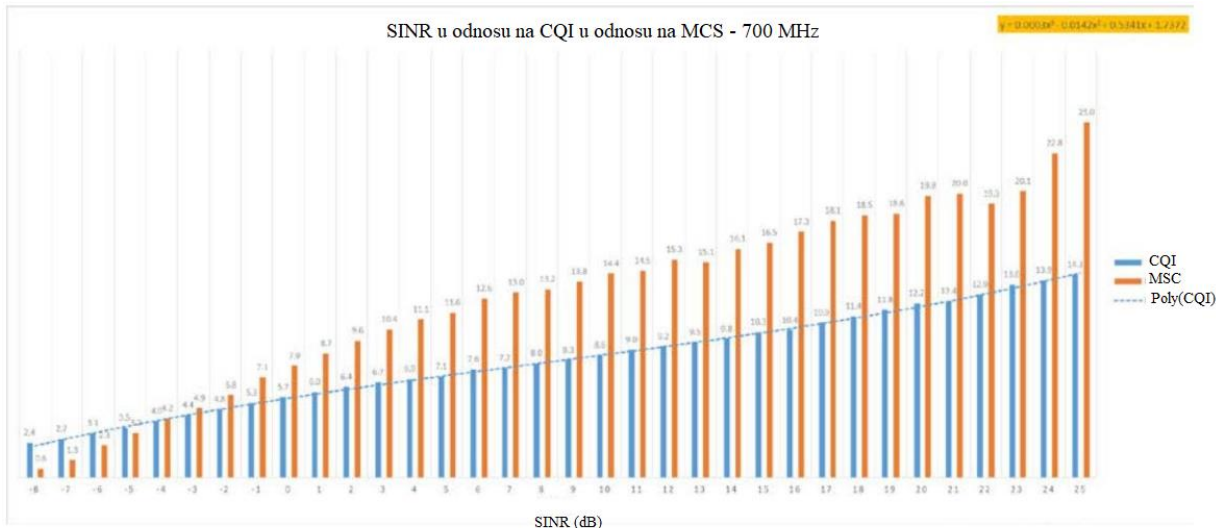
$$R(t) = Ef(t) * \frac{RE}{TTI} \quad (4-16)$$

R je trenutna brzina prijenosa podataka u trenutku t, Ef je spektralna učinkovitost prema tablici 4.1 u trenutku t, RE je ukupan broj RE-ova specificiranih za prijenos podataka s izlaznom vezom, a TTI (vremenski interval prijenosa) predstavlja trenutni interval raspoređivanja i iznosi 1 ms. [22]

**Tablica 4.1.** CQI tablica za pretraživanje uzimajući u obzir 10% BLER praga [22]

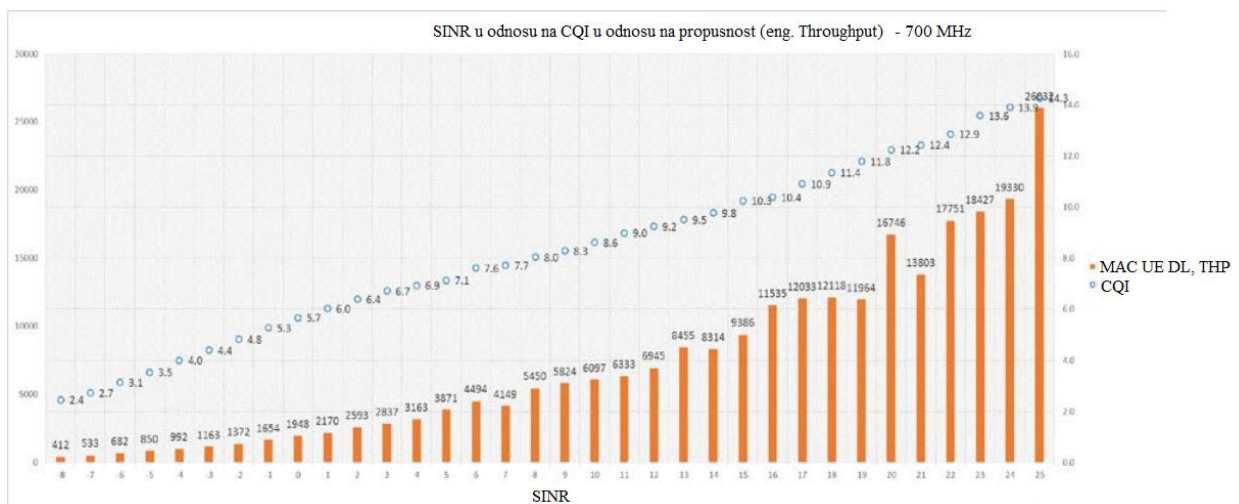
CQI	Raspon SINR (dB)	MCS		Učinkovitost (bits/RE)
		Modulacija	Približna brzina koda	
0	$SINR < -6.936$	Izvan raspona	--	--
1	$-6.936 \leq SINR < -5.146$	QPSK	0.0762	0.1523
2	$-5.147 \leq SINR < -3.18$	QPSK	0.1172	0.2344
3	$-3.18 \leq SINR < -1.253$	QPSK	0.1885	0.3770
4	$-1.253 \leq SINR < 0.761$	QPSK	0.3008	0.6016
5	$0.761 \leq SINR < 2.699$	QPSK	0.4385	0.8770
6	$2.699 \leq SINR < 4.694$	QPSK	0.5879	1.1758
7	$4.694 \leq SINR < 6.525$	16 QAM	0.3691	1.4766
8	$6.525 \leq SINR < 8.573$	16 QAM	0.4785	1.9141
9	$8.573 \leq SINR < 10.366$	16 QAM	0.6016	2.4063
10	$10.366 \leq SINR < 12.289$	64 QAM	0.4551	2.7305
11	$12.289 \leq SINR < 14.173$	64 QAM	0.5537	3.3223
12	$14.173 \leq SINR < 15.888$	64 QAM	0.6504	3.9023
13	$15.888 \leq SINR < 17.814$	64 QAM	0.7539	4.5234
14	$17.814 \leq SINR < 19.829$	64 QAM	0.8525	5.1152
15	$SINR \geq 19.829$	64 QAM	0.9258	5.5547

Slika 4.6. prikazuje korelaciju SINR, CQI i MCS indeksa za kanal od 10 MHz na pojasu od 700 MHz. Točkasta linija predstavlja funkciju odnosa SINR i CQI koja je izražena polinomskom jednadžbom trećeg reda, gdje se može jasno vidjeti izravna korelacija između SINR i CQI – što je bolji SINR na silaznoj vezi to je bolji CQI prijavljen od strane korisničke opreme UE. Shodno tome što je veća vrijednosti CQI-a to je viši MCS indeks koji je odabran od strane entiteta za prilagodbu veze eNB-a. [22]



Slika 4.6. SINR-CQI-MCS korelacija [22]

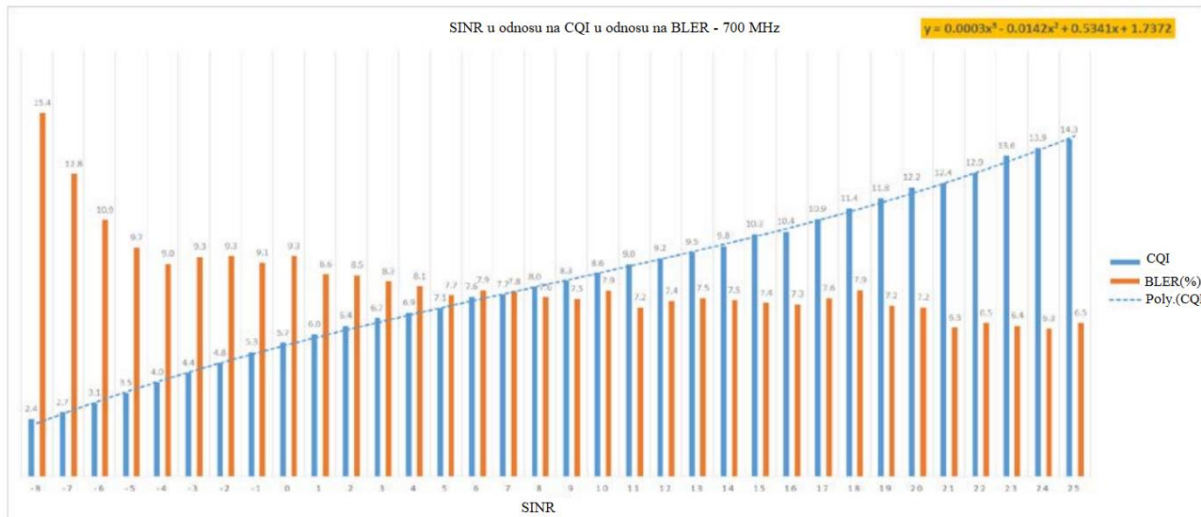
Nadalje, slika 4.7. prikazuje SINR, CQI i DL UE korelaciju propusnosti za isti kanal od 700 MHz. Pokazuje se stupanj povećanja propusnosti UE, tj. broj odaslanih bitova u sekundi, u skladu s poboljšanjem kvalitete signala. Isto tako potrebno je spomenuti da zadane vrijednosti propusnosti također ovise o opterećenju ćelije. Što je veći broj aktivnih UE-ova u ćeliji, manja je propusnost. [22]



Slika 4.7. SINR - CQI - UE propusnost (Kbps) korelacija [22]

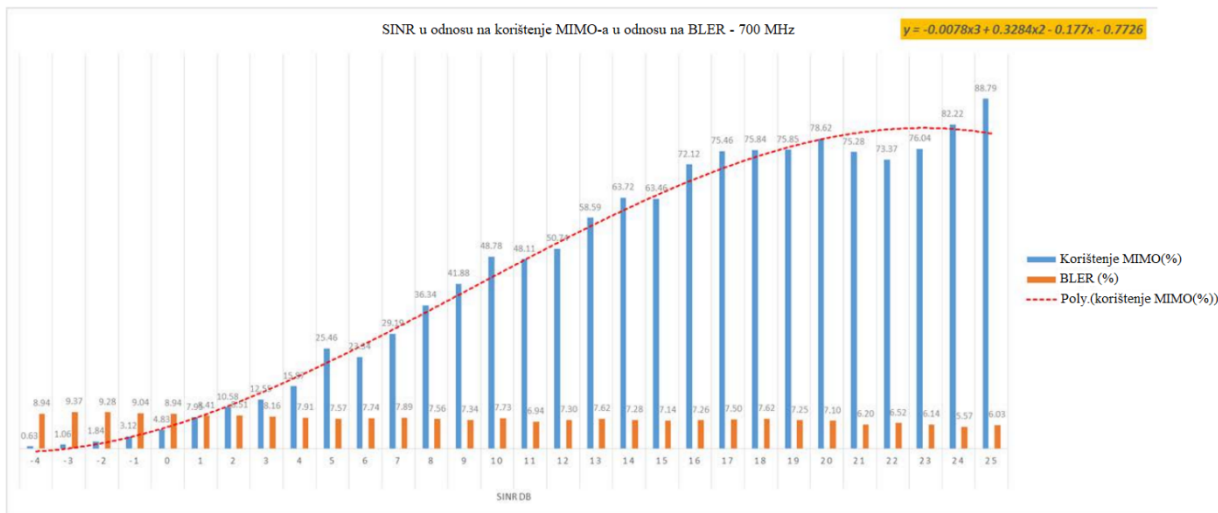
Slika 4.8. prikazuje korelaciju SINR, CQI i BLER (stopa blok grešaka) za isti kanal od 700 MHz. Na grafu se pokazuje konzervativni i zaštitni rad mehanizma prilagodbe veze eNB-a što se objašnjava BLER vrijednostima koje su manje od 10%. BLER vrijednost je oko 6,2% pri 21 dB

SINR. Postoji nepotrebna redundancija u procesu kodiranja kanala – zaštitni bitovi koji smanjuju efektivnu brzinu kodiranja i broj stvarnih podatkovnih bitova. Potrebno je spomenuti da se na ovu funkciju mehanizma prilagodbe veze, u većini slučajeva, ne može utjecati promjenom parametara, već ona ovisi o internim postavkama i algoritmima koje su razvili dobavljači opreme. [22]



Slika 4.8. CQI i BLER u odnosu na SINR [22]

Postoji još jedna komponenta koja može utjecati na kvalitetu mreže, a to je broj prostornih slojeva u MIMO sustavu. Slika 4.9. prikazuje korelaciju korištenja SINR, CQI i MIMO prostornog multipleksiranja za isti kanal od 700 MHz. Točkasta linija predstavlja odnos funkcije SINR-a prema MIMO korištenju (RI-2 predstavlja indikator ranga 2 koji označava 2 prostorna sloja) izraženu polinomskom jednačbom trećeg reda, iz toga se vidi da je izravna korelacija između SINR-a i MIMO-a – što je bolji SINR na DL-u, veća je iskorištenost MIMO RI-2. Povećanjem broja prostornih slojeva značajno povećavamo broj prenesenih informacijskih bitova što zauzvrat poboljšava propusnost sustava i spektralnu učinkovitost. [22]



Slika 4.9. BLER i postotak MIMO korištenja u odnosu na SINR [22]

U [22] autor zaključuje da je SINR vrlo važan pokazatelj kao mjera kvalitete mreže. Na temelju SINR-a, UE izračunava CQI vrijednost koja se prijavljuje natrag LTE baznoj stanici, a zatim eNB-ov entitet za prilagodbu veze odabire relevantni MCS indeks koji se preslikava na odgovarajuću brzinu prijenosa na silaznoj vezi. Što se više bitova prenese po vremenskom intervalu prijenosa, veća je propusnost sustava i bolja je spektralna učinkovitost. No isto tako važna komponenta koja utječe na kvalitetu mreže je MIMO i korištenje njegovih prostornih slojeva. Odnosno broj odašiljačkih antena koji značajno povećava količinu odaslanih informacijskih bitova po TTI-u, čime se značajno povećava spektralna učinkovitost. [22]

#### 4.3.1. Maksimalni kapacitet 4G ćelije

Kao što je ranije objašnjeno, 4G sustav ima fleksibilnu širinu frekvencijskog pojasa, koja sa povećanjem doprinosi povećanju kapaciteta kanala. U 4G-u jedan resursni blok (RB) ima 180kHz, dok 4G sustav od 20MHz ima 100 resursnih blokova. Broj resursnih blokova se smanjuje kako se smanjuje širina pojasa kanala. U sustavima, bez obzira na koji sustav, propusnost se izračunava kao broj simbola po sekundi nakon čega se pretvara u bitove po sekundi ovisno o tome koliko bitova simbol može nositi. Za primjer se može promotriti 4G sustav čija je širina kanala 20 MHz i FDD načinom rada. Kako u sustavu ima 100 resursnih blokova i tada svaki resursni blok ima  $12 \cdot 7 \cdot 2 = 168$  simbola/ms, ali u slučaju normalnog cikličkog prefiksa. Što znači da ima 16800 simbola/ms odnosno 16,8 Msps (milijun simbola po sekundi). Na primjer da se koristi modulacija 64-QAM, tada bi propusnost bila  $16,8 \cdot 6 = 100,8$  Mbps za jedan priključak antene. Ako se koristi

2×2 MIMO sustav tada bi protok bio duplo veći ( $100,8 \times 2 = 201,6$  Mbps), dok će sa 4×4 MIMO sustavom protok biti  $100,8 \times 4 = 403,2$  Mbps. Na neto protokol utječu referentni signali za kontrolu i signalizaciju, PSS/SSS i ostali, koji čine 25% podatkovnog prijenosa, te time smanjuju efektivnu propusnost za 25%. [23]

U uzlaznoj vezi postoji samo jedan put prijenosa do korisničkog uređaja te se ne ostvaruje prednost koju donosi MIMO. Kao što je gore navedeno sa 20 MHz širine kanala dobije se maksimalni kapacitet od 100,8 Mbps, nakon čega se uvodi 25% smanjenja zbog prijenosa podataka za kontrolu i signalizaciju te se dobiva 75 Mbps u uzlaznoj vezi. Kako postoje određena ograničenja u uzlaznoj vezi uz modulaciju, dobiva se propusnost od 75 Mbps ako je korištena 64-QAM modulacija. Neka korisnička oprema podržava 16-QAM kao maksimalnu modulaciju u izlaznoj vezi, dok većina eNodeB podržava 64-QAM u uzlaznoj vezi. [23]

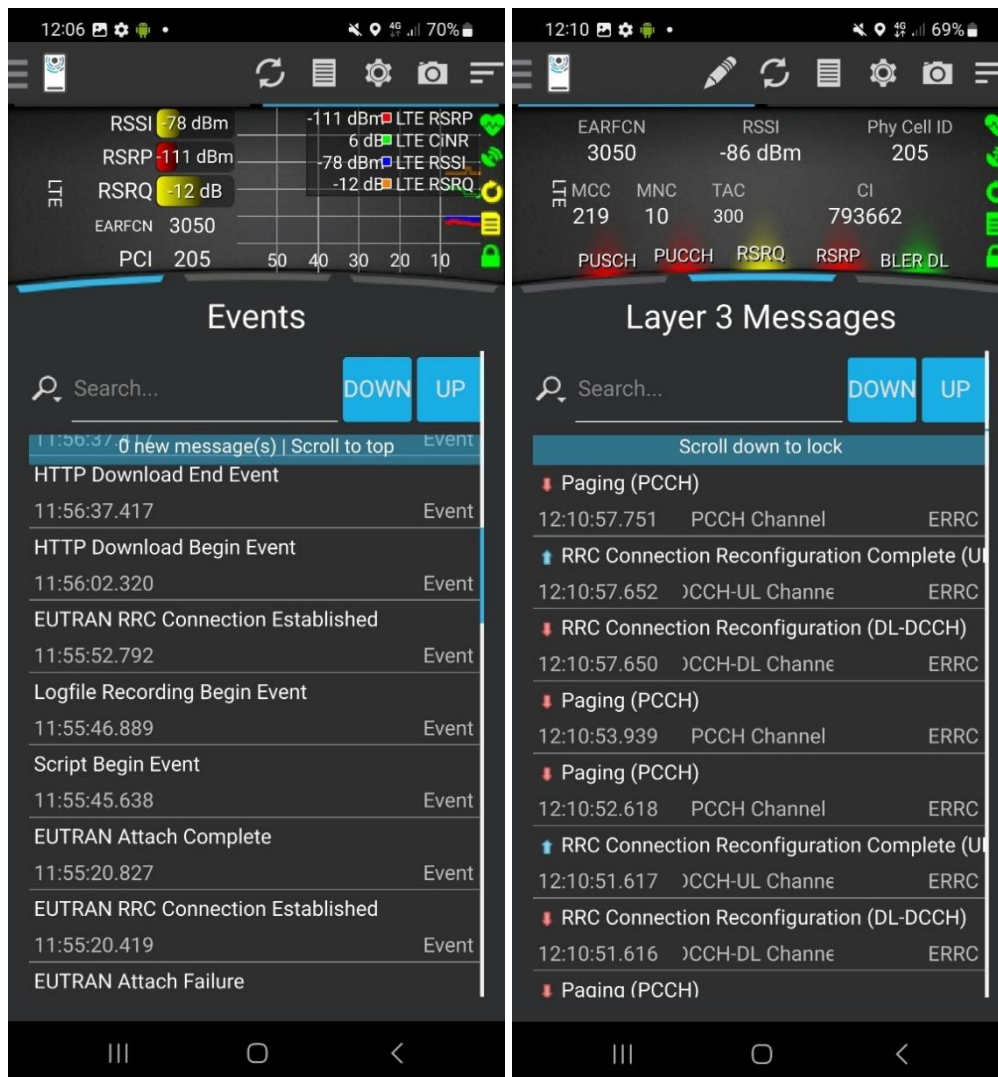


## 5. MJERENJE PROPUSNOSTI U 4G I 5G MREŽI

U praktičnom dijelu rada je provedeno mjerenja SINR vrijednosti na radijskom sučelju uz mjerenje brzine prijenosa podataka u 4G/5G mobilnom komunikacijskom sustavu. Mjerenje je provedeno u silaznoj vezi (eng. *downlink*). Oprema koja je korištena za mjerenje je 4G SIM kartica, 5G mobilni uređaj, 5G SIM kartica, mobilna aplikacija TEMS Pocket 25 (slika 5.1.), te softverski alat i platforma TEMS Discovery 25.0.3.

TEMS Discovery je softverski alat i platforma koja se koristi za testiranje, analizu i optimizaciju mobilnih mreža, posebno 2G, 3G, 4G (LTE) i 5G mreža. Platformu je razvila tvrtka Infovista, a koristi se širom svijeta od strane operatora mobilnih mreža, inženjera za mrežnu optimizaciju i drugih profesionalaca u telekomunikacijskoj industriji. [24] [25]

TEMS™ Pocket je mobilna aplikacija za testiranje mobilne mreže temeljeno na telefonu s podrškom za 4G/5G uređaje i skenere. Omogućuje provjeru, optimizaciju i rješavanje problema s mobilnom mrežom u okruženjima koja zahtijevaju prenosivost, kao što su trgovački centri, stadioni, uredi i područja s ograničenim pristupom gdje je testiranje dronom najbolji pristup. [26][24]

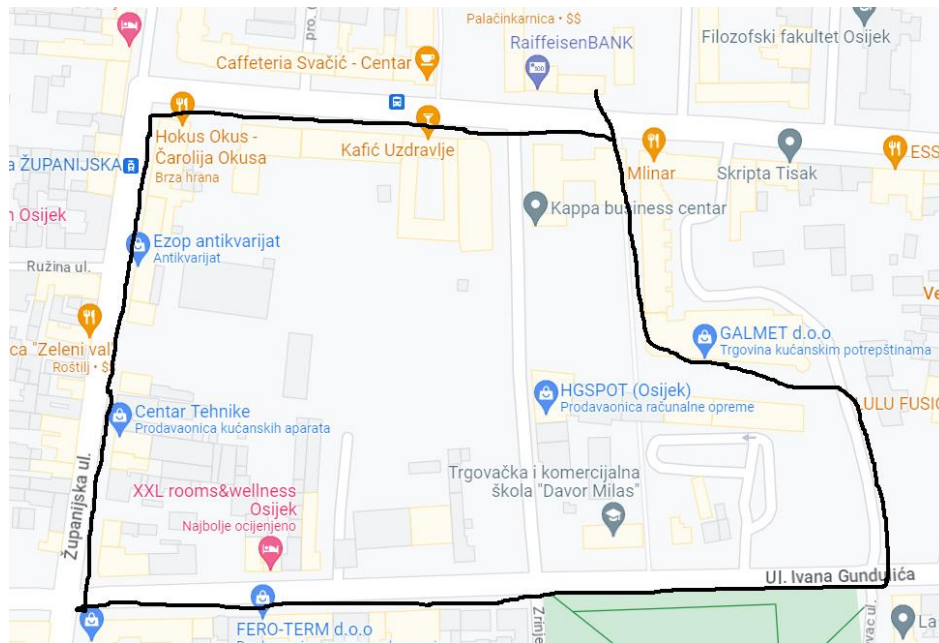


Slika 5.1. Prikaz zaslona TEMS Pocket-a

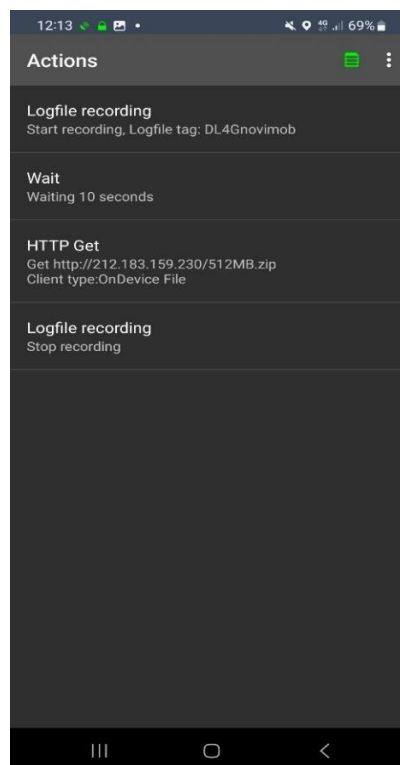
## 5.1. Mjerenje SINR-a i propusnosti u 4G mreži

Mjerenje u 4G mreži je provedeno na način da je uključena aplikacija TEMS Pocket, nakon čega je određena ruta kroz grad gdje će se mjerenje odvijati, koja se nalazi na slici 5.2. Zatim se unutar aplikacije pokreće skripta koja izvršava preuzimanje (eng. *Download*) HTTP testne datoteke veličine 512 MB. U aplikaciji se četiri akcije izvršavaju kontinuirano dok je skripta uključena (slika 5.3.). Prva akcija je *Logfile recording* koja pokreće snimanje podataka (RSSI, RSRP, RSRQ, SINR) koji će se pojaviti kada se datoteka počinje preuzimati. Nakon toga se događa akcija broj dva koja se naziva Čekanje odnosno *Wait* gdje se pričekava 10 sekundi radi pokretanja snimanja i prije preuzimanja datoteke kako ne bi došlo do pogreške. Potom se događa treća akcija HTTP Get koja preuzima testnu datoteku. Kada se testna datoteka preuzme zaustavlja se snimanje odnosno

*Logfile recording.* Nakon zaustavljanja snimanja skripta se ponovno samostalno pokreće i ponovo kreće od prve sve do zadnje akcije.



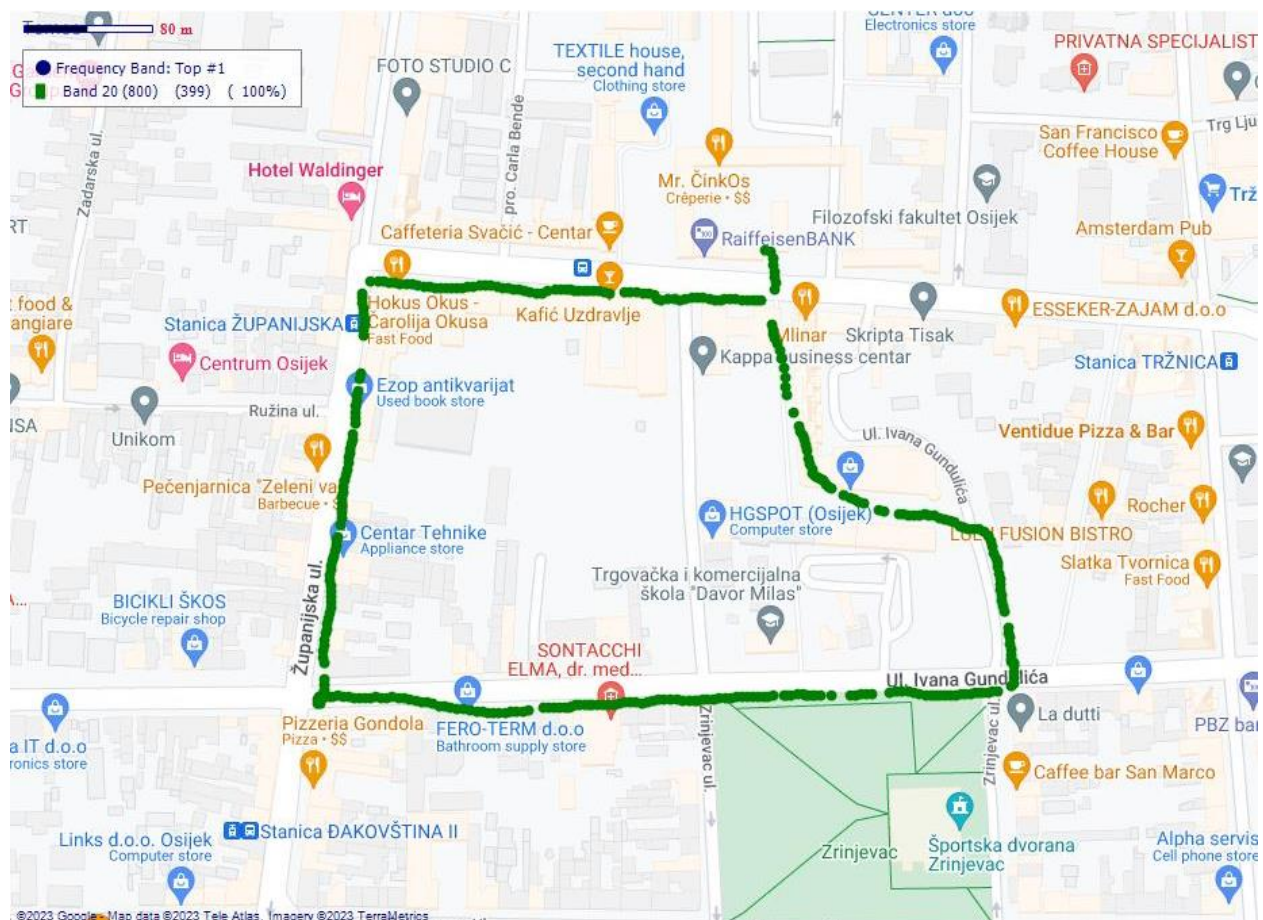
Slika 5.2. Ruta mjerenja



Slika 5.3. Akcije koje se provode u skripti

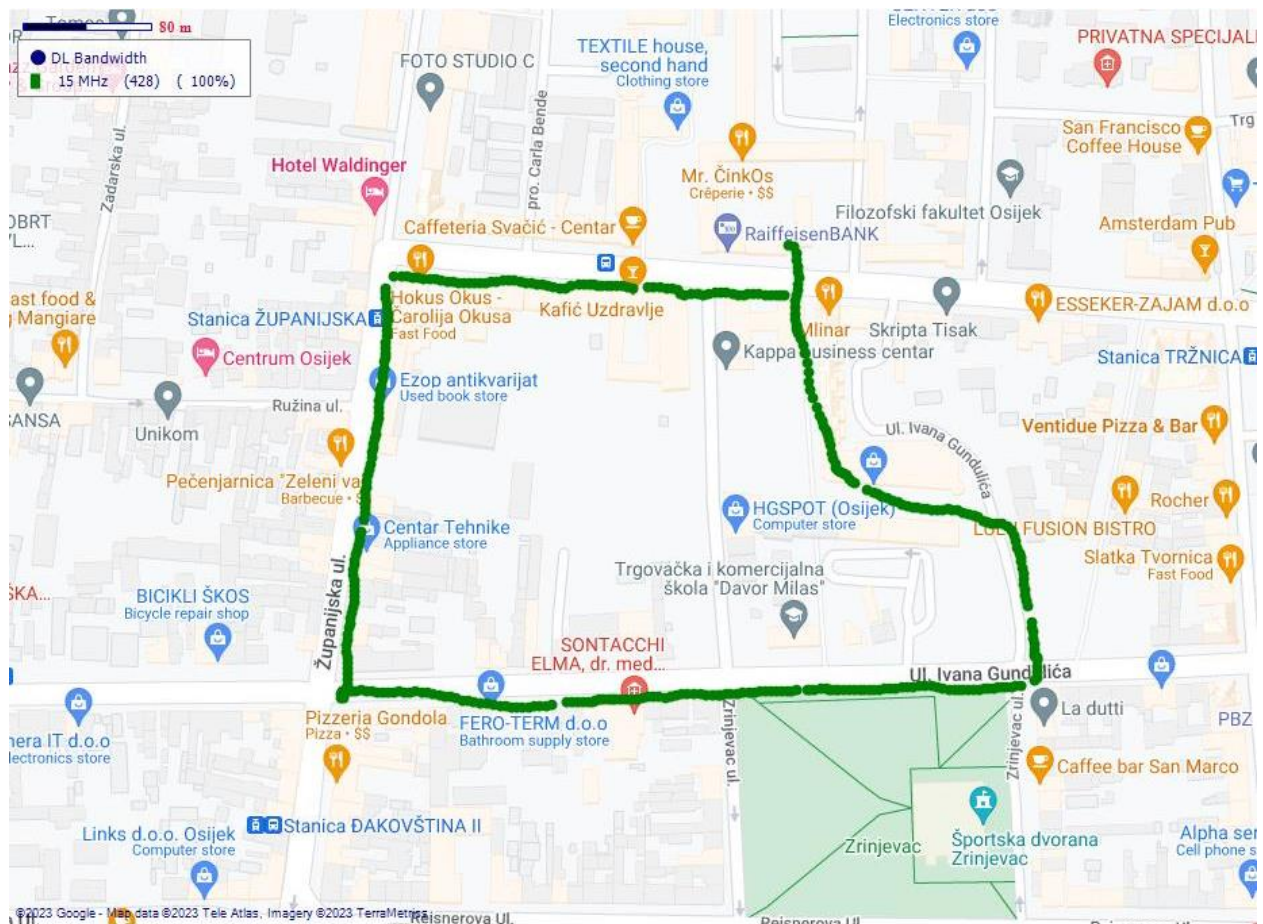
Nakon zaustavljanja mjerenja u Logfile-ove su spremljeni svi izmjereni rezultati te su Logfile-ove prebačeni s mobitela na računalo. Logfile-ovi koji su se nalazi u TEMS Pocket-u se uvoze u TEMS Discovery 25.0.3 gdje je napravljena analiza za SINR, propusnost (eng. *throughput*), širinu kanala (eng. *bandwidth*) te frekvencijski opseg (eng. *band*).

Slika 5.4. prikazuje izmjerene vrijednosti frekvencijskog opsega koji je mreža dodijelila vezi na kojoj su provedena mjerenja. Tijekom cijelog mjerenja korišteni frekvencijski opseg je bio 800 MHz.



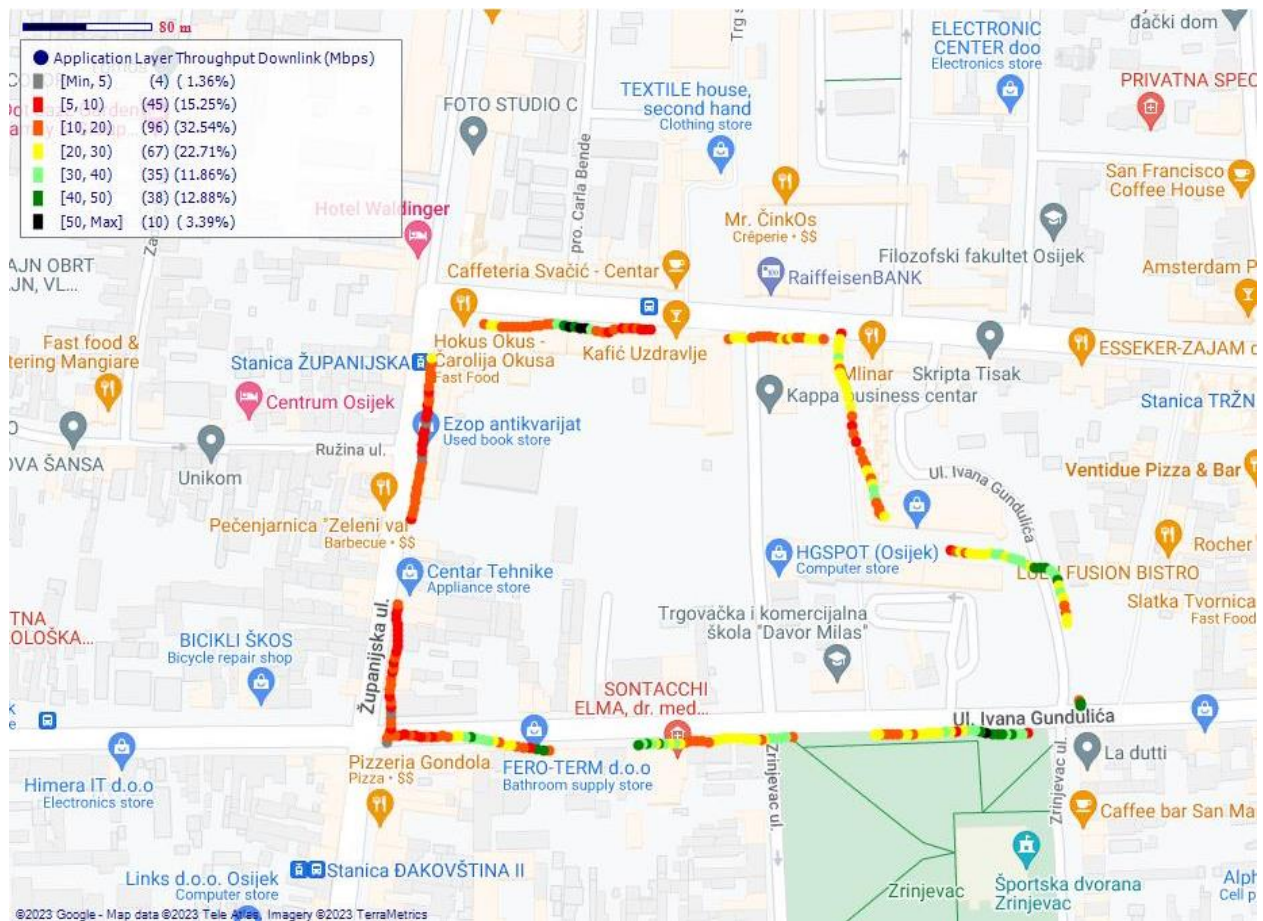
Slika 5.4. Frekvencijski opseg u 4G mreži

Slika 5.5. prikazuje koja je širina kanala korištena u silaznoj vezi u svakoj od točaka u kojima su provedena mjerenja iznosila 15MHz.



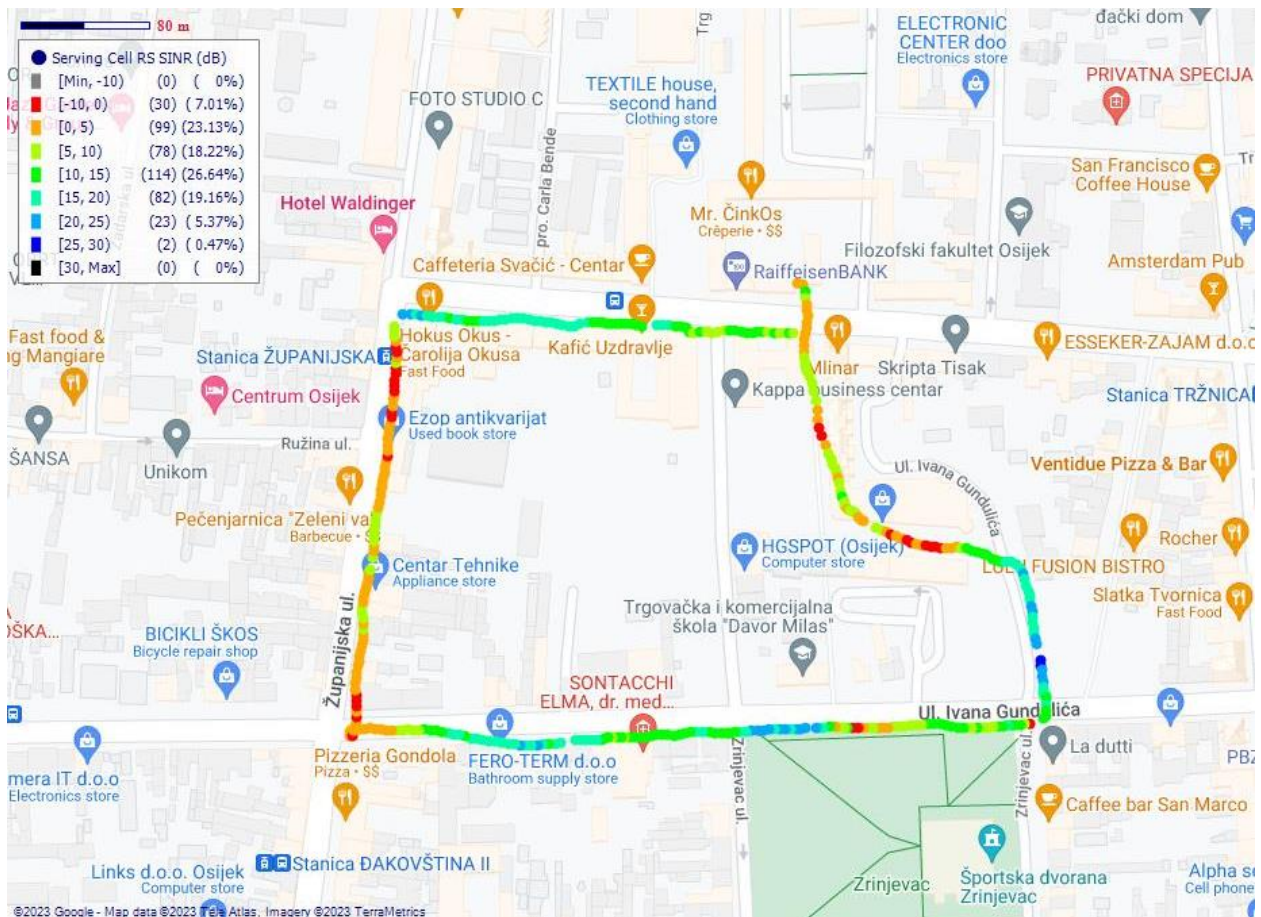
Slika 5.5. Širina kanala u silaznoj vezi u 4G mreži

Slika 5.6. prikazuje izmjerene vrijednosti propusnosti. U gornjem lijevom kutu slike nalazi se legenda koja pokazuje vezu boja korištenih za prikaz i vrijednosti propusnosti koju prikazuju. Tu je prikazan i broj točaka te postotak točaka na kojima je izmjerena propusnost u rasponu koji prikazuje pojedina boja. Može se vidjeti da najmanju propusnost (manju od 5Mb/s) je imao samo 1,36% točaka, propusnost veću od 50 Mb/s 3,39% točaka, a najveći broj točaka (96 što je 32,54%) je imao propusnost između 10 i 20 Mb/s. Na slici 5.6. postoje područja koja nemaju označene izmjerene vrijednosti što se može objasniti time što unutar skripte koja pokreće DL file-a ima Wait akcija koja stvara period čekanja od 10 sekundi kako bi se Logfile pokrenuo i započeo s mjerenjem i preuzimanjem testne datoteke. Postoji više takvih mjesta gdje nema uzoraka jer se akcija Wait ponavlja kod svake iteracije.



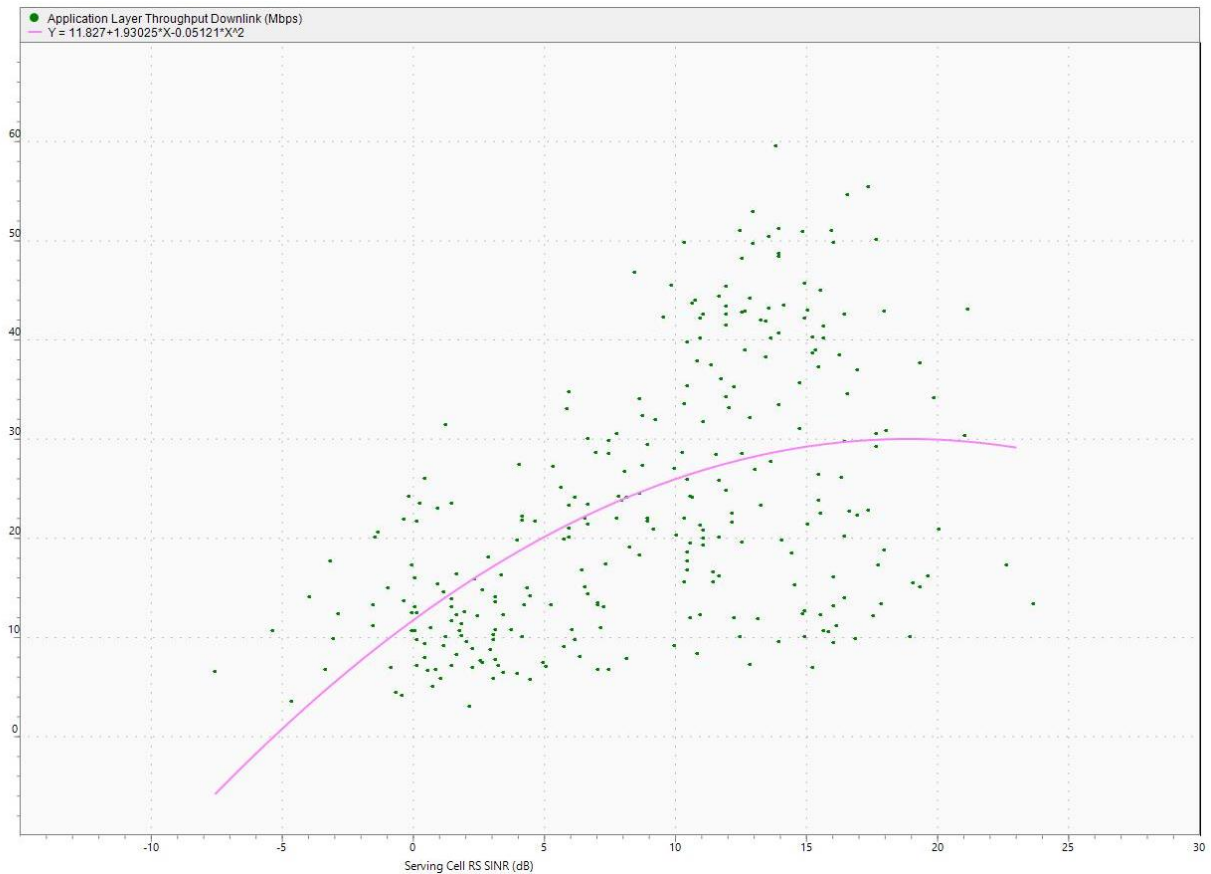
Slika 5.6. Vrijednosti propusnosti silazne veze u 4G mreži

Slika 5.7. prikazuje kroz cijelu rutu, vrijednost signala RS SINR-a ćelije na koju je spojen mjerni UE tijekom preuzimanja testne datoteke. RS predstavlja referentne signale (eng. RS – *Reference Signal*) koji se nalaze u trenutnoj uslužnoj ćeliji (eng. *Serving Cell*). Vrijednost *Serving Cell RS SINR* predstavlja mjeru kvalitete primljenih referentnih signala u uslužnoj ćeliji, koja je važna za procjenu ukupne kvalitete komunikacije u danom trenutku. Prema legendi slike može se vidjeti kako najčešća vrijednost *Serving Cell RS SINR* koja se pojavljuje je između 10 i 15 dB (na 26,64% točaka). Vrijednosti SINR-a iznad 10 dB ukazuju na dobar prijem signala te na visoku kvalitetu komunikacije (prema tablici 4.1 za SINR iznad 10 dB sustav prebacuje modulaciju na 64QAM). Kada je lošiji prijem signala i lošija kvaliteta signala tada se mobilni uređaj može prebaciti na drugu ćeliju s boljim SINR-om ili prilagoditi parametre komunikacije u smislu modulacije otpornije na šum i zaštitnog kodiranja s većim omjerom koda, što zajedno smanjuje propusnost, ali osigurava pouzdanu komunikaciju. To je u skladu s Shannon-Hartley-ovom formulom prema kojoj vrijedi da što je SINR veći to je veći kapacitet kanala  $C$ .



Slika 5.7. Izmjerene vrijednosti RS SINR u 4G mreži

Na temelju rezultata mjerenja napravljen je graf korelacije između SINR-a i propusnosti (slika 5.8.). Graf je dobiven iz TEMS Discovery 25.0.3. Omjer izmjerenih vrijednosti SINR-a i propusnosti treba dati krivulju koja potvrđuje Shannon-Hartley-ev teorem. Zelene točke predstavljaju izmjerene propusnosti i SINR, dok krivulja prikazuje aproksimaciju ovisnosti propusnosti o SINR-u. Prema krivulji se može zaključiti da što je veći SINR-er, to je veća propusnost, ali rasipanje izmjerenih vrijednosti oko aproksimacijske krivulje je veliko. Razlog tomu najvjerojatnije leži u opterećenosti mreže što uzrokuje variranje broja resursnih blokova koji bazna stanica dodjeljuje mjernom uređaju od točke do točke. U tom slučaju propusnost za dani uređaj ne ovisi samo o SINR-u, već ovisi i o broju resursnih blokova koje UE trenutno koristi.



**Slika 5.8.** Graf korelacije između SINR-a i propusnosti u 4G mreži

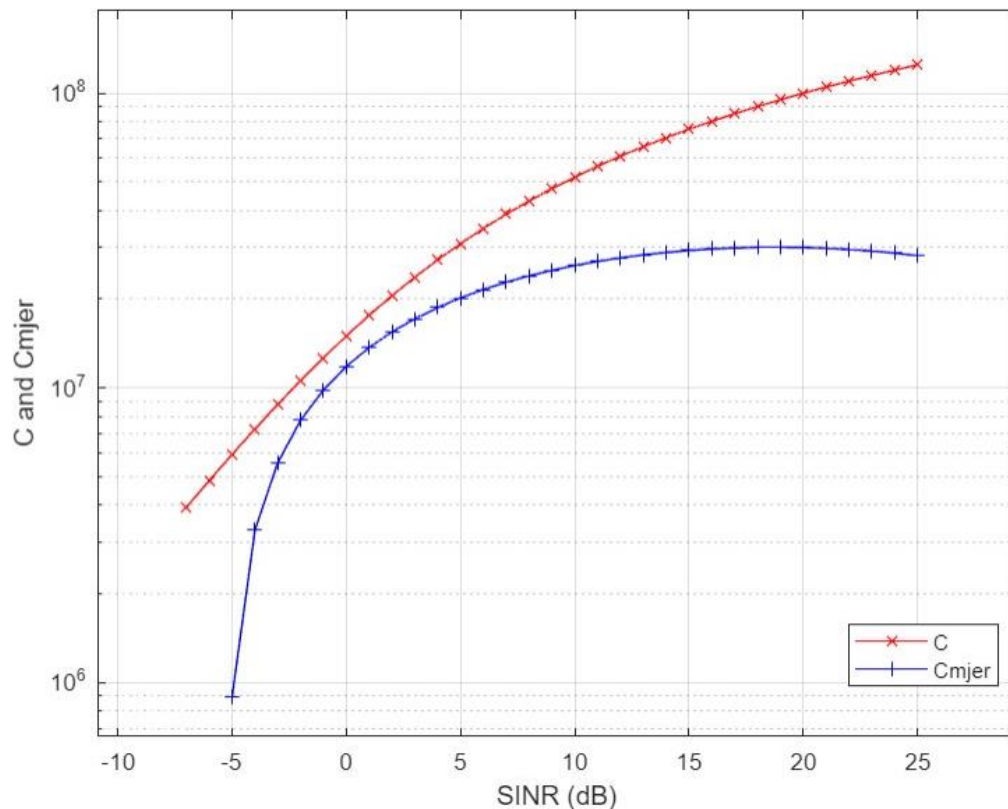
Slika 5.9. prikazuje graf koji ilustrira vrijednosti kapaciteta u odnosu na SINR. Na grafu se nalaze dvije krivulje. Crvena krivulja, odnosno prema legendi C, predstavlja kapacitet koji je dobiven pomoću Shannon-Hartley-eve formule (4-14), pri čemu je u proračunu korištena izmjerena vrijednost za  $B=15$  MHz, dok je broj antena  $n$  postavljen na 1 jer taj podatak se nije mjerio. Plava krivulja, označena kao  $C_{mjer}$ , predstavlja aproksimaciju kapaciteta koji je dobiven na temelju izmjerenih rezultata, odnosno pomoću formule (slika 5.8):

$$C_{mjer} = Y = 11,827 + 1,93026 * X - 0,05121 * X^2$$

gdje  $Y$  predstavlja aproksimaciju kapaciteta na temelju mjerenja, a  $X$  označava SINR izražen u decibelima. Za proračun je odabrana vrijednost SINR-a između -7 do 25 dB što odgovara rasponu vrijednosti SINR koje su dobivene mjerenjem. Na slici 5.8. može se vidjeti da je teorijski kapacitet  $C$  veći za sve vrijednosti SINR-a od vrijednosti  $C_{mjer}$ . Promatrajući graf vidi se kako je krivulja  $C$  većih vrijednosti za razliku od krivulje  $C_{mjer}$ , pri čemu su vrijednosti krivulja  $C$  i  $C_{mjer}$  najbliže jedna drugoj kada je SINR između vrijednosti 0 i 5. Za vrlo male vrijednosti SINR-a i vrijednosti SINR-a veće od 5 dB razlike prosječno izmjerene vrijednosti propusnosti u 4G mreži ( $C_{mjer}$ ) su



značajno manje od teorijskog maksimuma ( $C$ ). Međutim ako se pogledaju rezultati mjerenja na slici 5.8., može se vidjeti da su izmjerene vrijednosti propusnosti raspršene oko aproksimacijske krivulje te da su neke i do dva puta veće od aproksimacije za isti SINR. Uzimajući to u obzir, može se reći da u dobrim uvjetima propagacije signala i manje opterećenosti mreže, propusnost mreže se u dobroj mjeri približava teorijskom kapacitetu.



**Slika 5.9.** Grafički prikaz teorijske vrijednosti kapaciteta,  $C$ , prema Shannonovoj formuli i aproksimacijske krivulje,  $C_{mjer}$ , dobivene mjerenjem u 4G mreži

Najveća izmjerena propusnost je iznosila 59,50 Mbps uz SINR od 13.80 dB, dok kapacitet prema aproksimacijskoj krivulji za taj SINR iznosi 28,71 Mbps. S druge strane, uz najmanju izmjerenu propusnost koja iznosi 3 Mbps, SINR je iznosio 2,10dB (što predstavlja slabu kvalitetu signala), a kapacitet prema aproksimacijskoj krivulji iznosi 15,65 Mbps što je 5 puta veće od izmjerene propusnosti. To pokazuje da se aproksimacijska krivulja može koristiti samo za grubu procjenu kapaciteta mreže u nekoj ćeliji, a da ostvarena propusnost jako ovisi o trenutnim uvjetima propagacije signala i opterećenosti mreže.

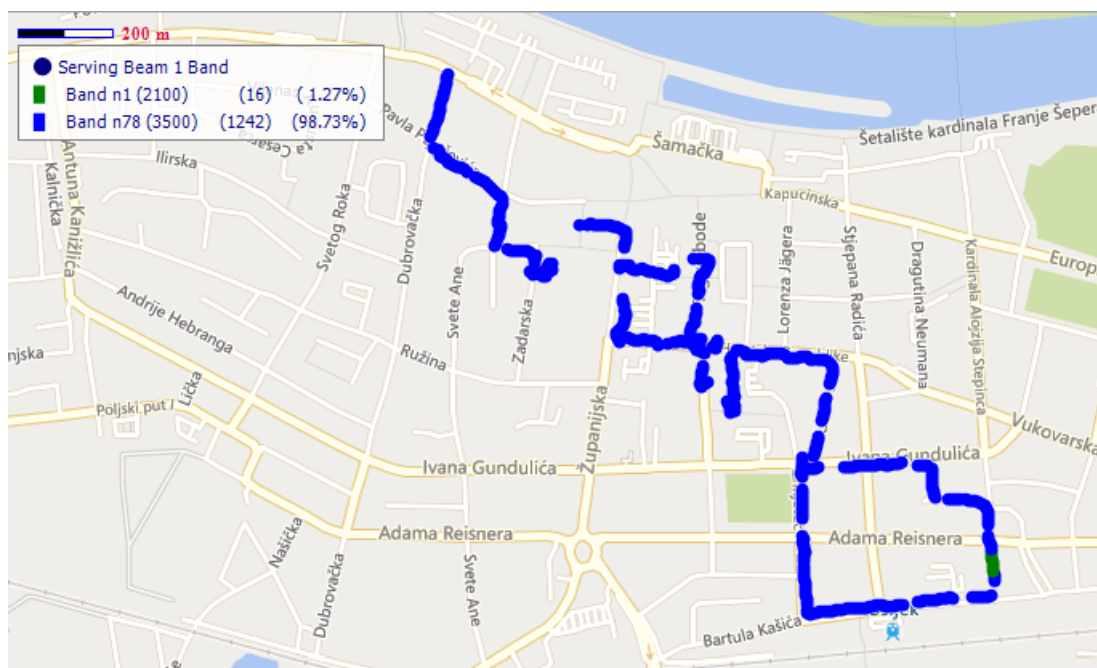
Može se zaključiti kako u teoriji, Shannon-ova formula predviđa iznimno visoke vrijednosti kapaciteta, što znači da bi se velika količina informacija mogla prenijeti kroz kanal. Međutim, u stvarnosti postoje razna ograničenja, uključujući interferenciju, što dovodi do stvarnog kapaciteta

koji je često znatno niži od teoretskog maksimuma. Ograničenja su najčešće izražena u gusto naseljenim mjestima jer veliki broj korisnika dijele ograničene resurse, a zbog zgrada i drugih objekata propagacija signala je otežana.

## 5.2. Mjerenje SINR-a i propusnosti u 5G mreži

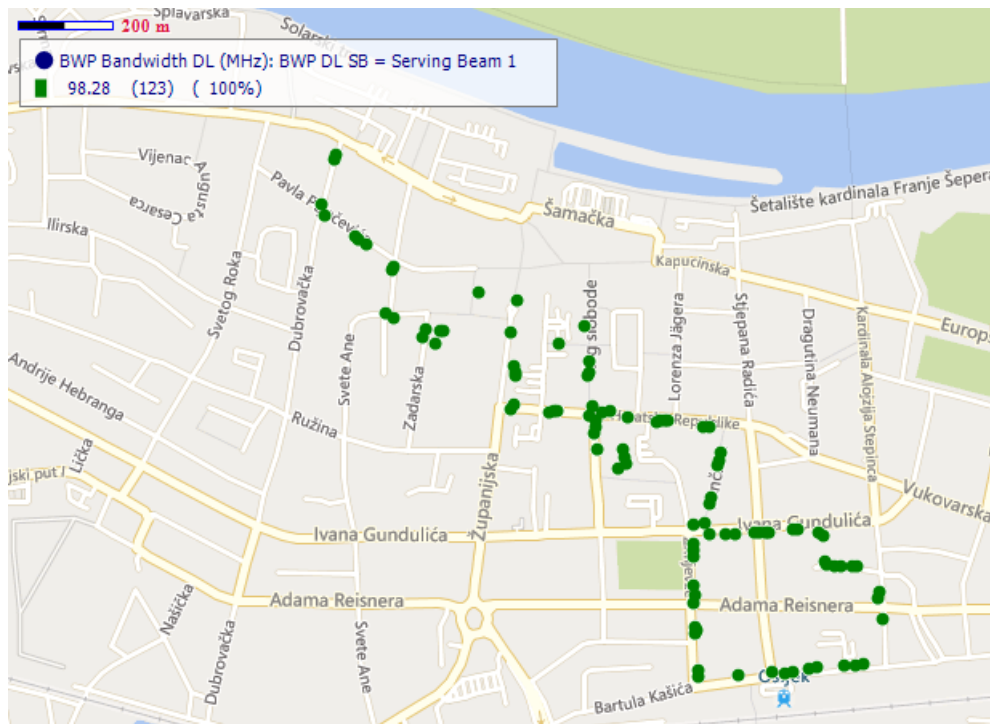
Mjerenje u 5G-u je provedeno na identičan način kao u 4G-u s tim da je određena druga ruta kroz grad. Za mjerenje je korištena ista skripta i akcije kao za mjerenje u 4G. Jedina razlika je u tome što se nakon pokretanja skripte izvršava preuzimanje HTTP testne datoteke koja je veličine 1GB. Analiza rezultata je napravljena u TEMS Discovery 25.0.3, kao i za 4G mrežu.

Slika 5.10. prikazuje vrijednosti frekvencijskog opsega koje su bile dodijeljene tijekom 5G mjerenja. Na 98,73 % točaka je korišten frekvencijski opseg n78 na 3500 MHz, dok je na manjem broju točaka (1,27 %) korišten frekvencijski opseg n1 na 2100 MHz.



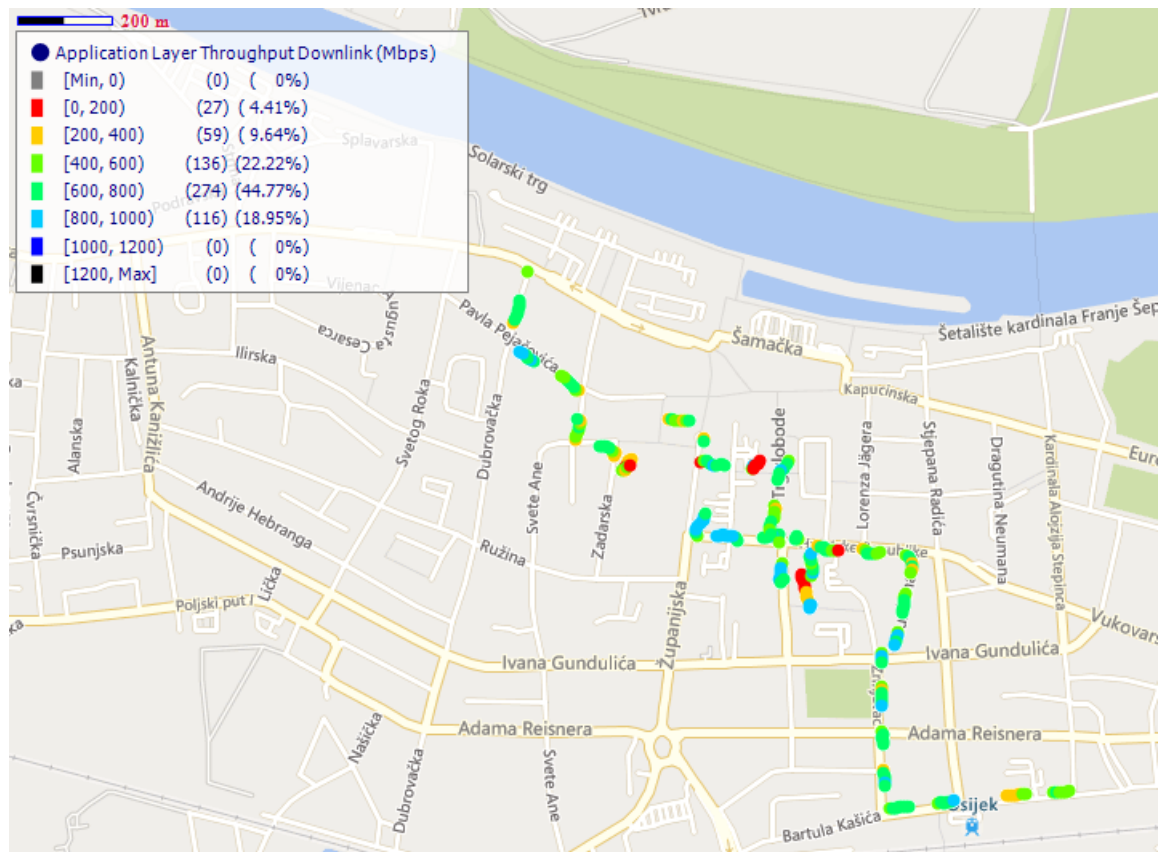
Slika 5.10. Frekvencijski opsezi u 5G mreži

Slika 5.11. prikazuje koja je širina frekvencijskog opsega bila dodijeljen za silaznu vezu u pojedinoj točki u kojoj je provedeno mjerenje, te je vidljivo da je u svim točkama to 98.28 MHz.



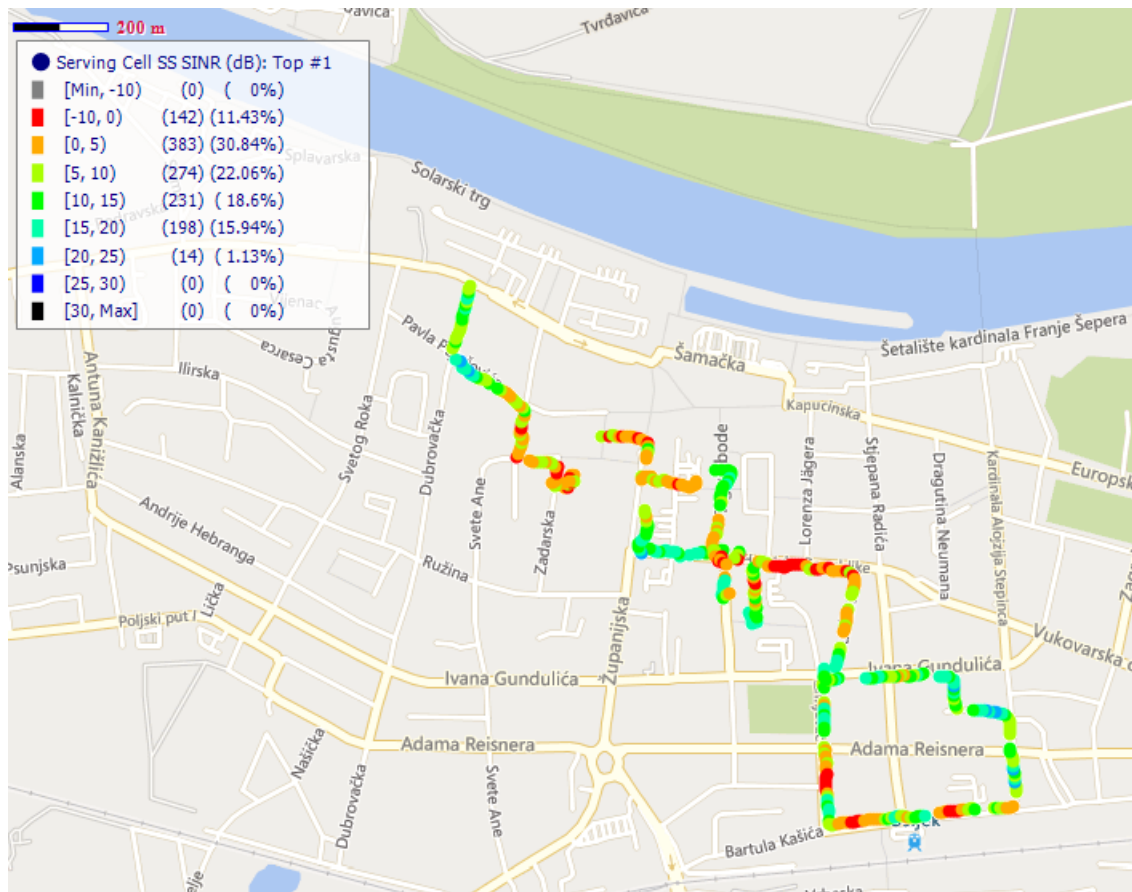
**Slika 5.11.** Prikaz širine frekvencijskog opsega u 5G mreži

Slika 5.12. prikazuje vrijednosti propusnosti izmjerene u 5G mreži. Legenda pokazuje da se radi o puno većim vrijednostima u odnosu na propusnost u 4G mreži. Na slici 5.12. prevladava zelena boja koja predstavlja propusnosti između 600 i 800 Mb/s (na 44,77% točaka). Također, može se primijetiti kako se na ruti često ne pojavljuju uzorci mjerenja, iz istog razloga kao kod mjerenja u 4G mreži odnosno zbog Wait akcije koja stvara period čekanja od 10 sekundi prije preuzimanja testne datoteke. Može se zamijeti kako su praznine puno češće u odnosu na rezultate za 4G mrežu, čemu je razlog to što se Wait akcija ponavlja kod svake iteracije, a brzina preuzimanja datoteke je puno veća.



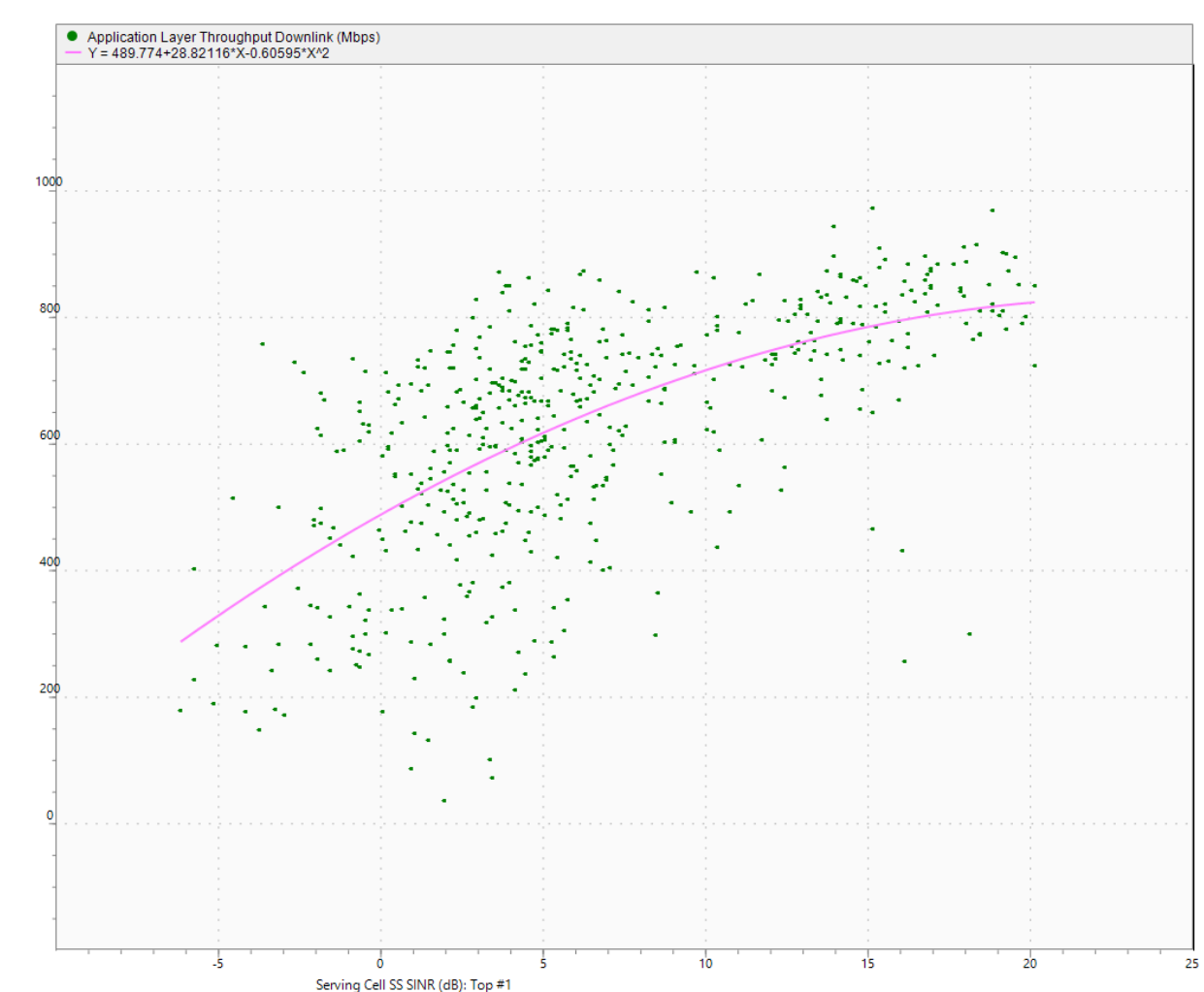
Slika 5.12. Propusnost u silaznoj vezi u 5G mreži

Slika 5.13. prikazuje izmjerene vrijednosti SINR-a koji su izmjereni u 5G mreži. *Serving Cell SS SINR* predstavlja vrijednost SINR signalizacijskog signala za uslužnu ćeliju, te time i mjeru kvalitete primljenih sinkronizacijskih signala u uslužnoj ćeliji. Prema legendi sa slike se može vidjeti kako je 30% vremena SINR vrijednosti bila u intervalu od 0 do 5 dB što znači da je bilo više smetnji koje su utjecale na kvalitetu signala.



Slika 5.13. Izmjerene vrijednosti SS SINR u 5G mreži

Nakon analize svih rezultata mjerenja, napravljen je graf korelacije između SINR-a i propusnosti. u TEMS Discovery 25.0.3 i prikazan je na slici 5.14. Prema grafu, kao i u 4G mjerenju, se može zaključiti da što je veći SINR to je veća propusnost, pri čemu na većim vrijednostima SINR-a povećanje propusnosti se usporeva s porastom SINR-a što odgovara Shannon-Hartley teoremu.



**Slika 5.14.** Graf korelacije između SINR-a i propusnosti u 5G mreži

Slika 5.15. prikazuje graf koji ilustrira vrijednosti kapaciteta u odnosu na SINR. Na grafu se nalaze dvije krivulje kao i kod 4G mjerenja. Crvena krivulja C predstavlja kapacitet koji je dobiven pomoću Shannon-Hartley-eve formule (4-14), uz  $B=98,28$  MHz i  $n=1$ . Plava krivulja označena s  $C_{mjer}$  predstavlja aproksimaciju kapaciteta koji je izračunat pomoću jednadžbe (slika 5.9):

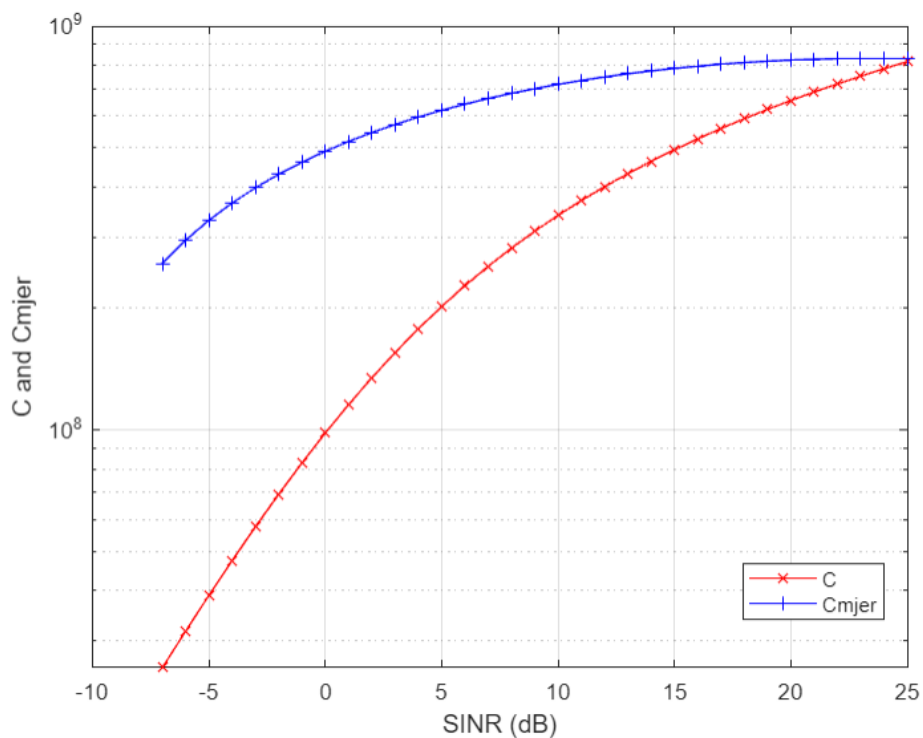
$$C_{mjer} = Y = 489,774 + 28,82116 * X - 0,60595 * X^2$$

Gdje je Y aproksimacija kapaciteta na temelju mjerenja u 5G mreži, a X označava SINR izražen u decibelima. Vrijednosti kapaciteta (y os) su veće u odnosu na vrijednosti kapaciteta 4G. pri čemu su vrijednosti za C, dobivene pomoću Shannon-Hartley-eve formule, manje od vrijednosti  $C_{mjer}$  koja predstavlja aproksimaciju kapaciteta na temelju mjerenja. Razlog tomu može biti korištenje prostornog multipleksiranja s MIMO sustavom koji koristi više paralelnih prijenosa podataka za povećavanje propusnosti, što nije vidljivo iz samog mjerenja pa je u proračunu za C

korištena vrijednost broja antena  $n=1$ . I u ovom mjeranju postoji veliko rasipanje izmjerenih vrijednosti od aproksimacijske krivulje, s tim da je ovdje rasipanje veće za male vrijednosti SINR-a i to prema manjim vrijednostima od aproksimacije  $C_{mjer}$ .

U tablici izmjerenih vrijednosti, najveća vrijednost propusnosti je iznosila 942,92 Mb/s uz SINR je iznosio 13,90dB, dok je aproksimacijski kapacitet iznosio 773,31 Mb/s. Najmanja propusnost je iznosila 36,30Mb/s, uz SINR od 1,90dB, a aproksimacijski kapacitet je 580,76 Mb/s.

5G je stabilnija mreža sa puno većim kapacitetom kanala u odnosu na 4G te mogućnošću prijenosa informacija puno većim brzinama.



**Slika 5.15.** Grafički prikaz teorijske vrijednosti kapaciteta,  $C$ , prema Shannonovoj formuli i aproksimacijske krivulje,  $C_{mjer}$ , dobivene mjerenjem u 5G mreži

## 6. ZAKLJUČAK

Zahtjevi za povećanje kapacitete mobilnih mreža, propusnosti i brzine prijenosa za krajnjeg korisnika svakodnevno rastu s povećanjem prometa u mrežama, posebno videosadržaja. 4G mreže su pružile brzine od nekoliko stotina megabita u sekundi u silaznoj vezi i više desetina megabita u sekundi u uzlaznoj vezi, ali nove primjene traže povećanje brzina, ali i manju latenciju i mogućnost povezivanja velikog broja uređaja. Odgovor na te zahtjeve dala je specifikacija 5G mreža. Ovaj rad se bavi jednim aspektom mobilnih mreža, vezom propusnosti i SINR-a u 4G i 5G mrežama. U teorijskom dijelu rada su opisane osnove 4G i 5G mreža, primjena Shannon-Hartley-evog teorema za procjenu kapaciteta kanala i proračun kapaciteta kanala za 4G mreže. Pokazano je kako uvjeti propagacije signala utječu na propusnost te kako vrijednosti SINR-a definiraju odabir modulacijskog postupka i sheme zaštitnog kodiranja, što direktno utječe na propusnost. U dobrim uvjetima propagacije, kada je SINR velik (npr. iznad 13 dB), moguće je korištenje modulacije s najvećom brzinom prijenosa (64 QAM za 4G) i zaštitnog kodiranja s malim omjerom koda čime se efikasnost prijenosa, a time i neto brzina prijenosa (brzina prijenosa bitova informacije) povećava.

Praktični dio rada uključivao je izvođenje mjerenja SINR-a i propusnosti u 4G i 5G mrežama kako bi se potvrdila valjanost teoretskih koncepta i analizirao utjecaj SINR-a na brzinu prijenosa podataka. Poseban naglasak bio je na analizi kapaciteta mobilne mreže u ovisnosti o SINR-u, pri čemu je Shannon-Hartley-ev teorem bio temeljni koncept. Mjerenja u stvarnim mrežama su pokazala da 5G mreža ima značajno veći kapacitet i stabilnost u usporedbi s 4G mrežom. Uočeno je da što je SINR veći, to je kapacitet kanala veći, što ukazuje na bolji prijenos informacija i veću kvalitetu mreže. Međutim, postoji veliko rasipanje vrijednosti propusnosti za pojedinu vrijednost SINR-a, posebno za 4G mrežu, što se može objasniti dinamičkom dodjelom resursa koja osim o SINR-u ovisi i o trenutno raspoloživom (slobodnom) kapacitetu koji ovisi o broju i zahtjevima drugih korisnika u ćeliji. Također je uočeno da postoji određena granica SINR-a nakon koje povećanje SINR-a ne dovodi do znatnog povećanja propusnosti, što je bilo u skladu s teorijskim očekivanjima. Usporedba teorijskih vrijednosti za kapacitet prema Shannon-Hartley-evom teoremu i krivulje aproksimacije kapaciteta dobivene iz rezultata mjerenja pokazala je da je prosječni kapacitet 4G mreže znatno niži od teorijskog, ali neke izmjerene vrijednosti se približavaju teorijskim. To ukazuje na dinamičku promjenu propusnosti u ovisnosti od uvjeta u prijenosnom kanalu i opterećenosti mreže, te da u dobrim uvjetima 4G mreža korisniku može pružiti brzine koje su vrlo blizu teorijskog maksimuma. S druge strane, zbog velikog broja korisnika 4G mreža takvi idealni uvjeti se rijetko ostvaruju. Za 5G mrežu se pokazalo da je



prosječni kapacitet (dobiven aproksimacijskom krivuljom na temelju mjerenja) za sve vrijednosti SINR-a veći od teorijskih, dobivenih za  $n=1$  broj antena, tj. jednostruki prijenos. Kako je u 5G primjena masivnih MIMO antenskih sustava uobičajena, kao i korištenje višestrukih prijenosa za povećanje propusnosti, to je najvjerojatnije objašnjenje većeg izmjenjenog kapaciteta od teorijskog.

Performanse mobilnih mreža 4G i 5G će se i dalje razvijati kako bi se pružilo bolje iskustvo korisnicima. Međutim, u bliskoj budućnosti očekuje se dolazak 6G tehnologije, koja će vjerojatno dovesti do postepenog gašenja 4G mreža. Unatoč dolasku 6G, 5G će vjerojatno i dalje biti prisutan i razvijati se neko vrijeme. Razvoj mobilnih mreža nikada neće stati, i očekuje se da će se kontinuirano poboljšavati performanse mreža kako bi se ispunili svi veći zahtjevi korisnika i omogućile nove inovacije u komunikacijama.

## LITERATURA

- [1] Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Zavod za komunikacije, Mobilne komunikacije –predavanje "4G mobilne mreže 1. dio" Dostupno na: [https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7632721/mod\\_resource/content/11/20.%204G%20mobilne%20mre%C5%BEe%201.%20dio.pdf](https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7632721/mod_resource/content/11/20.%204G%20mobilne%20mre%C5%BEe%201.%20dio.pdf) [15.6.2023.]
- [2] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld; 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Elsevier, 2011.
- [3] LTE Network Architecture, Tutorials point, dostupno na: [https://www.tutorialspoint.com/lte/lte\\_network\\_architecture.htm](https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm) [15.6.2023.]
- [4] LTE Protocol Stack Layers, Tutorials point, dostupno na: [https://www.tutorialspoint.com/lte/lte\\_protocol\\_stack\\_layers.htm](https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_protocol_stack_layers.htm) [18.6.2023.]
- [5] T.Blajić, LTE – nova tehnologija za mobilni širokopojasni pristup, dostupno na: <https://dokumen.tips/documents/lte-nova-tehnologija-za-mobilni-sirokopojasni-pristup-pdf.html?page=15> [28.6.2023.]
- [6] M. L. Ferreira, A. Barahimi, J.C. Ferreira; Dynamically Reconfigurable LTE-compliant OFDM Modulator for Downlink Transmission, INESC TEC and Faculty of Engineering of the University of Porto, 4200-465
- [7] C. Cox, An introduction to LTE -LTE, LTE-advanced, sae, volte and 4G mobile communications, John Wiley & Sons, UK,2014.
- [8] T. Girici, C. Zhu, Proportional Fair Scheduling Algorithm in OFDMA-Based Wireless Systems with QoS Constraints, dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/252063676\\_Proportional\\_Fair\\_Scheduling\\_Algorithm\\_in\\_OFDMA-Based\\_Wireless\\_Systems\\_with\\_QoS\\_Constraints](https://www.researchgate.net/publication/252063676_Proportional_Fair_Scheduling_Algorithm_in_OFDMA-Based_Wireless_Systems_with_QoS_Constraints) [10.7.2023.]
- [9] A. Sultan, 5G System Overview, 8.8.2022, dostupno na: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview> [19.7.2023]
- [10] Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Zavod za komunikacije, Mobilne komunikacije – predavanje „5G mobilne mreže“. Dostupno na: [https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7632723/mod\\_resource/content/8/22\\_5G\\_2021%20web.pdf](https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7632723/mod_resource/content/8/22_5G_2021%20web.pdf) [20.7.2023.]

- [11] 5G Network Architecture, Geeks for geeks, dostupno na: <https://www.geeksforgeeks.org/5g-network-architecture/> [25.7.2023.]
- [12] S. Sharizal, 5G Core Network SBA+ IMS Core Architecture Diagram, 14.4.2021., dostupno na: <https://ssharizal.medium.com/5g-core-network-sba-ims-core-architecture-diagram-dcf0893d9bd9> [26.7.2023.]
- [13] 5G Tutorial: 5G overall architecture and protocol stack, Prodevelopertutorial, 8.7.2021, dostupno na: <https://www.prodevelopertutorial.com/5g-tutorial-5g-overall-architecture-and-protocol-stack/> [28.7.2023.]
- [14] A. Simmons, 5G Standalone (SA): What is it? and How Does it Work?, 23.2.2023., dostupno na: <https://dgtlinfra.com/5g-standalone-sa/> [30.7.2023.]
- [15] D.Darah, 5G NSA vs. SA: How does each deployment mode differ?, TechTarget, svibanj 2022., dostupno na: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/feature/5G-NSA-vs-SA-How-does-each-deployment-mode-differ> [31.7.2023.]
- [16] 5G SA vs. NSA: The Two Pathways into the World of 5G, Realme, 21.7.2023., dostupno na: <https://c.realme.com/in/post-details/1417760401533194240> [1.8.2023.]
- [17] T. Sheble AI-native network slicing for 5G networks, Digis, 8.2.2022., dostupno na: <https://digis2.com/insights-and-events/ai-native-network-slicing-for-5g-networks/> [2.8.2023.]
- [18] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," in The Bell System Technical Journal, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, July 1948
- [19] Sklar, B. (2001). Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River
- [20] Shannon–Hartley theorem, Rohini College of Engineering and Technology, dostupno na: [https://www.rcet.org.in/uploads/academics/rohini\\_62926120154.pdf](https://www.rcet.org.in/uploads/academics/rohini_62926120154.pdf) [13.4.2023]
- [21] Claude Shannon definirao je informaciju. Tko je Claude Shannon i zašto je poznat? Teorija komunikacije u tajnim sustavima, dostupno na: <https://fondeco.ru/hr/klod-shennon-opredelil-informaciju-kak-kto-takoi-klod-shennon-i-chem-on-znamenit/> [27.4.2023]
- [22] G. Basilashvili, Study of Spectral Efficiency for LTE Network, American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences, vol 29., str. 21-32.

[23] LTE FDD System Capacity and Throughput Calculation, Techplayon, 13.6.2017., dostupno na: <https://www.techplayon.com/lte-fdd-system-capacity-and-throughput-calculation/> [16.9.2023.]

[24] Kasoheyb, Tems Discovery 25.0.2, TelecomTools, 11.5.2023., dostupno na: <https://tele-tools.com/tems-discovery-25-0-2/> [9.9.2023.]

[25] Ericsson, Tems Pocket, dostupno na: <https://www.scribd.com/document/434198884/Tems-Pocket> [9.9.2023.]

[26] Indoor and drone-based network testing and troubleshooting, Infovista, <https://www.infovista.com/tems/pocket> [9.9.2023.]

## SAŽETAK

U prvom dijelu diplomskog rada detaljno su obrađene teme 4G, 5G i Shannon-Hartley-ev teorem. U kontekstu 4G mreže, analizirana je arhitektura mreže, slojevi protokola E-UTRAN i struktura kanala. Nakon toga slijedi opis radijskog sučelja 4G, u kojem su razmatrani dinamičko prilagođavanje parametara veze, raspoređivanje resursa, emitiranje i prijem signala, tehnike višestrukog pristupa, uzroci oštećenja primljenog signala i upravljanje greškama. Također su navedeni i objašnjeni OFDM, OFDMA i SC-FDMA te prijenos signala primjenom višestrukih antena. Nadalje, analizirana je arhitektura 5G mreže, skup 5G protokola, razlika između samostalnih i nesamostalnih 5G mreža te raslojavanje mreže. Obrađen je Shannon-Hartley-ev teorem i Shannon-ova granica, te je analiziran kapacitet LTE mreže. U drugom dijelu rada prikazani su rezultati mjerenja u 4G i 5G mrežama mobilnog uređaja opremljenog TEMS Pocket alatom. Analiza rezultata mjerenja provedena u TEMS Discovery pokazala je da u načelu propusnost raste kako raste SINR, ali da postoji veliki raspon vrijednosti propusnosti za isti SINR što se može objasniti dinamičkom podjelom resursa na veći broj korisnika unutar jedne ćelije.

Ključne riječi: 4G, 5G, Shannon-Hartley teorem, SINR, propusnost, kapacitet

# **THE IMPACT OF SINR SIZE ON TRANSMISSION SPEED IN 4G/5G NETWORKS**

## **ABSTRACT**

In the first part of the master's thesis, topics such as 4G, 5G, and the Shannon-Hartley theorem were extensively discussed. In the context of 4G networks, the network architecture, E-UTRAN protocol layers, and channel structure were analyzed. Following that is a description of the 4G radio interface, which covers dynamic parameter adaptation, resource allocation, signal transmission and reception, multiple access techniques, causes of received signal impairment, and error management. Additionally, OFDM, OFDMA, and SC-FDMA were mentioned and explained, along with signal transmission using multiple antennas. Furthermore, the architecture of 5G networks, the set of 5G protocols, differences between standalone and non-standalone 5G networks, and network slicing were analyzed. The Shannon-Hartley theorem and Shannon's limit were discussed, along with an analysis of LTE network capacity. In the second part of the thesis, measurement results in 4G and 5G networks using a mobile device equipped with the TEMS Pocket tool were presented. The analysis of measurement results conducted in TEMS Discovery showed that, in principle, throughput increases as SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) increases. However, there is a wide range of throughput values for the same SINR, which can be explained by the dynamic allocation of resources to a larger number of users within one cell.

Keywords: 4G, 5G, Shannon-Hartley theorem, SINR, throughput, capacity

## **ŽIVOTOPIS**

Veronika Pavlik rođena je 30.9.1999. godine u Požegi. Osnovnu školu je završila u Jakšiću te poslije završene osnovne škole upisuje Tehničku školu u Požegi. Nakon srednje škole, koju je završila 2018. godine, upisuje preddiplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Poslije prve godine studija izabire blok Komunikacije i informatika. Godine 2021. stječe akademski naziv sveučilišni prvostupnik (lat. baccalaureus) inženjer elektrotehnike i informacijskih tehnologija, nakon čega nastavlja studiranje upisivanjem diplomskog sveučilišnog studija Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika, izborni blok Mrežne tehnologije.