

# Privatna 5G mreža zasnovana na programski definiranom radio uređaju

---

Karimović, Toni

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:200:979262>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-03**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Sveučilišni studij**

**PRIVATNA 5G MREŽA ZASNOVANA NA  
PROGRAMSKI DEFINIRANOM RADIO UREĐAJU**

**Diplomski rad**

**Toni Karimović**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

<b>Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit</b>	
Osijek, 20.09.2023.	
Odboru za završne i diplomske ispite	
<b>Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit</b>	
Ime i prezime Pristupnika:	Toni Karimović
Studij, smjer:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1368, 07.10.2021.
OIB studenta:	84787403728
Mentor:	prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drije
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	Marijan Štefančić
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Mario Vranješ
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Snježana Rimac-Drije
Član Povjerenstva 2:	doc. dr. sc. Denis Vranješ
Naslov diplomskog rada:	Privatna 5G mreža zasnovana na programski definiranom radio uređaju
Znanstvena grana diplomskog rada:	Radiokomunikacije (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U diplomskom je radu potrebno opisati 5G mrežnu arhitekturu te korake u razvoju privatne 5G mreže uz pomoć programskih definiranih radio uređaja (SDR-Software Defined Radio). Prokomentirati koja bi bila uporabljivost ovako definirane mreže. U praktičnom dijelu rada potrebno je razviti privatnu 5G mrežu primjenom SDR te izmjeriti propusnost i stabilnost radio veze za različite parametre mreže. Mjerenja treba provesti na softverski definiranim uređajima te usporediti s rezultatima mjerenja na komercijalnim uređajima. Tema rezervirana za: Toni Karimović Sumentor iz tvrtke: Marijan Štefančić, Orqa d.o.o.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	20.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

Field Code Changed

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

Osijek, 04.10.2023.

Ime i prezime studenta:	Toni Karimović
Studij:	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika
Mat. br. studenta, godina upisa:	D-1368, 07.10.2021.
Turnitin podudaranje [%]:	11

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Privatna 5G mreža zasnovana na programski definiranom radio uređaju**

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

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Field Code Changed

## Sadržaj:

1. UVOD .....	1
2. MOBILNE KOMUNIKACIJSKE MREŽE .....	2
2.1. OPĆE ZNAČAJKE MOBILNIH MREŽA .....	2
2.2. EVOLUCIJA MOBILNIH MREŽA .....	3
2.2.1. Prva generacija mobilnih mreža- 1G .....	4
2.2.2. Druga generacija mobilnih mreža – 2G .....	6
2.2.3. Treća generacija mobilnih mreža – 3G .....	9
2.2.4. Četvrta generacija mobilnih mreža – 4G .....	12
3. PETA GENERACIJA MOBILNIH MREŽA – 5G .....	15
3.1. UVOD U 5G MREŽE.....	15
3.2. KLJUČNE TEHNOLOGIJE .....	17
3.2.1. Masivni MIMO .....	17
3.2.2. Male ćelije .....	18
3.2.3. D2D komunikacija .....	19
3.2.4. Milimetarski valovi.....	19
3.2.5. Mrežno segmentiranje.....	21
3.3. ARHITEKTURA 5G MREŽE .....	22
3.3.1. Samostalna 5G mreža (SA) .....	22
3.3.2. Nesamostalna 5G mreža (NSA) .....	23
3.4. NOVI RADIO PRISTUPNI MREŽNI SUSTAV (NR RAN) .....	24
3.5. 5G JEZGRA (5GC) .....	24
4. PRIVATNA 5G MOBILNA MREŽA.....	26
4.1. IZVEDBA PRIVATNE 5G SA MOBILNE MREŽE PRIMJENOM PROGRAMSKI DEFINIRANOG RADIO UREĐAJA .....	26
4.1.1. Programski definiran radio uređaj .....	27
4.1.2. Kod za radio pristupni mrežni sustav .....	31
4.1.3. Kod za 5G jezgru.....	33
4.1.4. Izvedba privatne 5G mobilne mreže.....	35
4.2. USPOREDBA UČINKA PRIVATNE 5G SA MREŽE I KOMERCIJALNIH MREŽA .....	41

4.2.1. Učinak privatne 5G mreže s različitim parametrima .....	41
4.2.2. Usporedba privatne 5G SA mreže s komercijalnom 5G NSA mrežom .....	43
6. ZAKLJUČAK .....	46
LITERATURA .....	47
SAŽETAK .....	49
ABSTRACT.....	49
ŽIVOTOPIS.....	50

## 1. UVOD

U današnjem svijetu, mobilne komunikacijske mreže igraju ključnu ulogu u omogućavanju brze, pouzdane i široke dostupnosti podataka i usluga. Mobilne mreže više ne predstavljaju luksuz, nego potrebu. Generacije mobilnih mreža su se razvijale iznimnom brzinom, pružajući napredne mogućnosti i revolucionarne tehnologije. Sa svakom novom generacijom, mobilne mreže su se poboljšavale u pogledu brzine prijenosa podataka, latencije, kapaciteta i pouzdanosti.

Posljednja i najnaprednija generacija mobilnih mreža, poznata kao 5G, predstavlja revoluciju u komunikacijama. 5G mreže nude iznimno visoke brzine prijenosa podataka, gotovo trenutačne reakcije i mogućnost povezivanja velikog broja uređaja u isto vrijeme. Ove mreže ne samo da će promijeniti način korištenja mobilnih uređaja, već će također otvoriti vrata novim tehnologijama poput autonomnih vozila, pametnih gradova, interneta stvari i puno više. Međutim, 5G mreže nisu rezervirane samo za velike telekomunikacijske operatere i industrijske divove. S razvojem tehnologije, sve veći broj organizacija, tvrtki i institucija izražava interes za uspostavu vlastitih privatnih 5G mreža. Privatne 5G mreže pružaju veliku fleksibilnost, sigurnost i kontrolu nad komunikacijskom infrastrukturom, omogućavajući organizacijama da prilagode mrežu svojim specifičnim potrebama i zahtjevima.

U ovom diplomskom radu istražit će se mogućnost uspostave privatne 5G mreže temeljene na softverski definiranom radio uređaju (eng. *Software Defined Radio* -SDR). SDR predstavlja novu paradigmu u mobilnim komunikacijama, koja omogućuje fleksibilno programiranje i konfiguriranje radio uređaja putem softvera. Ovaj pristup omogućuje organizacijama da izgrade i upravljaju vlastitom 5G mrežom s nižim troškovima i većom prilagodljivošću.

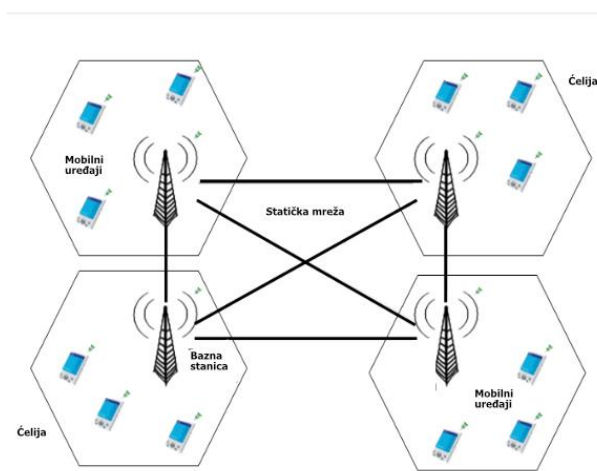
U drugom je poglavlju dan pregled mobilnih komunikacijskih mreža od prvih generacija do četvrte generacije. U trećem poglavlju se detaljnije analiziraju ključne tehnologije 5G mreža, poput masivnog MIMO-a, malih ćelija, D2D komunikacije, milimetarskih valova i mrežnog raslojavanja. Također je predstavljena arhitektura 5G. Četvrto poglavlje diplomskog rada odnosi se na samu izvedbu privatne 5G mreže zasnovanu na programski definiranom radio uređaju. Prikazane su performanse 5G mreže s različitim parametrima, gdje se mijenjaju parametri poput širine kanala, te upotrebe višestrukog ulaza i višestrukog izlaza. Uz to napravljena je usporedba s mrežama operatera koji imaju nacionalnu pokrivenost u Republici Hrvatskoj koje mogu i ne moraju imati SA način rada s ekvivalentnim parametrima privatne 5G mreže.

## 2. MOBILNE KOMUNIKACIJSKE MREŽE

### 2.1. Opće značajke mobilnih mreža

Mobilne mreže predstavljaju napredne komunikacijske sustave koji omogućuju prijenos podataka putem bežičnih veza. One koriste složenu infrastrukturu i tehnološke standarde kako bi omogućile mobilnost, široku pokrivenost i visoku kvalitetu usluga. Suvremene mobilne mreže omogućuju ne samo glasovnu komunikaciju, već i prijenos podataka, multimedijske sadržaje, internetski pristup i druge napredne funkcionalnosti.

Jedna od ključnih značajki mobilnih mreža je mogućnost pružanja širokopojasnog pristupa internetu. Ova značajka omogućuje korisnicima da pristupe internetu putem svojih mobilnih uređaja bez potrebe za vezom s fiksnom mrežom. Mobilne mreže nude visoku brzinu prijenosa podataka, što omogućuje korisnicima da jako brzo i bez problema pristupaju raznom sadržaju na internetu.



Slika 2.1. Primjer mobilne mreže [1]

Mobilne mreže su dizajnirane za podršku mobilnosti korisnika. To znači da korisnici mogu biti povezani s mrežom i komunicirati dok se kreću s jedne lokacije na drugu. Mobilne mreže koriste bazne stanice raspoređene na određenim geografskim područjima kako bi osigurale neprekidan prijenos signala i omogućile korisnicima da ostanu povezani čak i dok se kreću s jednog područja pokrivenosti u drugo (slika 2.1.).



## 2.2. Evolucija mobilnih mreža

Mobilne mreže su prošle jako dug put razvoja da bi došle do današnjih značajki koje omogućuju neometanu komunikaciju. Spajanje radija i telefonske tehnologije započelo je 1915. godine kada je ostvaren prvi bežični prijenos glasa između New Yorka i San Francisca.

Prvi analogni mobilni telefonski sustav (eng. *Mobile Telephone Service* - MTS) zaživio je 1946 a počeo je s radom 1946. godine u St. Louisu i brzo se proširio na više od 100 gradova i autocesta. Međutim, MTS je imao samo šest kanala, od kojih su samo tri mogla istovremeno podržavati pozive.[2] Osim toga, usluga je bila skupa, a oprema glomazna (Slika 2.2.).



Slika 2.2. Telefon autu 1946. godine [3]

Istraživači iz AT&T Bell laboratorija su razvili koncept celularnih sustava 1947. godine.

Celularni (ćelijski) sustavi koriste princip ponovne uporabe frekvencija i podjelu geografskog područja na ćelije s dodijeljenim skupom kanala. Ovo je omogućilo povećanje broja istovremenih korisnika i efikasniju upotrebu spektra.

Unatoč konceptu celularnih sustava, implementacija mobilnih mreža dogodila se tek nekoliko desetljeća kasnije. Prva generacija (1G) mobilnih sustava, poput AT&T-ovog naprednog mobilnog sustava (eng. *Advanced Mobile Phone System* - AMPS), puštena je tek 1983. godine u SAD-u. 2G sustavi poput GSM-a omogućili su digitalnu komunikaciju i podršku prijenosu podataka niskim brzinama.

Rast mobilne industrije bio je izvan očekivanja, s milijunima i milijardama korisnika tijekom proteklih desetljeća. Uz porast potražnje za bežičnim podacima, razvijene su nove generacije mobilnih sustava. 3G sustavi pružili su veće brzine prijenosa podataka, dok je 4G LTE standard donio još veće brzine. [2]

Uvođenje 5G sustava započelo je 2019. godine, pružajući još veće brzine prijenosa, nižu latenciju i energetska učinkovitost. Svaka nova generacija mobilnih sustava razvijena je u skladu sa zahtjevima Međunarodne unije za telekomunikacije (ITU). 3GPP standard zadovoljava ove zahtjeve, a razvijeni su i drugi standardi koji su kompatibilni s globalnim *roamingom*.

### **2.2.1. Prva generacija mobilnih mreža- 1G**

Prva generacija mobilnih mreža, poznata kao 1G postavila je temelje mobilne povezanosti te donijela značajan rast korištenja mobilnih mreža. Prve generacije mobilnih mreža pojavile su se početkom 1980-ih, a nudile su analogni prijenos govorne usluge. 1979. godine u Japanu tvrtka Nippon Telephone and Telegraph (NTT) predstavila je prvi operativni mobilni sustav. Nakon toga, ti su se mobilni sustavi proširili na Europu, pri čemu nastaju analogni sustavi poput *Nordic Mobile Telephones* (NMT) i *Total Access Communication Systems* (TACS). U Njemačkoj je također nastala prva generacija mobilne mreže, poznata kao C450 (C označava „C-Netz“). C450 je uvedena 1985. godine od strane Deutsche Bundespost Telekom. Značajan nedostatak prvih mobilnih mreža bio je nemogućnost potpune interoperabilnosti između različitih zemalja.

Godine 1982. u SAD-u od strane AT&T tvrtke su pokrenuta je *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), koja predstavlja značajna prekretnicu u razvoju prve generacije mobilnih mreža. AMPS je pružao brzinu prijenosa podataka od 10kbps. Koristio je najprije 40 MHz frekvencijski opseg, a zatim je dobio i još 10 MHz od strane Federalne komisije za komunikaciju (FCC) s frekvencijama od 824 od 849 MHz za uzlaznu vezu i od 869 do 894 MHz za silaznu vezu. [2]

U tablici 2.1. predstavljene razlike i značajke pojedinih mreža prve generacije mobilnih mreža.

Tablica 2.1. Razlike i značajke prve generacije mobilnih mreža.

	Japan	Sjeverna Amerika	Engleska	Skandinavske zemlje	Njemačka
Naziv sustava	NTT	AMPS	TACS	NMT	C450
Uzlazna frekvencija	870-885	869-894	917-950	463-467.5	461.3-465.74
Silazna frekvencija	925-940	824-849	872-905	453-457.5	451.3-455.74
Broj kanala	600	832	1320	180	222
Pokrivenost (km)	5-10	2-20	2-20	1.8-40	5-30
Propusnost (kb/s)	0.3	10	8	1.2	5.28

Motorola DynaTAC (eng. *Dynamic Adaptive Total Area Coverage*) bio je revolucionarni mobilni telefon i jedan od prvih komercijalno dostupnih ručnih mobilnih telefona. Motorola ga je predstavila 1983. godine, a često se naziva prvim mobilnim telefonom ili „cigla telefon“. Radio je na AMPS standardu. DynaTAC je bio značajan korak u povijesti mobilnih komunikacija. Omogućavao je korisnicima da obavljaju telefonske pozive. Vrijeme trajanja baterije bilo je oko 30 minuta razgovora, a punjenje je trajalo oko 10 sati.



Slika 2.3. Prvi komercijalno dostupni telefon Motorola DynaTAC 8000X [4]

U 1G mobilnih mreža koristila se analogna frekvencijska modulacija (FM) za prijenos glasa. Kao tehnika pristupanja za ostvarivanje mreže u prvoj generaciji se koristila se *Frequency Fivision Multiplex Access* (FDMA) tehnika. Ova tehnika je omogućila multipleksiranje različitih korisničkih signala na različitim frekvencijama u spektru. Svaki

korisnik dobio bi zasebnu frekvenciju za prijenos svog signala, što je omogućilo neometan rad više uređaja istovremeno.

Prva generacija mobilnih mreža imala je svoje nedostatke, poput nedostatka interoperabilnosti između različitih zemalja i ograničenog kapaciteta. Međutim, njezino naslijeđe i temelji koje je postavila bili su presudni za razvoj kasnijih generacija mobilnih mreža koje su donijele poboljšane performanse, veći kapacitet i širu paletu usluga.

### 2.2.2 Druga generacija mobilnih mreža – 2G

Mobilne mreže druge generacije (2G) predstavljaju značajan korak u evoluciji mobilnih telekomunikacija. Uvedene krajem 1980-ih i početkom 1990-ih godina, 2G mreže donijele su ključna unapređenja u odnosu na prethodnu, mrežu prve generacije (1G). Ove digitalne mreže predstavljaju značajan prelazak sa analogne na digitalnu komunikaciju, omogućavajući poboljšanu kvalitetu glasa, veći kapacitet i uvođenje različitih usluga prijenosa podataka.

Mreže druge generacije koriste digitalne tehnike višestrukog pristupa *Code Division Multiple Access* (CDMA) i *Time Division Multiple Access* (TDMA), što omogućava bolju kvalitetu glasa i smanjenje pozadinskog šuma, pružajući korisnicima bolju kvalitetu usluge. TDMA koristi vremensku podjelu kako bi podijelio kanal u više vremenskih intervala. TDMA se koristi u 2G mobilnim sustavima kao što su *Global System for Mobile Communications* (GSM), *Personal Digital Cellular* (PDC) i iDEN standard za mobilne telefone. CDMA, je moćnija i fleksibilnija tehnologija koja kodira podatke svakog poziva s jedinstvenim ključem, a zatim istovremeno prenosi podatke iz više poziva.

IS-136 i IS-95 (*Interim Standard*) su konkurentski sustavi koji su se razvili u Americi kao alternativa GSM-u. IS-136, također poznat kao *Digital AMPS* (D-AMPS) ili ANSI-136, bio je temeljen na TDMA tehnologiji i nasljednik analognog AMPS sustava. IS-95, poznat i kao CDMAOne ili CDMA IS-95, koristio je CDMA tehnologiju za multipleksiranje signala. Oba sustava su pružala digitalnu komunikaciju, ali nisu postigla globalnu rasprostranjenost kao GSM. Međutim, s vremenom je GSM postao preferirani standard i D-AMPS je službeno povučen iz upotrebe 2008. godine.

PDC (eng. *Personal Digital Cellular*) je mobilni komunikacijski sustav koji se razvio u Japanu 1993. godine. Temeljio se na TDMA tehnologiji i bio je konkurentan GSM-u. PDC je bio široko prihvaćen u Japanu, ali nije postigao međunarodnu prisutnost kao GSM.

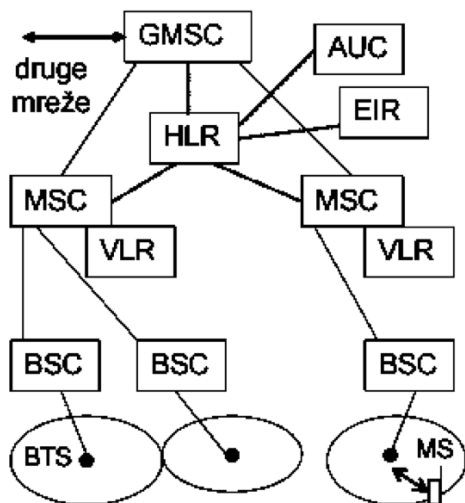
GSM (eng. *Global System for Mobile Communications*) je trenutno najrasprostranjeniji sustav za telekomunikaciju na svjetskoj razini. Razvijen tijekom 1980-ih godina od strane

ETSI-a (eng. *European Telecommunications Standards Institute*), ovaj standard druge generacije mobilnih komunikacijskih sustava je službeno uveden 1991. godine. Brzo je zamijenio različite analogne sustave diljem Europe. [3]

GSM primjenjuje TDMA metodu za alokaciju frekvencijskog spektra, s glavnim fokusom na osiguranje pouzdane digitalne komunikacije putem mobilnih uređaja, uključujući telefone, slanje tekstualnih poruka i faksova. Standardna brzina prijenosa podataka u klasičnom GSM sustavu iznosi 9,6 kbit/s a moguće je brzinu prijenosa od 14,4 kbit/s. [3]

Arhitektura GSM-a obuhvaća nekoliko ključnih komponenata, pri čemu se mobilna stanica (eng. *Mobile Station* - MS) ističe kao centralna. Mobilna stanica predstavlja korisnika i uključuje terminalni uređaj, poput mobilnog telefona, u kojem se smješta SIM (eng. *Subscriber Identity Module*) kartica. Na SIM kartici pohranjeni su korisnički identifikacijski podaci i dodatno je osigurana lozinkom kako bi se spriječila neovlaštena uporaba. [5]

GSM sustav također uključuje baznu stanicu (eng. *Base Station*, BS) koja osigurava bežičnu vezu s mobilnim stanicama. Bazna stanica obično pokriva određeno geografsko područje i omogućuje komunikaciju između mobilnih stanica i mobilne mreže. Mobilna mreža uključuje infrastrukturu poput kontrolnih centara i baznih stanica koje omogućuju uspostavu



Slika 2.3. Struktura GSM mreže [5]

U GSM strukturi, različiti dijelovi imaju specifične funkcije kako bi omogućili mobilnu komunikaciju i upravljanje mrežom. Evo objašnjenja za svaki od dijelova iz Slike 2.3:

1. **BTS** (*Base Transceiver Station*) je bazna stanica u GSM mreži. To je fizički uređaj koji omogućuje bežičnu komunikaciju između mobilnih uređaja i mobilne mreže. BTS prima signale od mobilnih uređaja i prenosi ih BSC-u putem bežične veze.
2. **BSC** (*Base Station Controller*) upravlja baznim stanicama. To je središnji element u GSM mreži koji kontrolira radio resurse, preraspodjelu kanala i upravljanje kvalitetom usluge. BSC je povezan s BTS-ovima i MSC-om.
3. **VLR** (*Visitor Location Register*) je baza podataka koja sadrži privremene informacije o mobilnim korisnicima koji se trenutno nalaze u području mreže koje nije njihovo matično područje. VLR se nalazi u MSC-u i služi za upravljanje registracijom korisnika, autorizacijom i provođenjem lokalnih poziva.
4. **MSC** (*Mobile Switching Center*) je centralni čvor u GSM mreži. On je odgovoran za usmjeravanje poziva, autentifikaciju korisnika i upravljanje mobilnim stanjima. MSC povezuje mobilne korisnike s drugim mobilnim korisnicima, fiksnim telefonima i drugim mrežama kao što je PSTN.
5. **HLR** (*Home Location Register*) je baza podataka koja sadrži stalne informacije o svim registriranim korisnicima u GSM mreži. To uključuje informacije poput identiteta korisnika, lokacije, odabranih usluga i statusa. HLR je centralna komponenta za upravljanje mobilnim pretplatnicima i koristi se za uspostavu i preusmjeravanje poziva.
6. **GMSC** (*Gateway Mobile Switching Center*) je mobilno usmjerivačko središte koje povezuje GSM mrežu s drugim mrežama, poput PSTN ili mobilnih mreža drugih operatera. GMSC omogućuje usmjeravanje dolaznih i odlaznih poziva između različitih mreža.
7. **AUC** (*Authentication Center*) je sigurnosni element u GSM mreži. On generira i provjerava ključeve za autentifikaciju mobilnih uređaja prije nego što pristupe mreži. AUC štiti GSM mrežu od neovlaštenog pristupa i omogućuje sigurnu komunikaciju između mobilnih uređaja i mreže.
8. **EIR** (*Equipment Identity Register*): EIR predstavlja bazu podataka u kojoj su sadržane informacije o identitetu mobilnih uređaja koji se koriste u GSM mreži. EIR provjerava i prati identitete mobilnih uređaja kako bi se spriječila uporaba neovlaštenih ili ukradenih uređaja. Ako se identitet mobilnog uređaja nalazi na popisu blokiranih ili ukradenih uređaja u EIR-u, mreža može poduzeti odgovarajuće korake, poput odbijanja pristupa ili praćenja takvih uređaja.

Nakon što je HSCSD (eng. *High Speed Circuit-Switched Data*) predstavio znatno brže prijenose podataka u okviru GSM-a, uslijedio je korak naprijed u razvoju GSM podatkovnih usluga putem implementacije GPRS-a (eng. *Global Packet Radio System*). GPRS je bio revolucionaran jer je koristio paketnu komunikaciju umjesto klasične komutacije veze, omogućujući bolju iskoristivost mreže i dinamičko dijeljenje resursa. Ova tehnologija je označila početak transformacije mobilnih komunikacija prema više orijentiranom paketnom prijenosu podataka, otvarajući vrata za širok raspon novih mobilnih usluga i aplikacija.

GPRS je također bio proširenje GSM mreže, ali je koristio paketnu komutaciju podataka umjesto klasične komutacije veze. Ovo je omogućilo prijenos podataka putem paketa, što je rezultiralo efikasnijom upotrebom mrežnih resursa i omogućilo podršku za Internet usluge na mobilnim uređajima. GPRS je prvi put uveden u komercijalnu upotrebu 1997. godine a standardiziran je 1998. godine, 2001. godine dobiva naziv 2.5G jer predstavlja jedan od prvih koraka prema razvoju 3G mobilnih mreža. [3]

EDGE (eng. *Enhanced Internet Rates for GSM Evolution*) predstavlja dodatak GPRS mreži i označava korak unaprijed u evoluciji GSM sustava prema bržim brzinama prijenosa podataka. Uveden je 2003. godine i često se naziva "2.75G" tehnologijom. EDGE je donio značajna poboljšanja u brzini prijenosa podataka u usporedbi s GPRS-om. Zahvaljujući podršci za EDGE, teoretske brzine prijenosa podataka dosežu do 384 Kbit/s, što je znatno brže od brzina koje je omogućavao GPRS. Ova napredna brzina postignuta je primjenom sofisticiranih modulacijskih tehnika kao što su 8PSK (Eight-Phase Shift Keying) i 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation), što rezultira efikasnijim iskorištavanjem dostupnog frekvencijskog spektra. [3]

### **2.2.3. Treća generacija mobilnih mreža – 3G**

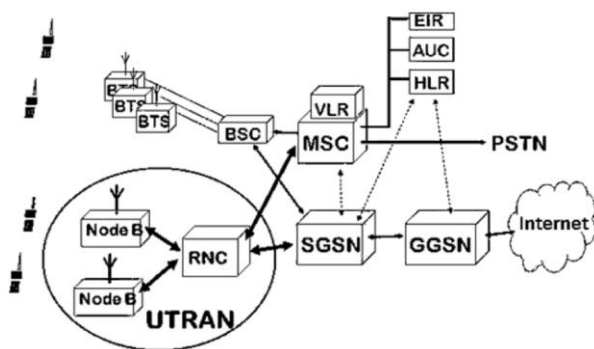
Potreba za većim brzinama prijenosa podataka i pristupom Internetu revolucionirala je mobilne komunikacije uvođenjem treće generacije (3G) mobilnih mreža. U široku uporabu su ušle početkom 21. stoljeća, a donijele su značajne promjene u načinu na koji korisnici koriste svoje mobilne uređaje. Umjesto fokusa na glasovne usluge i poruke, 3G mreže su se usmjerile na pružanje većih brzina prijenosa podataka i omogućavanje širokopojasnog pristupa Internetu.

Standardizacija 3G mreža temeljila se na zahtjevima definiranim od strane Međunarodne telekomunikacijske unije (ITU). ITU je razvio standard IMT-2000 (eng. *International Mobile Telecommunications-2000*), koji je postavio smjernice koje su trebale

zadovoljiti sve 3G mreže. Nakon ITU-a, organizacija *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) preuzela je daljnji razvoj standarda i koordinaciju između različitih dionika.

UMTS (eng. *Universal Terrestrial Mobile System*) sustav koji udovoljava IMT-2000 standardu za 3G mreže. UMTS je izazvao revoluciju u mobilnim komunikacijama omogućujući pristup internetu, razmjenu multimedijских poruka i pružanje usluga temeljenih na lokaciji. Ključna tehnologija pristupa u UMTS-u je Wideband-Code Division Multiple Access (W-CDMA), koja se razlikuje od prethodnih sustava po širini frekvencijskog pojasa i omogućuje veće brzine prijenosa podataka. U oba smjera komunikacije koristi se kanal širine od 5 MHz, s podržanim brzinama od 384 kbit/s do 2 Mbit/s. Ova šira propusnost smanjuje osjetljivost na usko gradske interferencije i prigušivanja, iako povećava razinu interferencije od strane drugih korisnika mreže. [7]

FOMA je predstavljena u Japan godine te je koristila W-CDMA tehnologiju a predstavlja prvu komercijalnu 3G mrežu. Nakon toga, 3G mreže su se proširile diljem svijeta, počevši od Južne Koreje, Italije i Ujedinjenog Kraljevstva. Unatoč izazovima visokih troškova i frekvencijskih opsega, 3G mreže su postale sveprisutne i omogućile su korisnicima brži i napredniji mobilni doživljaj.[6]



Slika 2.4. Arhitektura UMTS mreže [7]

UMTS je nadogradnja GSM tehnologije i nije zamjena za nju. Glavna razlika između GSM/GPRS i UMTS mreža leži u tehnologiji pristupa, što je zahtijevalo izgradnju nove radijske pristupne mreže.

UMTS mreže omogućuju mobilnim uređajima povezivanje s sustavom preko pristupne mreže poznate kao UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*). UTRAN uključuje nove komponente mreže, uključujući Node-B ili čvor-B te radio mrežni kontroler (*Radio Network Controller - RNC*). RNC obavlja funkcije slične onima koje obavlja BSC u GSM



mreži, dok Node-B ima ulogu sličnu BTS-u. Ovo osigurava određenu razinu kompatibilnosti s postojećim sustavom.

HSPA (*High Speed Packet Access*) je integracija dvaju protokola: HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*) i HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*). Prvi korak u nadogradnji UMTS mreže je uvođenje HSDPA, koji poboljšava silaznu vezu, a nakon toga slijedi HSUPA, koji poboljšava uzlaznu vezu. Ove nadogradnje se uglavnom izvode softverski, bez potrebe za uvođenjem novih mrežnih elemenata. [7]

HSPA se smatra jednom novom generacijom mreža i predstavljala bi neku među mrežu između 3G i 4G mreže pa se još naziva i 3.5 generacijom mreža jer nudi značajno povećane brzine prijenosa podataka u usporedbi s UMTS-om. Maksimalne brzine prijenosa podataka po ćeliji su bile 14.4 Mbit/s u smjeru prema korisniku i 5.76 Mbit/s u smjeru prema mreži. HSPA+ predstavlja nadogradnju HSPA-e koja dodatno unapređuje radijske performanse i optimizira prijenos podataka, smanjujući latenciju i povećavajući kapacitet. HSPA+ potpuno iskorištava mogućnosti višestrukog pristupa W-CDMA i omogućava brzine prijenosa podataka do 42 Mbit/s u smjeru prema korisniku i 11.5 Mbit/s u smjeru prema mreži. [10]

RNC je centralni element u UMTS mreži koji obavlja funkcije upravljanja radio pristupom, mobilnosti, resursima i kontrolom mreže. Node-B je bazna stanica koja je odgovorna za bežičnu komunikaciju s mobilnim uređajima. Glavna zadaća mu je prijenos i primanje podataka između mobilnih uređaja i RNC-a. Node-B također obavlja funkciju upravljanja radio resursima unutar svoje ćelije, uključujući dodjeljivanje i upravljanje vremenskim i frekvencijskim resursima. [10]

3G sustavi donose mnoge prednosti i nove mogućnosti svojim korisnicima koje 2G sustavi ne mogu pružiti. Na primjer, 3G sustavi omogućuju korištenje usluga temeljenih na lokaciji, kao što je GPS (*Global Positioning System*), što 2G sustavi ne podržavaju. Također, 3G sustavi omogućuju brži pristup Internetu, videostrujanj, slanje i primanje multimedijских poruka te korištenje raznih aplikacija koje zahtijevaju visoku brzinu prijenosa podataka. S obzirom na svoje napredne mogućnosti, 3G sustavi su skuplji u usporedbi s 2G sustavima. Izgradnja i održavanje infrastrukture 3G mreža zahtijeva ulaganje u opremu i frekvencijske opsege, što rezultira većim troškovima. Ti troškovi prenose se na korisnike, zbog čega 3G usluge često imaju više cijene u usporedbi s 2G uslugama.

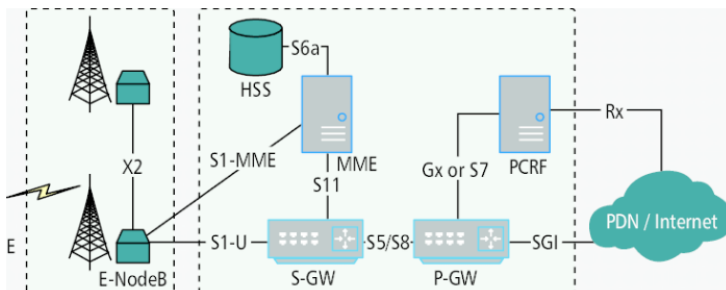
#### 2.2.4. Četvrta generacija mobilnih mreža – 4G

Novе tehnologije te novi zahtjevi korisnika predstavljaju glavne pokretače u stvaranju novih generacija mobilnih komunikacijskih sustava. U svijetu sve veće potrebe za brzim i pouzdanim prijenosom podataka, kao i za naprednim aplikacijama, mobilni operateri su se usredotočili na razvoj četvrte generacije (4G) mobilnih komunikacijskih sustava. 4G sustavi karakteriziraju visoka razina korisničkog iskustva, pružanje novih aplikacija i integracija postojećih tehnologija.

Jedan od vodećih standarda 4G tehnologije je *Long Term Evolution* (LTE), koji je postao globalni telekomunikacijski standard. Razvoj LTE tehnologije započeo je nakon prve radionice o evoluciji 3G sustava 2004. godine, koju je organizirala 3GPP grupa. Kroz niz istraživanja, testiranja i rasprava, specifikacije za LTE su konačno određene krajem 2008. godine. Implementacija LTE tehnologije započela je 2009. godine u Norveškoj i Švedskoj, a privukla je veliki broj mobilnih operatera zbog svoje jednostavne i jeftine infrastrukture temeljene na IP-u, niskog kašnjenja za korisnike te visokih brzina prijenosa podataka.

Osim LTE-a, još jedan široko prihvaćen standard koji se približavao 4G tehnologiji bio je WiMAX. WiMAX spada u IEEE 802.16 seriju standarda i prvi je put implementiran 2007. godine u Južnoj Koreji, a godinu dana kasnije i u Sjedinjenim Američkim Državama. WiMAX se često smatra 3,9G sustavom jer ne ispunjava sve specifikacije za 4G sustav, dok je LTE razvijen kao standard koji udovoljava specifikacijama koje je postavio ITU-R. Ovo uključuje jednostavnu i ekonomičnu IP-infrastrukturu, nisku latenciju za korisnike i upravljački sloj, visoke brzine prijenosa podataka u smjeru prema korisniku i smjeru prema mreži, te fleksibilnost u korištenju različitih frekvencijskih opsega.[3]

LTE koristi višestruki pristup kroz frekvencijski multipleks ortogonalnih podnositelja (OFDM) s OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) u silaznoj vezi i SCFDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) u uzlaznoj vezi. Također, koristi se MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) tehniku za podršku više-antenskih sustava na baznim stanicama i terminalima. Ova kombinacija tehnologija omogućuje ostvarivanje velikih brzina prijenosa podataka i efikasnu uporabu raspoloživog frekvencijskog spektra. OFDM modulacijska tehnika dijeli široki frekvencijski pojas na zasebne podnositelje (*subchannels*). [8]



Slika 2.5. Arhitektura LTE mreže [8]

LTE mreža sastoji se od dva glavna dijela: E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) i EPC (*Evolved Packet Core*). Glavni dijelovi oba dijela LTE arhitekture prikazani su na slici 2.5.. E-NodeB je bazna stanica u LTE mreži koja je odgovorna za upravljanje bežičnom komunikacijom između korisničkih uređaja i mreže. Svaki E-NodeB ima jedinstvenu identifikaciju, poznatu kao *Cell Identity* (CI), koja omogućuje identifikaciju i pristup određenoj ćeliji u mreži. E-NodeB se sastoji od radijskog dijela koji obuhvaća antene i odašiljače, kao i baznu stanicu (bazu za obradu signala) koja upravlja prijenosom podataka između korisnika i mreže. EPC je arhitektura mreže u mobilnoj komunikaciji koja se koristi u LTE sustavu.

EPC je projektiran tako da podržava visoke brzine prijenosa podataka, nisku latenciju i omogućuje integraciju različitih tehnologija i mrežnih elemenata. Glavni dijelovi su:

1. MME (*Mobility Management Entity*) je ključni element u EPC-u odgovoran za upravljanje mobilnosti korisnika u LTE mreži. On pruža funkcionalnosti poput registracije korisnika, praćenja lokacije, upravljanja promjenom stanja i autentifikacije korisnika. MME također uspostavlja i održava vezu s korisničkim uređajima tijekom uspostave poziva ili prijenosa podataka.
2. S-GW (*Serving Gateway*) je glavni čvor u EPC-u koji služi kao spojni element između E-UTRAN-a i ostatka mreže. On je odgovoran za preusmjeravanje podataka između korisničkog uređaja i mrežnih elemenata. S-GW također obavlja funkcije poput prekida podataka, upravljanja mobilnosti, QoS (*Quality of Service*) kontrola i upravljanje prometom.
3. HSS (*Home Subscriber Server*) je baza podataka u EPC-u koja sadrži informacije o pretplatnicima i korisnicima mreže. To uključuje autentifikacijske podatke, identifikacijske podatke, informacije o uslugama i profilima korisnika. HSS je

ključan za pružanje sigurnosti, upravljanje identitetima i autorizaciju korisnika u LTE mreži.

4. P-GW (*Packet Internet Network Gateway*) je čvor u EPC-u koji pruža konektivnost između LTE mreže i vanjskih paketnih mreža poput interneta. On obavlja funkcije usmjeravanja podataka, omogućuje NAT (*Network Address Translation*) za pristup Internetu, podržava politiku kontrole i nadzire prekidanje podataka. P-GW također je odgovoran za obradu IP protokola, pružanje sigurnosti putem vatrozida i praćenje i naplatu podataka.
5. PCRF (*Policy and Charging Rules Function*) je čvor u EPC-u koji upravlja politikama i pravilima za upravljanje prometom, kvalitetom usluge i naplatom. On pruža dinamičko prilagođavanje parametara mreže i usluga na temelju politika operatora i zahtjeva korisnika.

4G mreže, poput LTE-a, predstavljaju značajan korak naprijed u mobilnoj telekomunikaciji. Ove mreže omogućuju korisnicima brže preuzimanje i prijenos podataka, pristup naprednim multimedijским aplikacijama i bolju povezivost na mobilnim uređajima. Uz to, 4G mreže pružaju platformu za daljnji razvoj tehnologija poput *Internet of Things* (IoT), pametnih gradova i autonomnih vozila, koje zahtijevaju visoku propusnost, nisku latenciju i pouzdanu mrežnu infrastrukturu. Suvremene mobilne mreže neprestano evoluiraju, a uvođenje 4G tehnologija predstavlja korak prema ostvarenju visokih brzina prijena podataka i pružanju naprednih usluga korisnicima diljem svijeta.

### **3. PETA GENERACIJA MOBILNIH MREŽA – 5G**

Svake novije generacije mobilnih komunikacijskih sustava kao 3G i 4G nastaju kao rezultat želje za poboljšanjem prethodnih generacija i to ponajviše u pogledu brzine prijenosa podataka. Prethodni prijelazi s 2G na 3G i s 3G na 4G imali su određene ciljeve i očekivanja koja su se odnosila na poboljšanje performansi i korisničkog iskustva. Na primjer, prijelaz s 2G na 3G omogućio je pristup širokopojasnom internetu, iako u početku nije u potpunosti ispunio očekivanja korisnika. Tek s dolaskom 3.5G tehnologije, koja se naziva i HSPA, postignuta su očekivanja vezana uz pristup brzom internetu. To je rezultiralo stvaranjem digitalnog svijeta kakav danas poznajemo, s mobilnim aplikacijama, strujanjem medija i drugim naprednim uslugama.

Peta generacija mobilne mreže (5G) donosi veći kapacitet, brže brzine prijenosa, smanjenu latenciju i veću pouzdanost u odnosu na 4G. Također omogućuje povezivanje većeg broja uređaja, bolju pokrivenost i potencijal za nove aplikacije poput autonomnih vozila, pametnih gradova i telemedicine. Ove prednosti 5G mreže otvaraju prostor za inovacije i napredak u različitim industrijama, kao što su industrija 4.0. Implementacija 5G tehnologije će poboljšati komunikaciju između uređaja i omogućiti brže preuzimanje i dijeljenje podataka, dok će širi spektar frekvencija omogućiti bolju pokrivenost i stabilnost mreže.

#### **3.1. Uvod u 5G mreže**

Peta generacija mobilnih mreža predstavlja najnoviji sistem definiran od strane 3GPP-a. Funkcionalno je definiran u lipnju 2018. godine, a potpuno specificiran do rujna 2019. godine.

Za razliku od prethodnih generacija, 5G standardne definira samo zračno sučelje, već obuhvaća i sve protokole i mrežna sučelja koja omogućuju cijeli mobilni sustav. Ovaj sveobuhvatni pristup omogućava 5G mrežama da djeluju u kontekstu interoperabilnosti između različitih dobavljača i operatora, olakšavajući besprijekornu komunikaciju između različitih mreža i uređaja.

5G je dizajniran i implementiran u više faza. Izdanje 15, koje specificira prvu fazu 5G-a, uvodi nekoliko ključnih koncepata poput nove tehnike radio prijenosa, poboljšane pouzdanosti prikladne za industrijske primjene, povećane modularnosti i smanjenog vremena odziva.

5G ili 5GS sustav je definiran 3GPP specifikacijom od izdanja 15, funkcionalno zamrznut u lipnju 2018. i potpuno specificiran do rujna 2019. 3GPP definira ne samo zračno sučelje nego i sve protokole i mrežna sučelja koja omogućuju cijeli mobilni sustav: kontrolu poziva i sesija, upravljanje mobilnošću, pružanje usluga.

U okviru izdanja 16, usluge hitnih komunikacija (*Mission Critical - MC*) proširuju se kako bi obuhvatile širi poslovni sektor od prvobitno uskih usluga javne sigurnosti i civilne obrane za koje su prvobitno bile razvijene. Najznačajnija poboljšanja postojećih značajki u izdanju 16 odnose se na područja poboljšanja multipleksiranja višestrukih ulaza i višestrukih izlaza (*Multiple-input and Multiple-output - MIMO*) i usmjeravanja snopa, dinamičkog dijeljenja spektra (*Dynamic Spectrum Sharing - DSS*), dvostruke povezanosti (*Dual Connectivity - DC*) i agregacije nosača (*Carrier Aggregation - CA*) te uštede energije uređaja korisnika (*User Equipment - UE*).

Radni elementi odobreni od strane 3GPP-a u prosincu 2019. godine rezultirali su uvođenjem novih značajki za tri glavne skupine upotrebnih slučajeva: poboljšane mobilne široke propusnosti (*Enhanced Mobile Broadband - eMBB*), ultra pouzdanog niskog kašnjenja (*Ultra-Reliable Low Latency Communications - URLLC*) i masivnih komunikacija strojevima (*Massive Machine-Type Communication - mMTC*). Svrha je podržati očekivani rast prometa mobilnih podataka te prilagoditi NR (*New Radio*) za primjene u automobilskoj industriji, logistici, javnoj sigurnosti, medijima i proizvodnji. Poboljšanja postojećih značajki koja su uvedena u izdanju 17 odnose se na funkcionalnost koja je već implementirana u postojećim NR mrežama ili se odnose na specifične nove zahtjeve koji se pojavljuju na tržištu.

URLLC je dizajniran za aplikacije s kritičnim zahtjevima za pouzdanost i latenciju, kao što su automatizacija tvornica, autonomna vožnja i virtualna/dodana stvarnost. eMBB je dizajniran za aplikacije koje zahtijevaju visoku brzinu prijenosa podataka, kao što su 4K i 8K video streaming, virtualna stvarnost i proširena stvarnost. mMTC je dizajniran za aplikacije s velikim brojem uređaja koji generiraju male količine podataka, kao što su senzori u pametnim gradovima i pametnim kućama. URLLC i eMBB imaju potencijal da naprave revoluciju u industrijskom IoT (*Internet of things*) segmentu. Ove tehnologije mogu omogućiti nove i inovativne aplikacije koje će poboljšati učinkovitost, sigurnost i automatizaciju u industrijskim operacijama. [26]

## 3.2. Ključne tehnologije

### 3.2.1. Masivni MIMO

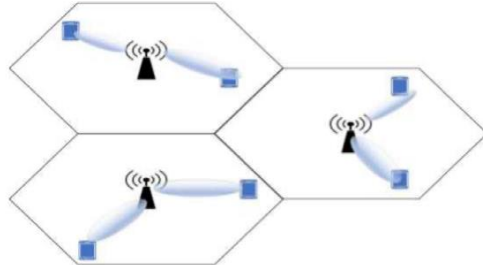
Masivni MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) je napredna tehnologija antena koja se očekuje da će biti ključna značajka 5G i budućih mobilnih komunikacijskih sustava. Uključuje postavljanje velikog broja antena na baznoj stanici, omogućujući istovremenu komunikaciju s više korisničkih uređaja.

Glavna razlika između tradicionalnog MIMO-a i masivnog MIMO-a leži u broju antena koje se koriste. Tradicionalni MIMO sustavi obično koriste manji broj antena, obično do 4 ili 8, kako na baznoj stanici, tako i na korisničkim uređajima. S druge strane, masivni MIMO koristi znatno veći broj antena na baznoj stanici, često nekoliko stotina ili više, dok korisnički uređaji i dalje mogu imati ograničen broj antena, na primjer manje od 8.

Korištenje više antena koje rade zajedno pružaju nekoliko prednosti:

- Višestruke paralelne antene imaju veći dobitak;
- Bolja je otpornost na namjerno ometanje;
- Više putanja prema 5G klijentu pruža jaču snagu signala;
- Prijenos se može usmjeriti u snop prema 5G klijentima, što se naziva *beamforming* i pruža više snage klijentu s manje smetnji;
- Više paralelnih antena može služiti veći broj korisnika;
- Antenski nizovi mogu identificirati fizičke lokacije 5G klijenata;
- Nizovi također mogu pratiti pokretne klijente i usmjeriti prijenosni snop prema klijentu, prateći pokrete klijenta i održavajući mrežnu povezanost;
- Masivni MIMO sustavi mogu obraditi velike količine mrežnog protoka i podržati velik broj klijentskih tokova.

Oblikovanje snopa (eng. *Beamforming*) je metoda usmjeravanja radijacijske snage antene u jednom smjeru. Oblikovanje snopa se odnosi na slanje signala u užem obliku s bazne stanice prema prijemniku. Prilikom prijena, glavna latica dijagrama zračenja usmjerava se prema određenom smjeru upravljanjem fazom i amplitudom svakog antenskog elementa u nizu. Ovaj fenomen naziva se konstruktivna interferencija u prednjem valu. Slika 3.1 prikazuje tipičan primjer oblikovanja snopa u slučaju mobilne tehnologije.



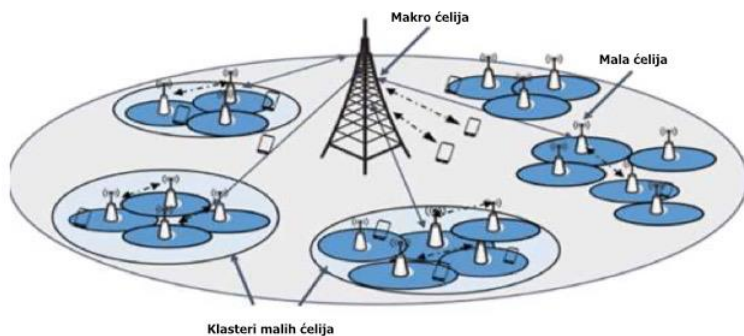
Slika 3.1. Oblikovanje snopa unutar ćelije

### 3.2.2. Male ćelije

Bazne stanice za male ćelije su manje i jeftinije od ćelijskih tornjeva. Mogu se instalirati na raznim područjima, što dovodi više baznih stanica bliže korisnicima. Veliki broj baznih stanica povećava broj ljudi koje mreža može podržati, povećavajući propusnost mreže, odnosno brzinu prijenosa po jedinici površine pokrivanja signalom. Tehničko rješenje iza ove ideje naziva se tehnologija malih ćelija. "Male ćelije" je opći pojam za ćelije radijskog pristupa koje kontrolira operator i imaju domet između deset i nekoliko stotina metara, uključujući licencirane i nelicencirane (WiFi) ćelije.

Primjer postavljanja malih ćelija prikazan je na slici 3.1. S malim ćelijama, veličina ćelije je smanjena, što znači da je bazna stanica bliža korisniku. Osim toga, veći broj niskoenergetskih prijenosnih točaka omogućava bolje korištenje dostupnih frekvencijskih resursa. Nadalje, 5G sustav će biti izgrađen u heterogenom stilu, gdje se makro- i male ćelije nalaze na istom mjestu ili su povezane bežičnim povratnim vezama, čime se osigurava povećana razina kapaciteta mreže putem preusmjerenja prometa. Međutim, heterogenost malih ćelija u mreži predstavlja izazove u smislu upravljanja mobilnošću. Ove će se probleme trebati rješavati u budućim istraživanjima. Neka druga trenutna istraživanja o malim ćelijama za 5G uključuju ravnotežu opterećenja, bežično povratno povezivanje, mmWave i masivni MIMO u malim ćelijama, itd. [8]





Slika 3.1. Ilustracija postavljanja malih ćelija. [8]

### 3.2.3. D2D komunikacija

Komunikacija uređaja do uređaja D2D je sve više prisutan trend u "pametnim" sustavima i IoT uređajima koji komuniciraju i dijele podatke i znanje te na temelju toga potencijalno djeluju. Računalstvo u magli (eng. *fog computing*) primjerice se temelji na komunikaciji IoT uređaja i dijeljenju podataka.

Klijenti 5G mreže mogu izravno komunicirati s drugim klijentima 5G mreže, zaobilazeći mrežu mobilnog operatera. Time se prebacuje promet s mobilnih mreža i smanjuju se troškovi.

Primjeri upotrebe uključuju:

- V2X - komunikacija vozila s vozilima
- Hitni signali između vozila i jedinica uz cestu

### 3.2.4. Milimetarski valovi

Milimetarski valovi odnose se na frekvencije koje počinju od 24 GHz i više slika 3.4.. MmWave pojasevi imaju niski domet signala, ali nude iznimno visoku propusnost i visoke brzine. 5G mmWave ima ogroman potencijal u primjenama kao što su:

- Povezana vozila
- Pametni gradovi i IoT
- Bolnice i hitni odgovor
- Škole i sveučilišta



Slika 3.4. Prikaz 5G spektra [9]

Mreže koje koriste 5G mmWave mogu očekivati brzine puno veće od 4G mreža, na udaljenosti od otprilike 300 metara od bazne stanice. Organizacije koriste mrežu malih ćelija kako bi proširile mmWave signale izvan ove granice kada je to potrebno. 5G male ćelije su ključne za poboljšanje pokrivenosti, kapaciteta i gustoće mmWave mreža.

**Prednosti mmWave tehnologije:**

- Veći kapacitet mreže, do 20 Gbps.
- Smanjena latencija mreže i povećane brzine prijenosa podataka.
- Veliki kapacitet mreže za povezivanje većeg broja uređaja i pretplatnika.
- Smanjeni troškovi infrastrukture, što bi trebalo smanjiti trošak po povezivanju u mrežu.
- Širi raspon frekvencijskih pojaseva povećava kapacitet mreže.

**Nedostaci mmWave tehnologije:**

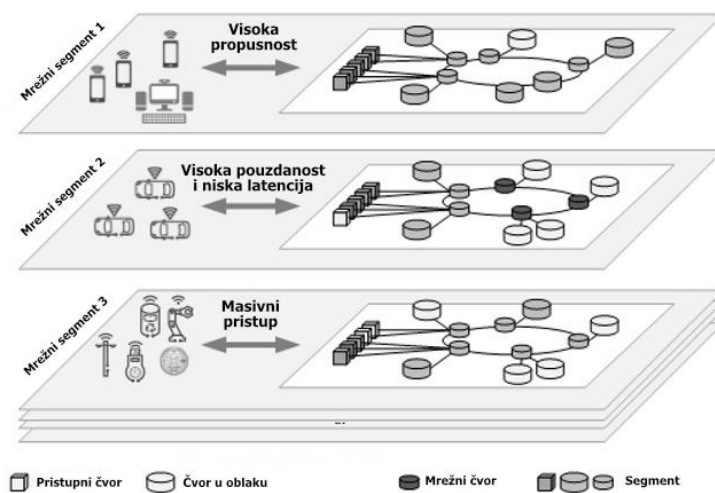
- Više frekvencije radio valova imaju smanjeni domet do oko 300 metara.
- Manje veličine ćelija za pokrivenost, povećan broj antena ćelija.
- Slaba penetracija prepreka, klijenti moraju biti gotovo u vidnom polju (eng. *line-of-sight*).

Pokazalo se da su veliki antenski nizovi i RF usmjeravanje snopa neophodni za nadoknadu velikih gubitaka signala u FR2 opsegu. Ove tehnike omogućuju efikasno korištenje radio frekvencijskih resursa i smanjuju troškove. Da bi se zadržala pouzdanost u privatnim 5G mrežama, posebno u zahtjevnim industrijskim scenarijima smanjenje samo-inducirane interferencije (SI) i interferencije između korisnika (*co-channel interference* – CCI) postalo je ključno kako bi se osigurala pouzdana komunikacija i brza razmjena podataka. Efikasno upravljanje CCI postignuto je putem politike alokacije korisnika i visoko usmjerenih snopova formiranih RF usmjeravanjem. Ovo omogućuje visoko pouzdane usluge ultra-niske latencije i pouzdanosti (URLLC). [25]

### 3.2.5. Mrežno segmentiranje

Mrežno raslojavanje (eng. *Network slicing*) odnosno mrežno segmentiranje nova je arhitektura mreže koja omogućuje stvaranje više logičkih mreža na istoj zajedničkoj mrežnoj infrastrukturi. Svaka logička mreža služi određenoj vrsti usluge ili industrijskom korisniku. Svaki segment mreže može fleksibilno definirati svoju logičku topologiju, zahtjeve za ugovor o razini usluge (*Service-Level Agreement - SLA*), pouzdanost i razinu sigurnosti kako bi zadovoljio diferencirane zahtjeve različitih usluga, industrija ili korisnika.

Mrežno segmentiranje omogućuje telekomunikacijskim operaterima smanjenje troškova izgradnje više privatnih mreža i pružanje iznimno fleksibilnih mrežnih usluga koje se mogu raspoređivati i dodjeljivati prema zahtjevima usluga. Time se poboljšava vrijednost mreže i sposobnost monetizacije operatera te olakšava digitalna transformacija različitih industrija.



3.4 Primjer mrežnog segmentiranja [10]

### 3.3. Arhitektura 5G mreže

Postoje dva standardna pristupa razvoju 5G mreža: Samostalni (eng. *StandAlone* -SA) i Nesamostalni (eng. *Non-StandAlone* - NSA). Ovi pristupi uključuju integraciju različitih generacija radio pristupnih tehnologija.

**Samostalni (SA):** U ovom pristupu se koristi samo jedna radio pristupna tehnologija. Samostalna 5G mreža (5GC) i 5G "New Radio" (NR) se neovisno implementiraju bez oslanjanja na prethodne generacije. Samostalna 5G tehnologija omogućuje puni potencijal 5G mreže, uključujući napredne značajke i mogućnosti. Pruža potpuni 5G sustav od početka do kraja.

**Nesamostalni (NSA):** Nesamostalni pristup omogućuje integraciju više radio pristupnih tehnologija. Kombinira postojeću 4G (LTE) infrastrukturu s 5G NR-om kako bi pružio poboljšanu povezanost i usluge. U nesamostalnom pristupu, 5G NR pruža dodatni sloj pokrivenosti i kapaciteta uz oslanjanje na postojeću 4G infrastrukturu za funkcionalnosti jezgre mreže. Ovo omogućuje rani uvod 5G tehnologije uz iskorištavanje postojeće 4G infrastrukture. Nesamostalna implementacija služi kao prelazni korak prema postizanju potpuno samostalnog 5G sustava. Omogućuje glatki prijelaz između 4G i 5G tehnologije tako što koristi postojeće mrežne resurse dok postupno uvodi nove 5G mogućnosti. Ovaj pristup osigurava kompatibilnost unatrag i olakšava široku usvajanje 5G tehnologije.

Ova dva pristupa pružaju fleksibilnost pri implementaciji 5G mreža. Izbor između ovih pristupa ovisi o faktorima poput mrežnih zahtjeva, dostupne infrastrukture i željenog vremenskog okvira za implementaciju 5G usluga.

#### 3.3.1 Samostalna 5G mreža (SA)

3GPP je završio standard za SA 5G NR 2018. godine, koja će raditi zajedno s NSA 5G NR tehnologijom. Neovisna 5G NR će imati novu krajnju arhitekturu koja će koristiti mm-valove i sub-GHz frekvencije. Ovaj način neće koristiti postojeću 4G/LTE infrastrukturu.

Neovisna 5G NR će omogućiti poboljšane mobilne širokopojasne veze (eMBB), ultra-pouzdanu komunikaciju niske latencije (URLLC) te masovnu komunikaciju strojeva (mMTC) kako bi omogućila više-gigabitne brzine prijenosa podataka uz poboljšanu učinkovitost i smanjene troškove. Ima novo 5G zračni sučelje, New Radio (NR), te 5G jezgru (5GC). Neovisna 5G mreža korisniku pruža krajnje 5G iskustvo. Neovisna mreža će i dalje surađivati

s postojećom 4G/LTE mrežom kako bi osigurala kontinuitet usluge između dviju generacija mreža.



Slika 3.4. 5G SA mrežna arhitektura [14]

Kao što je prikazano na slici 3.4, 5G mreža može samostalno djelovati. Istovremeno, odvija se interoperabilnost s LTE mrežom kako bi se pokrila područja koja još nisu pokrivena 5G mrežom te kako bi se povezali korisnici 5G s korisnicima koji ne koriste 5G tehnologiju.

[11]

### 3.3.2. Nesamostalna 5G mreža (NSA)

*Non-standalone* (NSA) 5G mreža odnosi se na postojanje samo 5G NR ćelija uz EPC kao jezgrena mreža. Kod implementacije 5G NSA ćelije operatori se u potpunosti oslanjaju na postojeću LTE mrežu za sve kontrolne funkcije i dodatne usluge. Arhitektura NSA 5G radi u strukturi nadređeni-podređeni, pri čemu je 4G pristupna bazna stanica nadređeni, a 5G pristupna bazna stanica podređeni entitet, koristeći 4G EPC s 5G NodeB (gNB). Ova opcija je najpopularnija među mobilnim operaterima koji žele brzo implementirati 5G brzine koristeći postojeće LTE implementacije. Međutim, NSA Opcija 3 ne omogućava prave 5G NR funkcionalnosti, kao što su raslojavanje mreže URLLC i podršku visokom kapacitetu za IoT, poput mMTC. [11]



Slika 3.5. 5G NSA arhitektura [14]

### 3.4. Novi radio pristupni mrežni sustav (NR RAN)

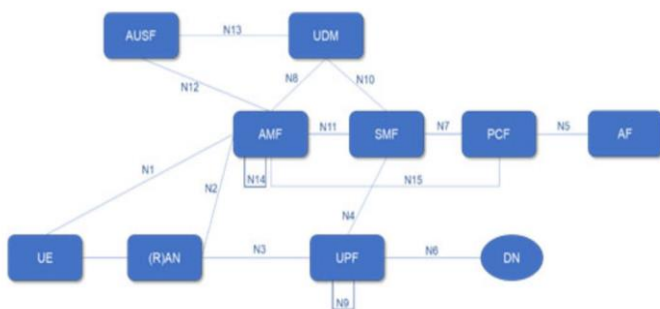
NR RAN je skraćena koja označava radio pristupnu mrežu nove generacije. U 5G arhitekturi, radio pristupna mreža (RAN) je odgovorna za povezivanje korisničkih uređaja, kao što su pametni telefoni i uređaji Internet stvari (IoT), sa jezgrom mreže. NR RAN se posebno odnosi na komponentu radio pristupne mreže koja se zasniva na standardu New Radio (NR), koji je standard za bežično sučelje u 5G mrežama.

NR RAN uključuje bazne stanice, poznate kao gNodeB-ovi (gNB-ovi), koji šalju i primaju bežične signale sa korisničkih uređaja. Ove bazne stanice komuniciraju sa jezgrom 5G mreže kako bi omogućile povezivanje i podržale različite 5G funkcionalnosti kao što su visoke brzine prijenosa podataka, niska latencija, povezivanje velikog broja uređaja i mrežno segmentiranje.

NR RAN donosi niz unaprjeđenja u odnosu na prethodne generacije bežičnih mreža. To uključuje korištenje viših frekvencijskih opsega, širi opseg propusnosti, napredne tehnologije antena poput Massive MIMO kao i podršku za samostalni (SA) i nesamostalni (NSA) način implementacije.

### 3.5. 5G jezgra (5GC)

5G jezgra, također poznata kao 5G Core Network ili 5GC, odnosi se na centralni dio arhitekture 5G mreže. Odgovorna je za upravljanje i kontrolu cjelokupnog rada 5G mreže, omogućavajući napredne značajke i usluge koje pruža 5G tehnologija.



Slika 3.2. Ne - roaming 5G arhitektura sustava [14]

5G jezgra mreže osmišljena je da bude fleksibilnija, skalabilnija i učinkovitija u usporedbi s prethodnim generacijama jezgara mreže. Temelji se na arhitekturi usmjerenoj na usluzi (*Service Based Architecture – SBA*) i koristi princip virtualizacije funkcija mreže

(*Network functions virtualization - NFV*) i mrežnog definiranja softvera (*Software Defined Network - SDN*) kako bi omogućila dinamičko pružanje usluga i raspodjelu resursa.

Glavne komponente 5G jezgre mreže uključuju:

1. Funkcija pristupa i mobilnosti (*Access and Mobility Management Function - AMF*): Ova komponenta upravlja registracijom, autentifikacijom i mobilnošću uređaja korisnika (UE) unutar 5G mreže. Obrađuje funkcije poput upravljanja sesijom, upravljanja mobilnošću i uspostave veze.
2. Funkcija korisničkog područja (*User Plane Function - UPF*) je odgovorna za obradu paketa podataka u korisničkom području, uključujući usmjernje, prosljeđivanje i upravljanje prometom. Osigurava učinkovitu dostavu podataka između UE-a i vanjskih mreža.
3. Funkcija upravljanja sesijom (*Session Management Function - SMF*) je odgovorna za upravljanje sesijama između UE-a i 5G mreže. Upravlja uspostavom, izmjenom i završetkom sesija. Također pruža provođenje pravila politike i upravljanje kvalitetom usluge (*Quality of Service - QoS*).
4. Funkcija kontrole politike (*Policy Control Function - PCF*) upravlja pravilima politike i kvalitetom usluge za različite usluge i aplikacije u 5G mreži. Osigurava pravilnu raspodjelu mrežnih resursa na temelju zahtjeva usluga i korisničkih postavki.
5. Funkcija odabira mrežnog segmenta (*Network Slice Selection Function - NSSF*) je odgovorna za odabir i dodjelu mrežnih segmenata UE-ima na temelju njihovih zahtjeva za uslugama. Segmentacija mreže omogućava stvaranje virtualnih mrežnih instanci prilagođenih određenim aplikacijama, pružajući prilagođeno povezivanje i karakteristike performansi.
6. Funkcija autentifikacije poslužitelja (*Authentication Server Function - AUSF*) obrađuje autentifikaciju i sigurnosne funkcije u 5G mreži. Provjerava autentičnost UE-a i pruža potrebne sigurnosne podatke za sigurnu komunikaciju.

Ovo su samo neke od komponenti unutar 5G jezgre mreže. Arhitektura je dizajnirana da bude modularna i fleksibilna, omogućavajući uvođenje novih mrežnih funkcija i usluga kako se 5G tehnologija razvija.

## 4. PRIVATNA 5G MOBILNA MREŽA

Privatna 5G mreža predstavlja zatvorenu mobilnu mrežu koja se izgrađuje i održava lokalno za potrebe neke specifične organizacije, tvrtke ili društva. Ne oslanja se na javno dostupne komercijalne mreže dostupne velikom broju korisnika.

Privatne 5G mreže nude veću pouzdanost i sigurnost u odnosu na komercijalne 5G mreže jer omogućuju potpunu kontrolu nad sigurnosti mreže tj. same organizacije mogu postaviti stroge sigurnosne politike te nadzor na mrežom, što omogućuje zaštitu osjetljivih podataka te veću pouzdanost u obavljanju kritičnih operacija.

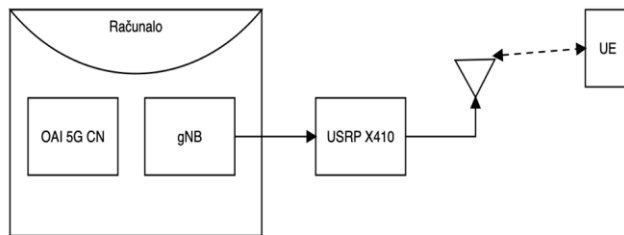
Jedna od glavnih značajki privatne 5G mreže je fleksibilnost upravljanja resursima. To bi značilo da je kritičnim operacijama moguće dati više resursa. Također se može optimizirati potrošnja resursa prema trenutačnim potrebama. Uz to privatna 5G mreža donosi i mogućnost manje latencije između korisnika, odnosno uređaja u mreži ili kontrolnog centra u slučaju nekih automatiziranih sustava.

### 4.1. Izvedba privatne 5G SA mobilne mreže primjenom programski definiranog radio uređaja

U sklopu praktičnog dijela ovog diplomskog rada, provedena je izvedba funkcionalne privatne 5G SA (Standalone) mreže, koristeći programski definirani radio uređaj i otvorene kodove za *New Radio Radio Access Network* (NR RAN) te za *5G SA Core Network* (CN). Osim otvorenih kodova, u izvedbi su korištene i dodatne ključne komponente, uključujući mobilni uređaj OnePlus 10T Pro 5G i prijenosno računalo MSI Stealth GS66 12UHS-091. Dodatno, Sysmocom programirane SIM kartice su korištene kako bi se omogućila autentifikacija uređaja u privatnu 5G mrežu. Prije nego što je mobilni uređaj mogao uspostaviti vezu s 5G mrežom, bilo je potrebno osigurati super admin ovlasti na uređaju. Nadalje, za analizu performansi privatne 5G mreže korištena je *Network Signal Guru* aplikacija. U nastavku, bit će detaljno opisan postupak instalacije i pripreme prijenosnog računala za rad s privatnom 5G mrežom, uključujući konfiguraciju mrežnih postavki, te postupak spajanja mobilnog uređaja na izrađenu privatnu 5G mrežu. Sve navedene aktivnosti i koraci bit će analizirani kako bi se omogućilo dubinsko razumijevanje procesa izvedbe privatne 5G SA mreže, pružajući temelj za daljnje istraživanje i implementaciju ovih mreža u različitim kontekstima i industrijama.



Na slici 4.1. prikazana je arhitektura izvedbe privatne 5G mreže koja je napravljena u ovom diplomskom radu.



Slika 4.1. Arhitektura privatne 5G mreže

Izgrađena na temelju 5G tehnologije, privatna 5G mreža je lokalna bežična mreža za posebnu povezanost unutar određenog područja. Bitno je napomenuti da ju vlasnik može potpuno kontrolirati, uključujući prioritete, resurse i sigurnost. Ova mreža omogućuje korisnicima iz poduzeća da definiraju svoje sigurnosne strategije i čuvaju osjetljive podatke lokalno. Za razliku od Ethernet, privatna 5G mreža eliminira potrebu za skupom i nepraktičnom žičanom opremom, a omogućuje povezivanje velikog broja uređaja u dinamičnom okruženju. U usporedbi s privatnim LTE mrežama, privatne 5G mreže pružaju fleksibilnost u korištenju spektra, visoke brzine prijenosa podataka, nisku latenciju, pouzdanost i masovnu povezanost. [27]

#### 4.1.1 Programski definiran radio uređaj

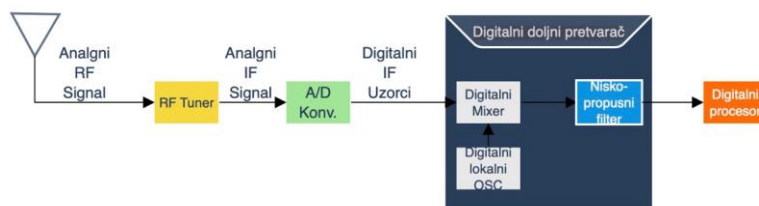
Programski definiran radio (*eng. Software Defined Radio - SDR*) je vrsta radijskog uređaja koji omogućuje fleksibilnu i prilagodljivu obradu i generiranje radijskih signala putem odgovarajućeg računalnog programa koji se može mijenjati i prilagođavati potrebama. Tradicionalni radijski uređaji obično koriste fiksnu elektroniku i hardverski dizajn za obradu i generiranje signala za određene frekvencije ili protokole.

SDR uređaji, s druge strane, koriste općenitu radio frekvencijsku (RF) hardversku komponentu koja može prihvatiti širok spektar frekvencija i modulacija. Softver na SDR uređaju se zatim koristi za kontrolu i obradu RF signala te generiranje željenih signala. Ovo omogućuje vrlo visoku fleksibilnost i prilagodljivost uređaja, jer se može reprogramirati ili

konfigurirati za rad na različitim frekvencijama ili za različite komunikacijske protokole samo putem promjene softvera.

Jedna od upotreba SDR uređaja su programibilne mreže. Programibilne mreže su mreže u kojima se ponašanje mrežnih uređaja i upravljanje prometom obavlja pomoću softvera koji je neovisan o mrežnom hardveru. Dvije glavne tehnologije koje omogućuju programibilnost mreža: programski definirane radio stanice (SDR) i programski definirane mreže (SDN). SDR uređaju omogućuju programibilnost mrežnih uređaja za prijenos podataka, dok SDN omogućuje programibilnost upravljanja mrežnim prometom. Razvoj ovih tehnologija ključan je stvaranje budućih programibilnih mreža. [29]

SDR uređaji se koriste u različitim aplikacijama, uključujući vojne komunikacije, bežične mreže, radioamaterizam, istraživanje spektra, radioastronomiju i mnoge druge. Ova tehnologija omogućuje brzu prilagodbu na promjenjive potrebe u komunikacijama i radijskim sustavima te je postala ključna komponenta modernih radijskih sustava.



Slika 4.2. Pojednostavljeni blok dijagram prijelnika programski definiranog radio uređaja

U pojednostavljenom obliku prijelnika prikazanog na slici 4.2. vide se sljedeći dijelovi:

1. **RF Tuner** se koristi za podešavanje željene frekvencije pomoću pojasnog propusnika (*Band-pass filter*). On sprječava neželjene signale s ulaza i dopušta samo određeni frekvencijski pojas da prođe na sljedeću fazu. Obično sadrži mješać i lokalni oscilator.
2. **Analogno-digitalni pretvarač (ADC)** se koristi za pretvaranje analognih signala primljenih s antene/tunera u digitalni oblik.
3. **Digitalni pretvarač prema dolje (DDC)** ima digitalni signalni mješać, digitalni oscilator i nisko propusni filter (*Low-pass Filter - LPF*).

4. **Digitalni signalni procesor (DSP)** jedinica dalje obrađuje digitalne signale priprema ih za dekodiranje/demodulaciju.

Jedan od glavnih dijelova SDR-a je računalo. Računalo se koristi se za obradu dolaznih radio signala i slanje radio signala. Softver koji se izvodi na računalu koristi se za kontrolu radija i sve postavke koje se konfiguriraju na radiju. Računalni program je zapravo taj koji omogućava rad softverski definiranog radija.

Programski definirani radio uređaji mogu se razlikovati po raznim karakteristikama i specifikacijama, ovisno o primjeni i namjeni. Ključne karakteristike po kojima se razlikuju programski definirani radiji su:

1. **Frekvencijski raspon:** SDR uređaji se razlikuju po frekvencijskom rasponu koji pokrivaju. Neki su dizajnirani za rad na nižim frekvencijama (npr. HF, VHF, UHF), dok su drugi sposobni za rad na višim frekvencijama (npr. GHz opsezi).
2. **Broj prijemnih i odašiljačkih kanala:** SDR uređaji mogu imati različit broj prijemnih i odašiljačkih kanala. Više kanala omogućuje paralelno praćenje ili generiranje više signala.
3. **Brzina uzorkovanja:** Brzina uzorkovanja određuje koliko podataka SDR može obraditi u sekundi. Veća brzina uzorkovanja omogućuje bolju preciznost i veći raspon frekvencija.
4. **Rezolucija A/D pretvarač:** Rezolucija A/D pretvarača utječe na kvalitetu digitalizacije RF signala. Veća rezolucija omogućuje bolju preciznost pri digitalizaciji analognog signala.
5. **Procesorska snaga:** SDR uređaji se razlikuju po svojoj procesorskoj snazi. Snaga procesora može utjecati na brzinu obrade signala i sposobnost uređaja za složene obrade.
6. **Sučelja i konektori:** SDR uređaji imaju različite vrste sučelja i konektora za povezivanje s računalima ili drugim uređajima kao što su USB, Ethernet, SFP.
7. **Podrška za softverske platforme:** SDR uređaji zahtijevaju programsku podršku za njihovu konfiguraciju i upravljanje. Različiti uređaji podržavaju različite programske platforme, kao što su GNU Radio, MATLAB, ili vlastiti softver proizvođača.

Prethodno navedene karakteristike značajno utječu na cijenu uređaja. Prilikom odabira programski definiranog uređaja, važno je uzeti u obzir specifične potrebe u primjenu, kako bi

se odabrao uređaj s odgovarajućim karakteristikama i specifikacijama za zahtjeve krajnje upotrebe.

Prilikom izvedbe privatne 5G mreže u ovom diplomskom radu korišten je SDR USRP X410 (Slika 4.3.) od tvrtke National Instruments. Glavne značajke X410 su:

1. Frekvencijski raspon od 1 MHz do 7,2 GHz
2. 4 prijemna i 4 odašiljačka kanala
3. 12 bitni ADC i 14 bitni DAC
4. Maksimalna brzina uzorkovanja je 500 MS/s
5. Dvije QSFP28 priključnice

Prilikom odabira uređaja presudno je bilo odabrati uređaj s 4 prijemna i 4 odašiljačka kanala što omogućuje primjenu 4x4 MIMO sustava, te brzina uzorkovanja koja omogućava širinu kanala 100 MHz.



Slika 4.3. NI USRP X410 [15]

Instalacija potrebnih biblioteka se izvodi u sljedećim koracima:

- **Instalacija ovisnosti:**

```
$ sudo apt-get install autoconf automake build-essential ccache cmake cpufrequtils doxygen  
ethtool g++ git inetutils-tools libboost-all-dev libncurses5 libncurses5-dev libusb-1.0-0  
libusb-1.0-0-dev libusb-dev python3-dev python3-mako python3-numpy python3-requests  
python3-scipy python3-setuptools python3-ruamel.yaml
```

- **Dohvaćanje koda:**

```
$ git clone https://github.com/EttusResearch/uhd.git
```

- **Uputstva za izgradnju i instalaciju:**

```
$ cd uhd/host/  
$ mkdir build  
$ cd build  
$ cmake ../  
$ make $(nproc)  
$ sudo make install
```

#### 4.1.2. Kod za radio pristupni mrežni sustav

Razvojem procesora, osobnih računala i softverski definiranih radio uređaja otvorila se mogućnost da se kompletan RAN prebaci na računalo tj. da gNB bude softverski definiran. Postoji više rješenja korištenja softverski definiranog radija ne samo u 5G-u nego i u 4G mrežama. U ovom radu se predlaže i dizajnira otvoreni RAN- zasnovan na SDR-u, kompatibilan, skalabilni i visoko fleksibilan. Glavna karakteristika predloženog RAN-a je sposobnost rekonfiguracije programske podrške i sklopovlja s minimalnim promjenama, brzi razvoj i stabilnost.

Uz otvorene kodove postoje i druga, plaćena rješenja temeljena na SDR uređajima koja mogu u isto vrijeme raditi kao 5G i kao 4G mreža. Takvo jedno rješenje donosi tvrtka „Amarisoft“ koja za 4G-CA, kada je 1 UE aktivan, postiže maksimalnu brzinu prijenosa podataka od 883 Mb/s u DL i 65.8 Mb/s u UL kada se koristi agregirana propusnost od 100 MHz. U istom okruženju agregirane propusnosti, 5G-SA postiže brzine prijenosa podataka od 762 Mb/s u DL i 92.6 Mb/s u UL. Ako se koristi šest prijenosnih frekvencija u 4G NIB-u, može se postići brzina prijenosa podataka u DL od 1062 Mb/s. [28]

U ovom diplomskom radu koristi se otvoreni kod nazvan "SRS project," koji je razvila tvrtka *Software Radio Systems Limited* (SRS) [15]. SRS projekt obuhvaća kompletan izvorni kod za mrežni sustav, uključujući prvi, drugi i treći sloj mreže, te je potpuno dostupan na platformi GitHub [16]. Unatoč tome što je projekt još uvijek u razvoju, osnovne funkcionalnosti za mrežni rad su već implementirane, što ga čini pogodnim za korištenje u ovom diplomskom radu.

Prednost ovog rješenja leži u njegovoj kompatibilnosti s različitim procesorskim arhitekturama, uključujući x86 i ARM. Također, kod je optimiziran za izvođenje na Linux platformi i podržava različite distribucije kao što su Ubuntu, Fedora i Arch Linux. Proces prevođenja koda i instalacija su jednostavni te su detaljno dokumentirani [18].

Osim toga, SRS projekt je kompatibilan s različitim softverski definiranim radijskim implementacijama koje koriste UHD (*Universal Hardware Driver*) upravljački programa razvijenog od strane tvrtke Ettus koji je također otvoreni kod[19].

Ova fleksibilnost i dostupnost čine SRS projekt izvrsnim izborom za implementaciju mrežnog pristupnog sustava u sklopu ovog diplomskog rada.

Trenutno implementirane funkcionalnosti i mogućnosti:

- FDD/TDD na cijelom FR1 frekvencijskom spektru
- 15/30 KHz razmaci podnosilaca
- Svi fizički kanali uključujući PUCCH Format 1 i 2
- Visoko optimizirani LDPC i Polarni koder i dekodeer za ARM Neon i x86 AVX2/AVX512
- Sve RRC procedure isključujući primopredaju
- Sve MAC procedure isključujući kontrolu snage
- Maksimalna modulacija 256QAM
- 4x4 MIMO
- Mrežno segmentiranje [16]

Instalacija programa za RAN izvodi se u sljedećim koracima:

- **Instalacija ovisnosti:**

```
$ sudo apt-get install cmake make gcc g++ pkg-config libfftw3-dev libmbedtls-dev libsctp-dev libyaml-cpp-dev libgtest-dev
```

- **Dohvaćanje:**

```
$ git clone https://github.com/srsran/srsRAN_Project.git
```

- **Izgradnja i instalacija koda:**

```
$ cd srsRAN_Project
$ mkdir build
$ cd build
$ cmake ..
```

```
$ make $(nproc)
$ make testa
$ make install
```

Program se instalira pod nazivom „gnb“, a u datoteci „configs“ nalaze se primjeri konfiguracije.

#### 4.1.3. Kod za 5G jezgru

Za izvedbu 5G SA jezgre korišten je OpenAirInterface (OAI) 5G CN kod, koji je 3GPP kompatibilna 5G SA jezgra s otvorenim kodom. OAI 5G CN je dizajniran i implementiran na fleksibilan način kako bi se lako prilagodio različitim 5G slučajevima korištenja. Ovaj alat je koristan za istraživače, edukacijske potrebe i industrijske korisnike koji žele razvijati i testirati 5G tehnologije s malim prilagodbama, te je također prikladan za upotrebu u privatnim 5G mrežama. OAI 5G CN omogućava izgradnju prototipova 5G mreža, testiranje novih 5G usluga i istraživanje novih 5G tehnologija. Iako je još uvijek u razvoju, OAI 5G CN je već postigao značajan napredak. Softver je potpuno funkcionalan i podržava širok raspon 5G slučajeva korištenja, a OAI zajednica kontinuirano radi na njegovom poboljšanju i razvoju novih značajki.[20]

Kako bi podržali raznolike usluge koje se planiraju za 5G, a koje imaju različite zahtjeve za performansom, OAI 5GC kod je dizajniran s arhitekturom usmjerenom na usluge, usvojivši novu 3GPP definiranu arhitekturu temeljenu na uslugama (*Service Based Architecture* – SBA). [20]

Trenutna verzija OAI 5G CN-a je v1.4.0 i implementira sljedeće mrežne funkcije: AMF, SMF, UPF, NRF, AUSF, UDM, UDR, NSSF, koje su detaljno opisane u 3.5. poglavlju ovog diplomskog rada. Implementacija OAI 5G CN-a temeljito je testirana i potvrđena s raznim testerima, izvedbama gNB i različitim komercijalno dostupnim uređajima. OAI 5G CN podržava osnovne postupke za povezivanje, registraciju (registraciju UE uređaja, odjavu i zahtjev za uslugu) te upravljanje sesijama (uspostavu, izmjenu i prekidanje PDU sesija). Također podržava neke dodatne značajke, kao što su N2 prijenos, pozivanje i djelomičnu podršku za segmentiranje mreže. Važno je napomenuti da OAI 5G CN može podržavati više UE uređaja i više PDU sesija istovremeno. [20]

Projektni kod je fleksibilan, potpuno otvoren i dostupan na platformi GitLab. Može se implementirati kao virtualizirana verzija uz pomoć Docker virtualizacije, gdje svaka mrežna funkcija predstavlja jedan Docker kontejner ili kao da se svaka mrežna funkcija instalira kao aplikacija. Prilikom izvedbe privatne mreže, preferirana je izvedba u obliku Docker kontejnera jer omogućava jednostavnije i fleksibilnije promjene u kodu, prijenos i pokretanje.

Izvedba OAI 5G CN-a u obliku Docker kontejnera pruža brojne prednosti, uključujući:

- **Fleksibilnost:** Svaka mrežna funkcija predstavlja zaseban Docker kontejner, što omogućava brzu i jednostavnu konfiguraciju, skaliranje i upravljanje pojedinim funkcijama.
- **Izolacija:** Svaka funkcija je izolirana u svom vlastitom kontejneru, što pomaže u sprečavanju konflikata i olakšava upravljanje resursima.
- **Reprodukcija:** Docker omogućava lako reproduciranje okoline za testiranje i razvoj, što je važno za osiguravanje dosljednih rezultata tijekom razvoja i testiranja.
- **Brzina razvoja:** Brzina razvoja i ispitivanja novih značajki ili promjena u kodu olakšana je brzim stvaranjem i pokretanjem kontejnera.
- **Skaliranje:** Kontejneri omogućavaju jednostavno skaliranje mrežnih funkcija prema potrebi, što je posebno važno za mreže s visokim opterećenjem.

Korištenje Docker virtualizacije također olakšava implementaciju privatnih 5G mreža jer omogućava brže uvođenje promjena, a fleksibilnost kontejnera olakšava prilagodbu mreže specifičnim zahtjevima korisnika.

Instalacija se izvodi se u sljedećim koracima:

- **Instalacija programske podrške:**

```
$ sudo apt-get install docker-ce docker-ce-cli containerd.io docker-buildx-plugin docker-compose-plugin
```

- **Dohvaćanje:**

```
$ git clone https://gitlab.eurecom.fr/oai/docker-image-oai5g.git
```

- **Izgradnja i instalacija koda:**

```
$ cd docker-image-oai5g  
$ docker load -i oai_5g.tar
```



#### 4.1.4. Izvedba privatne 5G mobilne mreže

Za izvedbu privatne 5G mreže potrebno je koristiti programibilne SIM kartice. U ovoj izvedbi korištene SIM kartice su sysmoISIM-SJA2 [21].

Prilikom programiranja SIM kartice korišten je program pySim.py [22].

SIM kartice se programiraju na sljedeći način:

```
$ sudo ./pySim-prog.py -p0 -x MCC -y MNC -a ADM -s ICCID -i IMSI -k Ki -o OPc
```

Prilikom kupovine SIM kartica dobije se tablica u kojoj se pronade admin ključ (ADM) koji je potreban za otključavanje mogućnosti programiranja SIM kartice te je također potrebno iščitati ICCID. Da se pronade koja se SIM kartica programira te odgovarajući admin ključ s SIM kartice iščita se IMSI (Slika 4.4.)



Slika 4.4. Prikaz IMSI broja na SIM kartici

MCC i MNC definirani su postavkama mreže i u ovom diplomskom radu korišteni su:

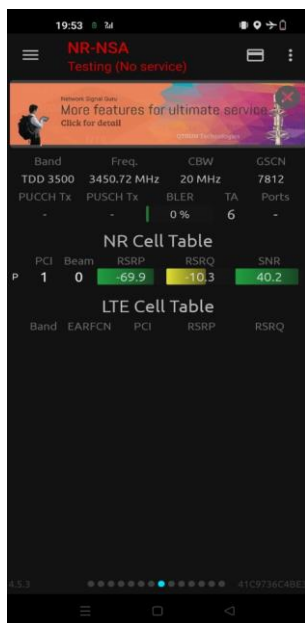
- MCC=01
- MNC=001

IMSI, Ki i OPc su definirani u bazi podataka u jezgri 5G mreže i predstavljaju korisnički identitet na mobilnoj mreži. U 5G CN korisnički podaci se dodaju nakon pokretanja mreže i to spajanjem na bazu podataka koja je u slučaju OAI 5G CN SQL putem nekog od SQL editora kao što su SQL pro. Osnovno korisničko ime i zaporica za bazu su *root* i *test*. U ovom projektu korištene vrijednosti su:

- IMSI: 001010000000031

- Ki = 00112233445566778899aabbccddeeff
- OPc = 63bfa50ee6523365ff14c1f45f88737d

Uz SIM karticu za omogućavanje, za analizu je korišten program Network Signal Guru (NSG) (Slika 4.5). Za njegovu upotrebu potrebno je napraviti *jailbreak* telefona [23].



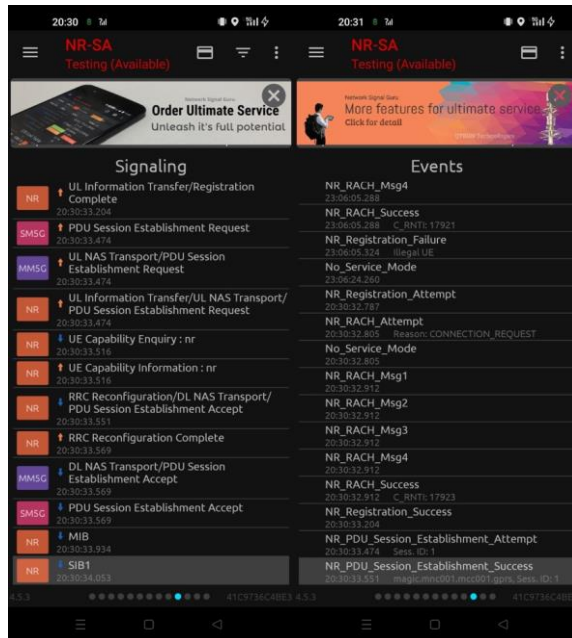
Slika 4.5. Prikaz izgleda NSG Aplikacije

Da bi se u aplikaciji omogućilo korištenje 5G mreže potrebno je u izborniku odabrati način rada 5G SA mode te je uređaj tada spreman za spajanje na mrežu.

Za ispravno konfiguriranje *gnb* aplikacije može se koristiti primjer koji dolazi s otvorenim kodom. U ovom slučaju potrebno je postaviti IP adresu od 5G CN-a te promijeniti vrstu radija te postaviti odgovarajući MCC, MNC i TAC što je vidljivo na Slici 4.6.





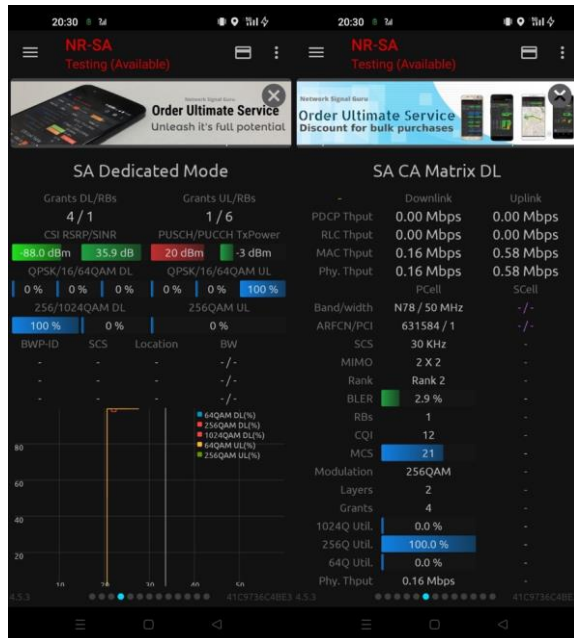


a) b)

Slika 4.10. Razmjena poruka između UE-a, gNB-a i 5G CN

Na Slici 4.10 prikazane su ključne interakcije između UE-a, gNB-a i 5G CN. Na Slici 4.10. (a), prikazana je uspješna razmjena kontrolnih poruka između UE-a i gNB-a. Konkretno, UE uspješno prima MIB (*Master Information Block*) i SIB (*System Information Block*) kontrolne pakete, što omogućava uspješnu registraciju na 5G mrežu. Tijekom ovog procesa, jasno je vidljiva razmjena RRC (*Radio Resource Control*) kontrolnih poruka, što označava uspostavu veze između UE-a i gNB-a. Nakon toga, ostvaruje se PDU (*Packet Data Unit*) veza, što predstavlja uspješno povezivanje UE-a na privatnu 5G mrežu.

Na Slici 4.10. (b), prikazani su ključni događaji tijekom uspostavljanja konekcije između UE-a i mreže. Ovdje su prikazani signalizacijski tokovi koje UE prima i šalje tijekom tog procesa. Slike su generirane korištenjem NSG aplikacije, koja pruža detaljan uvid u komunikaciju između uređaja i mrežnih elemenata u privatnoj 5G mreži.



a)

b)

Slika 4.11. Prikaz trenutne kvalitete signala i protoka podataka između UE-a i mreže

Slika 4.11. pruža prikaz evaluaciju kvalitete signala i trenutnog protoka podataka između UE-a i mreže. Ova vizualna reprezentacija nudi duboki uvid u ključne parametre snage signala i brzine prijenosa podataka koji se kontinuirano razmjenjuju između UE-a i mreže. Detaljni prikaz omogućuje analizu performansi veze i istovremeno olakšava procjenu kvalitete usluge koju privatna 5G mreža pruža korisnicima.

Unutar slike 4.11. (a), prikazan je graf koji dinamički prati odnos signala i šuma (SNR) tijekom vremena kada UE uspješno ostvaruje komunikaciju s mrežom. Osim toga, numerički prikazuje broj resursnih blokova koji su trenutno dodijeljeni UE-u za prijenos podataka, pružajući uvid u alokaciju resursa u mreži. Ovaj graf također nudi uvid u trenutni postotak modulacije signala, što je ključno za razumijevanje kvalitete prijenosa podataka.

Na slici 4.11. (b), detaljno se analizira tok podataka UL i od DL , omogućujući precizno praćenje brzine prijenosa podataka.

## 4.2 Usporedba učinka privatne 5G SA mreže i komercijalnih mreža

U ovom poglavlju su dani rezultati detaljne analiza učinka privatne 5G mreže variranjem različitih mrežnih parametara. Ključni fokus analize postavljen je na utjecaj promjene širine kanala, te je izrađena tablica s rezultatima kako bi se vizualizirala promjena u performansama mreže. Nakon provođenja mjerenja brzine putem mobilne aplikacije Speedtest [24], rezultati su grafički prikazani kako bi se jasnije prikazao utjecaj različitih parametara na performanse mreže. Osim varijacije širine kanala, također se analizira učinak MIMO tehnologije na kvalitetu signala i maksimalno ostvarenu brzinu prijenosa podataka u okviru privatne 5G mreže. Nakon mjerenja učinka privatne mreže rezultati su uspoređeni s rezultatima mreža nacionalnih operatera koji imaju 5G mrežu u RH. Treba napomenuti da u RH još uvijek komercijalno nije dostupna 5G SA mreža te su svi rezultati odrađeni na 5G NSA mrežama.

### 4.2.1. Učinak privatne 5G mreže s različitim parametrima

Prilikom mjerenja performansi privatne 5G mreže mijenjane su širine kanala, počevši od 20 MHz, zatim 40 MHz i na kraju 80 MHz širine kanala korištenjem 1x1 MIMO tehnologije. Nakon toga, korištenjem fiksne širine kanala od 50 MHz, provedena je usporedba između 1x1 MIMO i 2x2 MIMO konfiguracija kako bi se istražio utjecaj MIMO tehnologije na kvalitetu i performanse mreže. Radi pouzdanijih rezultata provedena su 3 mjerenja za svaku od konfiguracija.

Tablica 4.1. Rezultati mjerenja brzine prijenosa s različitim širinama kanala DL

	Brzine prijenosa u silaznoj vezi (DL)		
	Širina kanala		
	20 MHz	40MHz	80MHz
Mjerenje 1.	49,3 Mb/s	90,2 Mb/s	157 Mb/s
Mjerenje 2.	45,3 Mb/s	86,2 Mb/s	137 Mb/s
Mjerenje 3.	46,4 Mb/s	93,6 Mb/s	148 Mb/s
Prosjek	46,97 Mb/s	90 Mb/s	147,33 Mb/s

Tablica 4.2. Prikaz mjerenja s različitim širinama kanala UL

Brzine prijensa u uzlaznoj vezi (UL)			
	Širina kanala		
	20 MHz	40MHz	80MHz
Mjerenje 1.	18,6 Mb/s	42,3 Mb/s	70,8 Mb/s
Mjerenje 2.	18,7 Mb/s	41,3 Mb/s	60,5 Mb/s
Mjerenje 3.	18,8 Mb/s	42,2 Mb/s	65,5 Mb/s
Prosjek	18,7 Mb/s	41,93 Mb/s	65,6 Mb/s

U tablicama 4.1 i 4.2 vidljivo je kako veća širina kanala utječe na propusnost u mreži, što je i logično jer povećanjem širine kanala povećava se i kapacitet fizičkog linka. Povećanjem kapaciteta fizičkog linka, mreža postaje sposobna da se nosi sa većim opterećenjem i pruži bolje performanse, što doprinosi bržoj i efikasnijoj komunikaciji. Međutim veća širina kanala zahtijeva i kvalitetniju razinu signala što znači da se za istu odašiljačku snagu veći domet može dobiti s manjom širinom kanala nego s većom. To znači da će se primjenom kanala manjeg frekvencijskog opsega postići veća pokrivenost.



a) b) c)

Slika 4.12. rezultati mjerenja s različitim širinama kanala a) 80MHz, b) 40MHz, c) 20MHz



Tablica 4.3. Prikaz brzine prijenosa s 1x1 i 2x2 MIMO tehnologije u DL na 50MHz

Brzine prijenosa u silaznoj vezi (DL)		
	1x1 MIMO	2x2 MIMO
Mjerenje 1.	121 Mb/s	194 Mb/s
Mjerenje 2.	122 Mb/s	203 Mb/s
Mjerenje 3.	110 Mb/s	198 Mb/s
Prosjek	121 Mb/s	198.33 Mb/s

U tablici 4.3. vidi se utjecaj MIMO na brzinu prijenosa. MIMO jako utječe na brzinu prijenosa i daje oko 40% bolje performanse. To je zato što MIMO tehnologija koristi više antena na prijemu i odašiljaču. Ova dodatna antenska raznolikost omogućava bolje prihvaćanje signala te samim tim povećava kvalitetu signala što pridonosi većoj brzini. Različite antene mogu uhvatiti različite refleksije signala koje se odbijaju od prepreka, čime se poboljšava pouzdanost komunikacije. MIMO također pomaže u smanjenju međusobne interferencije između različitih korisnika ili uređaja koji koriste istu frekvenciju. Prilikom korištenja MIMO tehnologije signal je otporniji na šum i interferenciju te samim tim je i bolja kvaliteta samog signala.

#### 4.2.2. Usporedba privatne 5G SA mreže s komercijalnom 5G NSA mrežom

Usporedba privatne 5G SA mreže i komercijalne 5G NSA mreže predstavlja jedan od važnih dijelova ovog rada. U ovom dijelu su predstavljeni rezultati usporedbe brzine prijenosa u mrežama nacionalnih operatera u RH i privatne 5G SA mreže te neke ključne karakteristike, prednosti i ograničenja ove dvije različite vrste 5G mreža.

Privatna 5G SA mreža predstavlja potpuno samostalnu 5G infrastrukturu, koja ne ovisi od postojeće 4G mreže. Ova mreža omogućava organizacijama potpunu kontrolu nad svojom komunikacijskom infrastrukturom, što je od značaja u industrijama koje zahtijevaju visoku pouzdanost i nisku latenciju, kao što su proizvodnja, zdravstvo i autonomna vozila. Privatna 5G SA mreža pruža visoke brzine prijenosa podataka, nisku latenciju i povećanu sigurnost, što je čini privlačnom opcijom za organizacije koje žele optimizirati svoje interne komunikacije i procese.

Komercijalna 5G NSA mreža koristi postojeću 4G infrastrukturu kao osnovu i dodaje 5G radio mrežu za poboljšanje brzina i kapaciteta. Ova mreža je dostupna širokoj javnosti i

omogućava korisnicima pristup 5G uslugama putem standardnih mobilnih uređaja. Međutim, brzine i performanse komercijalne 5G NSA mreže mogu varirati u zavisnosti od opterećenja mreže i broja korisnika.

Mjerenja su odrađena u centru grada Osijeka te su korištene SIM kartice koje imaju mogućnost spajanja na 5G mreži. U tablici 4.4. su prikazani rezultati mjerenja brzine prijenosa komercijalnih 5G NSA mreža i privatne 5G SA mreže.

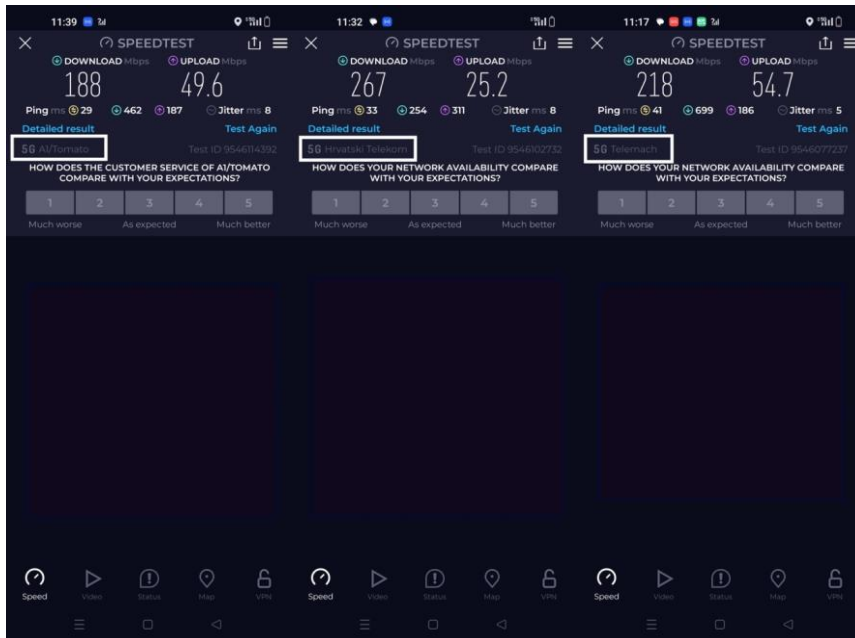
Tablica 4.4. Usporedba privatne 5G SA mreže s komercijalnom 5G NSA mrežom u DL

<b>Brzine prijenosa u silaznoj vezi (DL)</b>				
	<b>5G SA</b>	<b>A1</b>	<b>HT</b>	<b>Telemach</b>
Mjerenje 1.	267 Mb/s	188 Mb/s	267 Mb/s	218 Mb/s
Mjerenje 2.	274 Mb/s	200 Mb/s	280 Mb/s	230 Mb/s
Mjerenje 3.	280 Mb/s	189 Mb/s	245 Mb/s	270 Mb/s
Prosjek	273,67 Mb/s	192,33 Mb/s	264 Mb/s	239,33 Mb/s

Tablica 4.4. Usporedba privatne 5G SA mreže s komercijalnom 5G NSA mrežom u UL

<b>Brzine prijenosa u uzlaznoj vezi (UL)</b>				
	<b>5G SA</b>	<b>A1</b>	<b>HT</b>	<b>Telemach</b>
Mjerenje 1.	55 Mb/s	49,6 Mb/s	25,2 Mb/s	54,7 Mb/s
Mjerenje 2.	57 Mb/s	45,3 Mb/s	50 Mb/s	60 Mb/s
Mjerenje 3.	54 Mb/s	48,2 Mb/s	47,3 Mb/s	37,3 Mb/s
Prosjek	55,33 Mb/s	47,6 Mb/s	40,83 Mb/s	50,66 Mb/s

Iz dobivenih podataka jasno proizlazi da privatna 5G SA mreža pruža znatno bolje performanse u kontekstu brzine prijenosa podataka. Nadalje, rezultati mjerenja na komercijalnim 5G NSA mrežama pokazuju značajne promjene u performansama. Razlog tomu je u činjenici da su pri mjerenju brzine u privatnoj 5G SA mreži bio povezan samo jedan UE, koji je imao kompletan pristup mrežnim resursima. Nasuprot tome prilikom testiranja u komercijalnim mrežama svi korisnici koji su trenutno bili aktivni na ćeliji dijelili su zajednički medij te su samim tim brzine podložne osciliranju tijekom dana ovisno o trenutno dostupnim kapacitetima mobilne mreže. Stoga varijabilnost u rezultatima proizlazi iz činjenice da u određenim trenucima određeni broj korisnika može intenzivnije koristiti kapacitete mreže, dok u drugim trenucima mogu koristiti manje resursa, što rezultira promjenama u brzini prijenosa podataka.



a) b) c)

Slika 4.13. Usporedba brzine prijensa u 5G NSA mrežama nacionalnih mrežnih operatera u RH a) A1, b) Hrvatski Telekom, c) Telemach

Ključna razlika leži u tome što se u privatnoj 5G SA mreži može lako i brzo ograničiti broj korisnika s pristupom mreži. To znači da privatna mreža može biti bolje prilagođena specifičnim zahtjevima organizacije, posebno u kritičnim industrijama kao što su proizvodnja i zdravstvo. Pouzdanost i sigurnost su od suštinskog značaja u tim sektorima, a privatna 5G SA mreža omogućava organizacijama da precizno upravljaju mrežnim resursima radi osiguravanja dosljednih i visokih performansi, čime se zadovoljavaju visoki standardi u ovim kritičnim sektorima.

## 6. ZAKLJUČAK

U razvoju od prvih generacija (1G) pa sve do trenutno najnovije generacije (5G) mobilne mreže su prošle kroz značajne promjene, postajući sve naprednije i pružajući korisnicima bržu, pouzdaniju i napredniju komunikaciju.

Ključne tehnologije koje su omogućile razvoj 5G mreža, što uključuje velike brzine prijenosa i propusnost, su masivni MIMO, male ćelije, D2D komunikacija, milimetarski valovi i mrežno segmentiranje.

U radu je posebno istražena privatna 5G mobilna mreža, s naglaskom na implementaciju putem programski definiranih radio uređaja. Programski definirani radio uređaji donose mogućnost široke primjene jer su jako fleksibilni zbog široke frekvencijske pokrivenosti te mogućnosti programskog definiranja postavki sve do najnižeg sloja mreža. Velika prednost u korištenju SDR je postojanje otvorenih kodova za programiranje pristupnog mrežnog sustava i 5G jezgri, što snižava cijenu i olakšava razvoj i implementaciju privatne 5G mreže. U radu je opisan cjelokupan proces izvedbe privatnih 5G SA mobilne mreže putem softverski definiranih radio uređaja. Uz to je provedena usporedba performansi privatne 5G mreže s komercijalnim mrežama. Kako u RH još uvijek nema komercijalnih 5G SA mreža, mjerenja su provedena na dostupnim 5G NSA mrežama. Mjerenja brzina prijenosa u uzlaznoj i silaznoj vezi pokazala su da je brzina veća i stabilnije nego u komercijalnim 5G. To se može objasniti postojanjem samo jednog UE spojenog na testiranu privatnu mrežu, za razliku od promjenjivog (i nepoznatog) broja UE uređaja koji su se tijekom mjerenja spajali na komercijalne mreže. Ovi rezultati ukazuju na važnu prednost privatnih 5G mreža, a to je mogućnost potpune kontrole vlasnika takve mreže nad parametrima mreže, uključujući i nad brojem UE uređaja koji imaju pristup mreži. Time se osigurava visoka pouzdanost i prilagodljivost privatne 5G mreže potrebama vlasnika, što komercijalna mreža ne može pružiti.

Može se zaključiti da 5G tehnologija predstavlja ključni korak naprijed u svijetu mobilnih komunikacija. Omogućuje ne samo bržu i pouzdaniju komunikaciju za korisnike već i potencijal za implementaciju privatnih 5G mreža koje će podržati različite industrije i primjene. S razvojem 5G tehnologije, očekuje se veći napredak u mobilnim komunikacijama i povezanim tehnologijama u budućnosti. Razvoj i primjena softverski definiranih radio uređaja otvara neka nova vrata ne samo u izvedbama i istraživanju 5G mreža nego također mogućnost istraživanja nekih novih generacija mreža.

## LITERATURA

- [1] ResearchGate, Dostupno na: [https://www.researchgate.net/figure/Cellular-network-architecture-for-a-mobile-distributed-system\\_fig1\\_323861058](https://www.researchgate.net/figure/Cellular-network-architecture-for-a-mobile-distributed-system_fig1_323861058) [Pristup:27.8.2023.]
- [2] D. Nemeč „Evolucija mobilnih telekomunikacionih sistem“, Fakultet tehničkih nauka, Dostupno na: <https://dokumen.tips/documents/evolucija-mobilnih-telekomunikacionih-sistema.html?page=1> [Pristup:27.8.2023.]
- [3] A. Kumar, Y. Liu, J. Sengupta, „Evolution of Mobile Wireless Communication“, International Journal of electronics & communication technology No. 1, Vol. 1, pp. 68-72, 2010,
- [4] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, „The Evolution Of Untethered Communications“, The National Academies Press, Washington DC, 1997.
- [5] „The Foundations of Mobile and Cellular Telephony“, ETHW, kolovoz 2012., Dostupno na: [https://ethw.org/The\\_Foundations\\_of\\_Mobile\\_and\\_Cellular\\_Telephony](https://ethw.org/The_Foundations_of_Mobile_and_Cellular_Telephony) [Pristup:28.8.2023.]
- [6] „Dynatac Cellular Telephone“, Smithsonian, Dostupno na: [https://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah\\_1191361](https://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_1191361) [Pristup:28.8.2023.]
- [7] M. Sertić, „Analiza i usporedba 5G mreže s tehnologijama mobilnih mreža ranijih generacija“ Završni rad, Osijek: Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku. 2019.
- [8] Umts, Dostupno na: <https://www.slideshare.net/mustahidali90/umts-31480372> [Pristup:28.8.2023.]
- [9] H. Kheddar, „From 2G to 4G mobile network: architecture and key performance indications“, University of Medea. listopad 2022. Dostupno na: <https://arxiv.org/pdf/2210.00642.pdf> [Pristup:29.8.2023.]
- [10] B. Burazer, „Budućnost mobilnih komunikacija i izazovi normizacije“, Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2014.
- [11] M. Liyanage, I. Ahmad, A. Abro, A. Gurtov, M. Ylianttila, „A Comprehensive Guide to 5G Security“, John Wiley & Sons, travanj 2018.
- [12] Amta, Dostupno na: <https://amta.org.au/amta-calls-on-government-to-set-spectrum-targets/> [Pristup:29.8.2023.]
- [13] „What difference between SA and NSA deployment in 5G?“, IPLOOK, Dostupno na: <https://www.iplook.com/info/5g-nsa-sa-i00028i1.html> [Pristup:29.8.2023.]

- [14] „What are the components of Software Defined Radio and its Applications“, RF page, Dostupno na: <https://www.rfpage.com/what-are-the-components-of-software-defined-radio-and-its-applications/> [Pristup:30.8.2023.]
- [15] Ettus, Dostupno na: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-x410/> [Pristup:30.8.2023.]
- [16] Software radio system, Dostupno na: <https://srs.io> [Pristup:30.8.2023.]
- [17] X. Aretaga, srsRAN\_Project, GitHub, svibanj 2023., Dostupno na: [https://github.com/srsran/srsRAN\\_Project](https://github.com/srsran/srsRAN_Project) [Pristup:30.8.2023.]
- [18] srsRAN Project Documentation, Dostupno na: <https://docs.srsran.com/projects/project/en/latest/> [Pristup:30.8.2023.]
- [19] Ettus, Dostupno na: <https://www.ettus.com/sdr-software/uhd-usrp-hardware-driver/> [Pristup:30.8.2023.]
- [20] „5G core network“, open air interface, Dostupno na: <https://openairinterface.org/oai-5g-core-network-project/> [Pristup:1.9.2023.]
- [21] Cellular Network Infrastructure, Dostupno na: <https://osmocom.org/projects/cellular-infrastructure/wiki/SysmoISIM-SJA2> [Pristup:1.9.2023.]
- [22] pysim, GitHub, Dostupno na: <https://github.com/osmocom/pysim>
- [23] Network Signal Guru, Dostupno na: [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.qtrun.QuickTest&hl=en\\_US](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.qtrun.QuickTest&hl=en_US) [Pristup:]
- [24] Speedtest by Ookla, Dostupno na: <https://play.google.com/store/apps/details?id=org.zwanoo.android.speedtest&hl=e>
- [25] H. Luo , A. Bishnu, T. Ratnarajah, „Design and Analysis of In-Band Full-Duplex Private 5G Networks Using FR2 Band“, IEEE Access 9, pp. 166886-166905, 2021.
- [26] B. Khan, S. Ahmed, A. Al-Dweik, „URLLC and eMBB in 5G Industrial IoT: A Survey“, IEEE Open Journal of the Communications Society 3, pp. 1134-1163, 2022.
- [27] M. Wen i ostali "Private 5G Networks: Concepts, Architectures, and Research Landscape“, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 16, no. 1, pp. 7-25, Jan. 2022
- [28] K. Kiela, M. Jurgo, V. Macaitis, R. Navickas, „5G Standalone and 4G Multi-Carrier Network-in-a-Box Using a Software Defined Radio Framework“, Sensors, No. 16, Vol. 21, 2021,
- [29] D. Macedo, D. Guedes, L. Vieira, M. Vieira, M. Nogueira, „Programmable Networks—From Software-Defined Radio to Software-Defined Networking“, IEEE Communications Surveys & Tutorials, No. 2, Vol. 17, pp. 1102-1125, 2015,

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu opisan je razvoj mobilnih mreža od prve do pete generacije. Nakon toga fokus je stavljen na novu generaciju, 5G generaciju mobilnih mreža gdje su opisane prednosti i arhitektura same mreže. U okviru diplomskog rada napravljena je privatna 5G mreža korištenjem programski definiranog radio uređaja, te su detaljno opisani koraci u razvoju ove mreže. Izmjerene su performanse nove mreže te je napravljena usporedba s komercijalnim 5G mrežama nacionalnih operatera.

**Ključne riječi:** 5G mreža, programski definiran radio, privatna mobilna mreža

## ABSTRACT

This thesis describes the development of mobile networks from the first to the fifth generation. After that, the focus was placed on the new generation, the 5G generation of mobile networks, where the advantages and architecture of the network itself were described. As part of the thesis, a private 5G network was created using a software-defined radio device, and the steps in the development of this network were described in detail. The performance of the new network was measured and a comparison was made with commercial 5G networks of national operators.

**Keywords:** 5G, software-defined radio, private mobile network

## ŽIVOTOPIS

Toni Karimović rođen je u Žepču, Bosna i Hercegovina 4.5.1999. godine. Pohađao je osnovnu školu "Fra Grga Martić" u Ozimici, Žepče. Nakon osnovne škole, 2015. godine upisuje srednju školu u Katoličkom školskom centru „Don Bosco“ u Žepču, smjer Tehničar za mehatroniku. Maturira 2019. godine i iste godine upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku, preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika. Uz školovanje na drugoj godini fakulteta, u listopadu 2020. započinje sa studentskim radom u tvrtki Orqa d.o.o. Nakon 3 mjeseca rada kao programer stažist napreduje u mladog programera, godinu poslije postaje voditelj projekta. 2021. godine završava preddiplomski studij Elektrotehnika, izborni blok Komunikacije i informatika. Odmah po završetku preddiplomskog studija upisuje diplomski studij Elektrotehnika na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija smjer, Komunikacije i informatika, izborni blok Mrežne tehnologije.