

# Simulacija 5G mrežnog okruženja

---

**Barišić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:431766>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-02**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija**

**SIMULACIJA 5G MREŽNOG OKRUŽENJA U MATLAB-  
U**

**Završni rad**

**Ivan Barišić**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P: Obrazac za ocjenu završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na sveučilišnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Ivan Barišić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	4928, 27.07.2021.
<b>JMBAG:</b>	0165088509
<b>Mentor:</b>	doc. dr. sc. Denis Vranješ
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Simulacija 5G mrežnog okruženja
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	Telekomunikacije i informatika (zn. polje elektrotehnika)
<b>Zadatak završnog rada:</b>	U okviru ovog rada potrebno je opisati rad 5G mreže te korištenjem nekog od alata izraditi simulaciju 5G mreže. Također je potrebno na modelu mreže izmjeriti parametre poput kašnjenja i pogreške u prijenosu podataka. Sumentor s FERIT-a: Mario Vranješ
<b>Datum prijedloga ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	18.09.2024.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada od strane mentora:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Datum potvrde ocjene završnog rada od strane Odbora:</b>	27.09.2024.
<b>Ocjena završnog rada nakon obrane:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio sveučilišni prijediplomski studij:</b>	30.09.2024.

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

Osijek, 30.09.2024.

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Ivan Barišić
<b>Studij:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4928, 27.07.2021.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	8

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Simulacija 5G mrežnog okruženja**

izrađen pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Denis Vranješ

i sumentora

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

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

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
<b>2. Mobilne mreže .....</b>	<b>2</b>
2.1. Prva generacija mobilnih mreža (1G) .....	2
2.2. Druga generacija mobilnih mreža (2G) .....	3
2.3. Treća generacija mobilnih mreža (3G) .....	3
2.4. Četvrta generacija mobilnih mreža (4G) .....	4
<b>3. Peta generacija mobilnih mreža (5G).....</b>	<b>5</b>
3.1. Arhitektura 5G mobilne mreže.....	5
3.2. Parametri 5G mreže.....	6
3.3. Usporedba 5G sa prethodnim generacijama .....	7
<b>4. Simulacija 5G mrežnog okruženja u MATLAB-u .....</b>	<b>9</b>
4.1. Utjecaj širine frekvencijskog pojasa na brzinu prijenosa podataka, BER i latenciju .....	13
4.2. Utjecaj reda modulacije na brzinu prijenosa podataka, BER i latenciju .....	15
4.3. Utjecaj broja podnosioca na brzinu prijenosa podataka, BER i latenciju .....	18
<b>5. Zaključak .....</b>	<b>22</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>23</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>24</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>25</b>

# 1. UVOD

Razvoj mobilnih tehnologija kroz povijest obilježen je stalnim napretkom, čiji je vrhunac trenutno peta generacija mobilnih mreža, poznatija kao 5G. Ova tehnologija obećava revolucionarne promjene u načinu na koji ljudi komuniciraju, rade i koriste tehnologiju u svakodnevnom životu. 5G mreže donose značajna unapređenja u brzini prijenosa podataka, kapacitetu mreže, smanjenju latencije i povećanju pouzdanosti, što otvara vrata za nove primjene kao što su autonomna vozila, pametni gradovi i napredne industrijske aplikacije. U okviru ovog završnog rada odrađene su simulacije 5G mrežnog okruženja sa 10 korisnika gdje je analizirano kako promjena parametara širine frekvencijskog spektra, reda modulacije i broja podnosioca utječe na promjenu parametara brzine prijenosa podataka, vremena kašnjenja i BER-a.

Drugo poglavlje rada prikazuje razvoj mobilnih mreža od prve do pete generacije sa posebnim naglaskom i detaljnijim opisom pete generacije mreža. U trećem poglavlju biti će predstavljen program u kojem će se provesti simulacije 5G mrežnog okruženja pod nazivom MATLAB te će biti opisan tijek odrađenih simulacija. Četvrto poglavlje donosi analizu rezultata izvršenih simulacija, dok se u petom poglavlju donose zaključci ovog rada.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada jesu simulacije 5G mrežnog okruženja gdje su izmjereni i prokomentirani neki najvažniji parametri kao što su latencija, brzina prijenosa i BER sa promjenom širine frekvencijskog pojasa, reda modulacije i broja podnosioca.

## 2. Mobilne mreže

Mobilne komunikacije razvijale su se kroz povijest uglavnom prateći napredak fiksnih komunikacija i razvoj tehnologije. U ranim fazama komunikacije se kao informacija nije prenosio zvuk (glas), već znakovi zapisani Morseovim kodom. Također, prvi bežični prijenosi odvijali su se unutar zatvorenih organizacija kao što su policija i vojska. Razvoj mobilnih mreža u zadnjih nekoliko desetljeća doživio je značajan napredak te omogućio bržu i lakšu komunikaciju. Mobilne mreže napredovale su od prve (1G) do današnje najnovije pete generacije (5G) gdje su veće značaje imale mreže od treće generacije (3G) pa nadalje.

### 2.1. Prva generacija mobilnih mreža (1G)

Prva generacija mobilnih mreža nastaje u 80-im godinama prošlog stoljeća te se kao njena glavna karakteristika navodi to da nije postojala jedinstvena norma koja je određivala mrežu pa su se tako različite norme koristile u različitim dijelovima svijeta zbog čega mreže izrađene po tim normama nisu bile međusobno kompatibilne. [1] Kao posljedica toga uređaji su se proizvodili u manjim serijama i bili su skuplji. Sustavi na kojima se temelji prva generacija mobilnih mreža bili su analogni te su nudili mogućnost prijenosa glasa, imali su velika ograničenja te su loša kvaliteta zvuka i česti prekidi bili uobičajena pojava. Neki primjeri sustava prve generacije su: AMPS (korišten u Sjedinjenim Američkim Državama, Kanadi, Australiji...), TACS2 i ETACS (korišteni u Velikoj Britaniji, Kuvajtu...), NMT450 i NMT900 (korišteni u Danskoj, Finskoj, Francuskoj...), RTMS (korišten u Italiji) i drugi. 1G mreže koristile su metodu višestrukog pristupa s frekvencijskom podjelom (*engl.* Frequency Division Multiple Access-FDMA) koja je omogućavala razdvajanje frekvencijskih kanala tako da svaki korisnik ima svoj jedinstveni kanal za komunikaciju. [2]

Prva mobilna telefonska mreža u Republici Hrvatskoj pod nazivom „Mobitel“ u rad je puštena 11.1.1991. te se temeljila na sustavu NMT450 (*engl.* Nordic Mobile Technology), ali je za razliku od njega radila u frekvencijskom području do 415 MHz (NMT450 radi u frekvencijskom području do 450 MHz). [2]

Prva generacija mobilnih mreža značajno je utjecala na društvo omogućivši bežičnu komunikaciju i postavivši temelje za buduće generacije mobilnih tehnologija. Uvođenje mobilne telefonije dovelo je do promjene u načinu na koji ljudi komuniciraju, posluju i organiziraju svoje svakodnevne aktivnosti. Iako su 1G mreže imale svoje nedostatke poput niske brzine prijenosa

podataka od svega 2.4 Kbps, njihov utjecaj na razvoj mobilne industrije i društvo u cjelini je neosporan. [1]

## **2.2. Druga generacija mobilnih mreža (2G)**

Druga generacija mobilnih mreža, poznata kao 2G, označila je značajan korak naprijed u razvoju mobilne komunikacije uvođenjem digitalnih tehnologija. Uvedene početkom 1990-ih godina, 2G mreže donijele su bolju kvalitetu zvuka, veću sigurnost i nove usluge poput kratkih tekstualnih poruka (*engl.* Short Message Service – SMS). [3]

Prva 2G mreža komercijalno je puštena u rad 1991. godine. Glavni sustav koji je obilježio 2G mreže bio je globalni sustav mobilnih komunikacija (*engl.* Global System for Mobile Communications-GSM), koji je postao globalni standard za mobilne komunikacije. Kasnije su razvijeni i drugi standardi no GSM je ostao dominantan. Mobilne mreže druge generacije kao inovaciju donose digitalan prijenos informacija umjesto analognog, što je omogućilo mnoge prednosti u odnosu na 1G mreže kao što su bolja kvaliteta zvuka, veći kapacitet mreže, bolja sigurnost, brži prijenos podataka od 64Kbps te latenciju od 300 do 1000ms. [4] 2G mobilne mreže također nude mogućnost roaminga (komunikaciju sa drugim uređajima kada se korisnik nalazi u inozemstvu). Mreže druge generacije koriste metodu višestrukog pristupa s vremenskom podjelom (*engl.* Time Division Multiple Access-TDMA), gdje se svaki frekvencijski kanal dijeli na više vremenskih odsječaka što omogućava da više korisnika dijeli isti frekvencijski kanal, povećavajući kapacitet mreže. [3]

Uvođenje 2G mreža značajno je utjecalo na društvo omogućivši širu dostupnost mobilne komunikacije i novih usluga. SMS je postao popularan način komunikacije, osobito među mlađom populacijom. 2G mreže su postavile temelje za budući razvoj mobilnih mreža, uvodeći digitalne tehnologije na osnovu kojih dolazi do razvoja 3G, 4G i 5G mreža.

## **2.3. Treća generacija mobilnih mreža (3G)**

Treća generacija mobilnih mreža (3G) temelji se na standardima mobilne komunikacije koji su u skladu sa odredbama donesenim od strane Međunarodne telekomunikacijske unije (*engl.* International Telecommunication Union - ITU). Kako bi zadovoljila te standarde 3G mreža mora osiguravati brzine veće od 2Mbps za korisnike koji se nalaze u zatvorenim prostorima, 384 Kbps za korisnike u pokretu te 144 Kbps za korisnike u vozilima. Pojavom 3G mobilnih mreža korisnicima je po prvi puta omogućen mobilni pristup Internetu. [3]



Prve tehnologije partnerskog projekta treće generacije (*engl.* Third Generation Partnership Project-3GPP) su opće paketne radijske usluge (*engl.* General Packet Radio Service-GPRS) i poboljšane brzine prijenosa podataka (*engl.* Enhanced Data rates for GSM Evolution-EDGE). Počinju se koristiti početkom 2000.-ih godina te su se često nazivale i 2.5G mreže jer nisu nudile višemegabitnu brzinu prijenosa podataka. Nakon toga njih nasljeđuju paketni pristup silaznoj vezi velike brzine (*engl.* High-Speed Downlink Packet Access-HSDPA) i paketni pristup uzlaznoj vezi velike brzine (*engl.* High-Speed Uplink Packet Access-HSUPA). [3]

3G mreže sa sobom također donose i razvoj novih mobilnih uređaja te povećavaju broj mogućih opcija za korisnike kao što su mogućnost upućivanja videopoziva, komunikaciju porukama preko interneta, bolju kvalitetu glasovnih poziva i mnoge druge. Neki nedostaci koji su bili uzrok novoj generaciji (4G) su skupa infrastruktura, oprema i implementacija te potreba za većim frekvencijskim spektrom koji bi podržavao veće brzine prijenosa.

## **2.4. Četvrta generacija mobilnih mreža (4G)**

4G predstavlja četvrtu generaciju mobilnih mreža za koju 2008. godine, Međunarodna telekomunikacijska unija (*engl.* International Telecommunication Union - ITU) postavlja standarde usluge koji su morali biti zadovoljeni. Dakle, to je značilo da su morali biti zadovoljeni uvjeti brzine prijenosa od najmanje 100 Mbps za mobilne uređaje, te najmanje 1 Gbps za stacionarne. U to vrijeme te brzine nisu još uvijek bile praktično ostvarive, ali su više bile namijenjene kao cilj razvojnim inženjerima. Nakon nekog vremena organizacija 3GPP razvija tehnologiju dugoročne evolucije (*engl.* Long Term Evolution-LTE) koja zadovoljava većinu standarda navedenim od strane Međunarodne telekomunikacijske unije. [2]Također, WiMax tehnologija koja radi na istim načelima kao Wi-Fi velikog dometa se nameće kao konkurentno rješenje za 4G povezivost, ali ona se pokazala kao lošiji izbor od LTE-a jer ispunjava puno manje traženih zahtjeva. [4] Ipak, na kraju dolazi do spuštanja propisanih brzina jer se uvidjelo da ih je teško postići, pa 4G LTE mreže postaju prepoznate kao 4G ukoliko tvrtka dokaže da su brzine prijenosa podataka znatno veće od mobilnih mreža treće generacije (3G). Nakon nekog vremena pojavljuje se naprednija verzija LTE tehnologije pod nazivom LTE-A (LTE Advanced ili LTE +) te se ona brzinama približava zahtjevima 4G tehnologije. [5]U usporedbi sa 3G sustavima, 4G sustavi pružili su značajan napredak u svim pogledima, od brzine prijenosa, kvalitete pregledavanja raznih sadržaja poput videozapisa, niske latencije i povećanog kapaciteta mreže. Iako je puno toga poboljšala, 4G ima i svoje nedostatke u vidu skupe infrastrukture i hardvera koji

za posljedicu imaju slabiju pokrivenost. Ako korisnik posjeduje uređaj koji podržava 4G, ali se nalazi u području s lošom pokrivenošću, ponovno će biti prisiljen koristiti stariju 3G tehnologiju.

### **3. Peta generacija mobilnih mreža (5G)**

Razvoj svake nove generacije mobilnih mreža donosio je poboljšanja u pogledu brzine prijenosa, novih tehnologija i novih mogućnosti zanimljivim korisnicima kao što su poruke, videopozivi i slično. Najnovija i najrazvijenija generacija do sada predstavlja još veći napredak u smislu znatno manje latencije (od 1ms do 10ms) i brzine prijenosa podataka od nekoliko stotina Mbps do nekoliko Gbps, te za razliku od prethodnika ona će svoju primjenu imati i u brojnim drugim područjima osim internetskih usluga kao što su zdravstvo, razvoj umjetne inteligencije i slično. [6]

#### **3.1. Arhitektura 5G mobilne mreže**

Kao što je već rečeno 5G mreža ima razne primjene pa se tako može koristiti u pametnim domovima, autonomnim vozilima i slično. [7] Njena arhitektura se dijeli na tri dijela: korisnička mreža, pristupna mreža i jezgrena mreža. [8]

Korisnička mreža sastoji se od korisničkih uređaja (*engl.* User Equipment-UE) koji uključuju uređaje kao što su pametni telefoni, tableti i drugi. UE koristi 5G NR (*engl.* New Radio) tehnologiju za komunikaciju sa pristupnom mrežom. Opremljen je naprednim antenskim sustavima koji podržavaju višestruke ulaze i izlaze (*engl.* Multiple-input multiple-output-MIMO), te oni omogućuju veću brzinu prijenosa i bolju pokrivenost. Korisnička mreža također uključuje softver (aplikacije i sučelja) koji omogućuje korisnicima pristup raznim uslugama kao što su virtualna stvarnost, proširena stvarnost, video streaming i ostalo. Pristupna mreža (*engl.* Radio Access Network-RAN) omogućuje uspostavu i održavanje veze između UE-a i baznih stanica (*engl.* gNodeB). Pristupna mreža također podržava *Network Slicing* koji omogućuje izolirane usluge zbog veće pouzdanosti i kvalitete. Jezgrena mreža (*engl.* Core Network) jest centralni dio koji upravlja cjelokupnim mrežnim prometom i osigurava pouzdanu vezu za korisnike. Ona je izgrađena na principu virtualizacije mrežnih funkcija (*engl.* Network Functions Virtualization-NFV) koje omogućavaju veću fleksibilnost i efikasnost. [8]

## 3.2. Parametri 5G mreže

Tablica 3.1. Parametri 5G mreže

<i>Parametar</i>	<i>Vrijednost</i>	<i>Opis</i>
Brzina prijenosa podataka	Do 10 Gbps (teorijski maksimum)	Brzina prijenosa u idealnim uvjetima.
Latencija	1-10ms	Kašnjenje u prijenosu između krajnjih uređaja i mreže
Širina frekvencijskog pojasa	10 MHz - 100 MHz (FR1), 100 MHz - 400 MHz (FR2)	Raspon širine u nižim i višim frekvencijama
MIMO konfiguracija	Do 64T64R (antena koja šalju i primaju signal)	Višestruki ulazi i izlazi za poboljšanje kapaciteta i pokrivenosti
Brzina kretanja	Do 500 km/h	Maksimalna brzina kretanja mobilnih uređaja (npr. u vlaku)
Maksimalna izlazna snaga	23dBm do 33dBm (ovisno o uređaju)	Maksimalna izlazna snaga mobilnih uređaja pri komunikaciji sa baznom stanicom

Tablica 3.1. prikazuje parametre karakteristične za 5G mrežu i njihove vrijednosti te kratak opis. Za razumijevanje simulacija koje će se odvijati u narednim poglavljima rada važno je znati teorijske vrijednosti veličina koje će biti mjerene. Širina frekvencijskog pojasa je ključni faktor u 5G mobilnim mrežama jer direktno utječe na brzinu prijenosa podataka, kapacitet mreže i učinkovitost spektra. Širina frekvencijskog pojasa odnosi se na količinu raspoloživog spektra koji se koristi za komunikaciju između baznih stanica i korisničkih uređaja. U okviru ovoga rada za potrebe simulacije biti će korištene manje širine frekvencijskog pojasa od 10MHz-100MHz. U kontekstu 5G mreža, kvadratna amplitudna modulacija (*engl.* Quadrature Amplitude Modulation-QAM) je ključna tehnologija koja omogućava povećanje brzine prijenosa podataka koristeći napredne modulacijske tehnike. U 5G mrežama koriste se različiti redovi QAM modulacije, poput 16QAM, 64QAM, i 256QAM, ovisno o kvaliteti signala. Na primjer, 256QAM može prenijeti 8 bita po simbolu, što značajno povećava brzinu prijenosa podataka, ali zahtijeva vrlo visoki omjer signal-šum (SNR) kako bi ispravno funkcionirao. Zbog toga se 256QAM koristi u uvjetima s minimalnim smetnjama, kao što su urbana područja. S druge strane, niži redovi modulacije, poput 16QAM, koriste se u područjima s nižim SNR-om gdje je prisutan veći šum jer su stanja u konstalcijskom dijagramu dalje jedno od drugoga, što smanjuje šansu za pogrešku u prijenosu.

Ova fleksibilnost omogućava 5G mrežama da prilagode modulaciju trenutnim uvjetima signala, čime se optimiziraju performanse mreže i osigurava balans između brzine prijenosa podataka i pouzdanosti veze. U simulacijama odrađenim u ovom radu koristiti će se različiti redovi modulacije (16, 32, 64 i 256). Omjer signal šum (*engl.* Signal to Noise Ratio-SNR) kao što sama riječ kaže je omjer snage signala i snage šuma, te što je on veći to znači da je snaga signala puno veća od snage šuma te da će prijenos biti kvalitetniji. Broj pogrešno tetektiranih bitova (*engl.* Bit Error Rate-BER) je omjer pogrešno primljenih bitova i ukupnog broja primljenih bitova te ona predstavlja mjeru kvalitete prijenosa podataka u digitalnoj komunikaciji. Brzina prijenosa podataka predstavlja jedan od najvažnijih aspekata koji donosi značajna poboljšanja u odnosu na prethodne generacije mobilnih mreža. Teorijski maksimum za 5G mreže su brzine do 10 Gbps za uzlazne veze i 20 Gbps za silazne veze, što je višestruko veće u odnosu na 4G LTE, čiji su maksimalni kapaciteti oko 1 Gbps. Aditivni bijeli Gaussov šum (*engl.* Additive White Gaussian Noise-AWGN) je vrsta šuma koji se često upotrebljava u analizi digitalnih komunikacija. Za njega je karakteristična normalna raspodjela i ravnomjerna spektralna gustoća snage. Latencija predstavlja vrijeme koje je potrebno za prijenos podataka od zahtjeva za prijenos do primitka podataka na odredištu. Kod 5G mreža ona se nastoji svesti na svega nekoliko milisekundi. Ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (*engl.* Orthogonal Frequency-Division Multiplexing-OFDM) je tehnika modulacije kod koje se koristi više podnosioca te su oni međusobno ortogonalni, odnosno ne interferiraju jedan s drugim. Svaki od njih prenosi jedan dio podataka te su obično raspoređeni na podskup frekvencijskog pojasa zbog interferencije.

### **3.3. Usporedba 5G sa prethodnim generacijama**

U usporedbi sa ranijim generacijama mobilnih mreža 5G zaista nudi veliki napredak u svakom pogledu. Ako se gleda brzina prijenosa podataka 2G i 3G mreža od nekoliko desetaka do nekoliko stotina kilobita po sekundi, zatim 4G koji podiže brzinu na nekoliko stotina megabita po sekundi, 5G tehnologija u budućnosti će nuditi brzine od nekoliko gigabita po sekundi za pokretne korisnike i nekoliko desetaka gigabita po sekundi za korisnike koji su stacionirani. To će omogućiti praktično trenutno preuzimanje i slanje raznih sadržaja, te poboljšane tehnologije kao što su virtualna i proširena stvarnost.

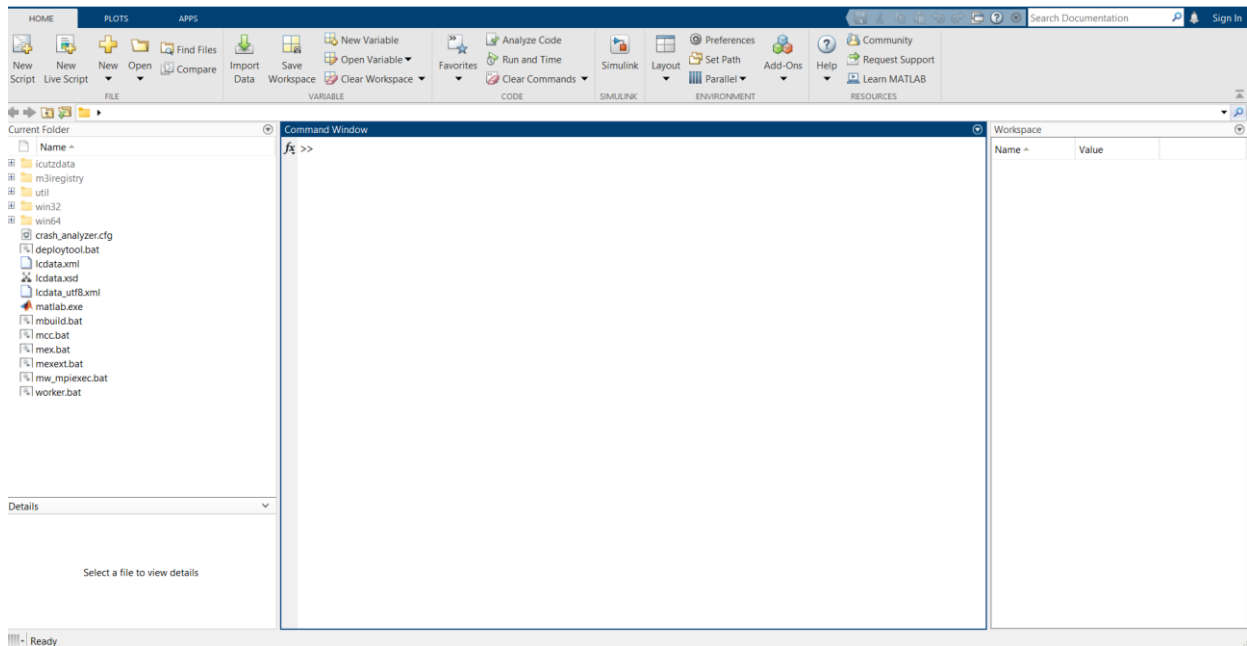
Ključna karakteristika 5G tehnologije je jako niska latencija. 2G i 3G mreže imale su latenciju od nekoliko stotina milisekundi, dok se kod 4G mreža ona smanjuje na nekoliko desetaka milisekundi. 5G tehnologija već sada nudi nisku latenciju te se ona u budućnosti planira svesti na

1ms što je gotovo trenutni odziv. Tako niska latencija je ključna za primjenu tehnologije u autonomnoj vožnji, automatizaciji u industriji i slično.

Kapacitet mreže sa pojavom 5G tehnologije je također znatno poboljšana. 2G i 3G mreže su bile ograničene kapacitetom kada je istovremeno trebalo obraditi veliki broj podataka i uređaja, a 4G se suočavao sa problemom u gusto naseljenim mjestima i na događajima gdje se na mrežu spaja velik broj uređaja. Uz pomoć MIMO tehnologije i velikog frekvencijskog raspona 5G mreža će uspješnije rješavati takve probleme jer omogućava podršku za velik broj uređaja i u mogućnosti je obraditi veliku količinu podataka odjednom. Zato je njena primjena moguća za razvoj pametnih gradova i interneta stvari (*engl.* Internet of Things-IoT). 5G također uključuje napredne mehanizme enkripcije i autentifikacije, što je ključno za poboljšanje sigurnosti s obzirom na sve veći broj povezanih uređaja. [9]

## 4. Simulacija 5G mrežnog okruženja u MATLAB-u

U okviru ovog završnog rada napravljena je jednostavna simulacija OFDM-a u uvjetima prijenosa kanalom s aditivnim bijelim šumom, za širine kanala koje odgovaraju 5G mreži u programskom paketu MATLAB. MATLAB je programsko okruženje koje služi za tehničke izračune, provođenje raznih simulacija, analizu podataka i ostalo. Razvijen je od strane tvrtke MathWorks te ima široku primjenu u znanstvenim istraživanjima, obradi signala, kontrolama sustava i mnogim drugim područjima. Njegov programski jezik uključuje podršku za vektorske i matematičke operacije kao što su integriranje, diferenciranje, Fourierove transformacije i mnoge druge. MATLAB također pruža i mogućnost vizualizacije podataka u obliku grafikona, dijagrama te 2D i 3D prikaza koji nam omogućuju lakši pregled i analizu rezultata. Dostupan je za preuzimanje na računalima koja rade na Windows, macOS i Linux operacijskim sustavima. Na slici 4.1 može se vidjeti kako izgleda njegovo sučelje.



Sl. 4.1. Matlab sučelje

U gornjem dijelu nalaze se izbornici i alatne trake koje sadržavaju opcije poput otvaranja novih skripti, spremanja podataka, pokretanja koda i drugih funkcija koje se često koriste.

Na lijevoj strani nalazi se *Current Folder* panel koji prikazuje mape i datoteke koje se trenutno nalaze u radnom direktoriju. U sredini se nalazi *Command Window* gdje se unose MATLAB naredbe. Na desnoj strani je *Workspace* koji prikazuje varijable koje se trenutno nalaze u memoriji te njihove vrijednosti.

Naredbe koje su korištene u simulaciji su sljedeće:

**Linija Kod**

```
1:      numUsers = 10;
2:      numSubcarriers = 52;
3:      numSymbols = 1040;
4:      snrRange = 0:1:30;
5:      bandwidth = 40e6;
6:      modOrder = 64;
```

Sl. 4.2. Parametri simulacije

U prvom dijelu koda inicijaliziraju se početni parametri potrebni za simulaciju. Broj korisnika *numUsers* je postavljen na 10. OFDM podnosioci u OFDM sustavima predstavljaju pojedinačne frekvencije koje prenose dio podataka. U ovom slučaju broj podnosica iznosi 52 (*numSubcarriers*), što znači da svaki korisnik ima 52 frekvencijske komponente za prijenos svojih podataka. Parametar *numSymbols* predstavlja broj simbola koji se prenose po korisniku. On mora biti djeljiv sa brojem podnosioca kako bi podaci bili pravilno raspoređeni na njih. Zatim je definiran raspon vrijednosti omjera SNR (*snrRange*) koji će iznositi od 0 do 30dB sa korakom od 1dB. Nakon toga postavljene su vrijednosti za širinu frekvencijskog pojasa koja iznosi 40Mhz i red modulacije koji iznosi 64.

**Linija Kod**

```
7:      dataRate = zeros(length(snrRange), numUsers);
8:      ber = zeros(length(snrRange), numUsers);
9:      latency = zeros(length(snrRange), numUsers);
```

Sl. 4.3. Inicijalizacija rezultata

U drugom bloku naredbi kreirane su matrice *dataRate*, *ber* i *latency* koje pohranjuju vrijednosti tih veličina za svaki omjer SNR i za svakog korisnika. Svaka od njih ima dimenzije *snrRange* X *numUsers* kako bi mogli pratiti njihovu promjenu za svakog korisnika.

**Linija Kod**

```
10:     data = randi([0 1], numUsers, numSymbols * log2(modOrder));
```

Sl. 4.4. Generiranje podataka za sve korisnike

U matricu *data* spremaju se slučajno generirani binarni podaci za svakog korisnika. Funkcija *randi* nasumično generira cijele brojeve (u ovom slučaju 0 ili 1). Dimenzije matrice određene su kao broj korisnika X broj bitova gdje se broj bitova računa kao broj simbola pomnožen sa brojem bitova po simbolu (ovisno o redu modulacije). Pa tako za 64QAM modulaciju svaki simbol prenosi 6 bitova pa je ukupni broj bitova za svakog korisnika jednak umnošku broja simbola i broja 6.

### ***Linija Kod***

```
11:     for snrIdx = 1:length(snrRange)
12:         snr = snrRange(snrIdx);
13:         linearSNR = 10^(snr / 10);
```

Sl. 4.6. Glavna petlja koja prolazi po vrijednostima SNR-a

Prikazana petlja je glavna petlja i prolazi kroz sve vrijednosti iz raspona SNR. *snrIdx* predstavlja indeks trenutne vrijednosti SNR-a koja prolazi kroz petlju. Prva naredba nakon petlje, SNR u decibelima pretvara u linearnu vrijednost jer proračuni rezultata simulacije zahtijevaju SNR u linearnom obliku.

### ***Linija Kod***

```
14:     for userIdx = 1:numUsers
15:         modData = qammod(data(userIdx, :)', modOrder, 'InputType', 'bit',
    'UnitAveragePower', true);
```

Sl. 4.5. Peltja koja prolazi kroz korisnike

Prikazana petlja nalazi se unutar glavne petlje te ona prolazi kroz sve korisnike (svaki korisnik ima svoj niz podataka). *userIdx* predstavlja indeks trenutnog korisnika. Prva naredba unutar petlje radi modulaciju podataka koristeći QAM kvadraturnu amplitudnu modulaciju sa zadanim redom modulacije (*modOrder*). Funkcija *qammod* uzima binarne podatke i modulira ih. Parametar *'UnitAveragePower', true* osigurava da modulirani signal ima normaliziranu prosječnu snagu.

### ***Linija Kod***

```
16:     txSignal = reshape(modData, [], numSubcarriers);
```

Sl. 4.7. Razmještaj u podnosioc

Zatim se modulirani podaci razmještaju u više podnosioca kako bi bili spremni za OFDM prijenos. Funkcija *reshape* koristi se kako bi se podaci organizirali u matricu s brojem stupaca jednakom broju podnosioca, dok se broj redova prilagođava automatski.

### ***Linija Kod***

```
17:     rxSignal = awgn(txSignal, snr, 'measured');
```

Sl. 4.8. Prijenos kroz kanal s bijelim Gausovim šumom

U ovoj liniji koda modulirani signal (*txSignal*) prolazi kroz kanal sa bijelim Gausovim šumom koristeći trenutnu vrijednost SNR-a. Funkcija *awgn* simulira šum koji se dodaje signalu u prijenosu.



### ***Linija Kod***

```
18:     rxData = qamdemod(rxSignal(:), modOrder, 'OutputType', 'bit',  
    'UnitAveragePower', true);
```

Sl. 4.9. Demodulacija podataka

Kod prikazuje kako se signal nakon prijenosa demodulira koristeći QAM demodulaciju. Parametar *'OutputType', 'bit'* osigurava da izlaz bude u binarnom obliku što je potrebno kod računanja BER-a za usporedbu sa početnim parametrima.

### ***Linija Kod***

```
19:     capacity = bandwidth * log2(1 + linearSNR);  
20:     dataRate(snrIdx, userIdx) = capacity * log2(modOrder);
```

Sl. 4.10. Računanje brzine prijenosa podataka

U ovom dijelu računa se brzina prijenosa podataka. Prvo se računa kapacitet kanala po Shannon–Hartley teoremu koji je jednak umnošku širine pojasa i logaritma izraza  $1 + linearSnr$ . Brzina prijenosa za trenutnog korisnika računa se kao umnožak kapaciteta kanala i broja stanja definiranih modulacijskom tehnikom (*modOrder*).

### ***Linija Kod***

```
21:     [~, ber(snrIdx, userIdx)] = biterr(data(userIdx, :)', rxData);
```

Sl. 4.11. Računanje BER-a

Funkcija *biterr* uspoređuje originalne podatke prije modulacije i prijenosa kroz kanal sa primljenim podacima nakon modulacije i dodavanjem šuma (*rxData*) i izračunava stopu pogreške u bitovima.

### ***Linija Kod***

```
22:     latency(snrIdx, userIdx) = numSymbols * (numSubcarriers /  
    bandwidth);  
23:     end  
24:     end
```

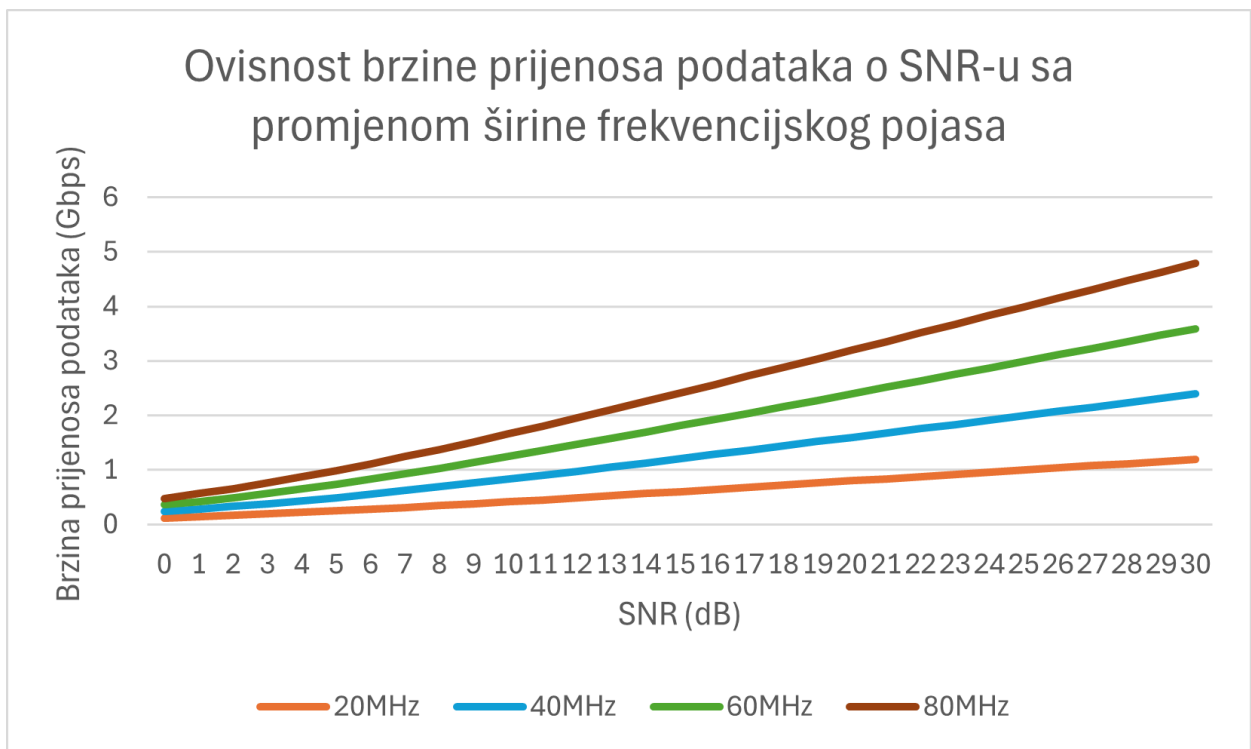
Sl. 4.12. Računanje latencije

Kod prikazuje računanje latencije koja je izražena kao broj simbola pomnožen sa kvocijentom broja podnosioca i širine frekvencijskog pojasa. U okviru simulacija u radu latencija je izračunata na ovaj način kako bi se uzela u obzir ukupna količina podataka koja se mora prenijeti kroz raspoloživu širinu pojasa.

## 4.1. Utjecaj širine frekvencijskog pojasa na brzinu prijenosa podataka, BER i latenciju

U okviru sljedećih simulacija SNR vrijednosti kreću se od 0 do 30dB sa korakom od 1dB, red modulacije postavljen je na 64, broj podnosioca iznosi 52, a broj simbola 1040. Mijenja se širina frekvencijskog pojasa te njene vrijednosti iznose 20MHz, 40MHz, 60MHz i 80MHz.

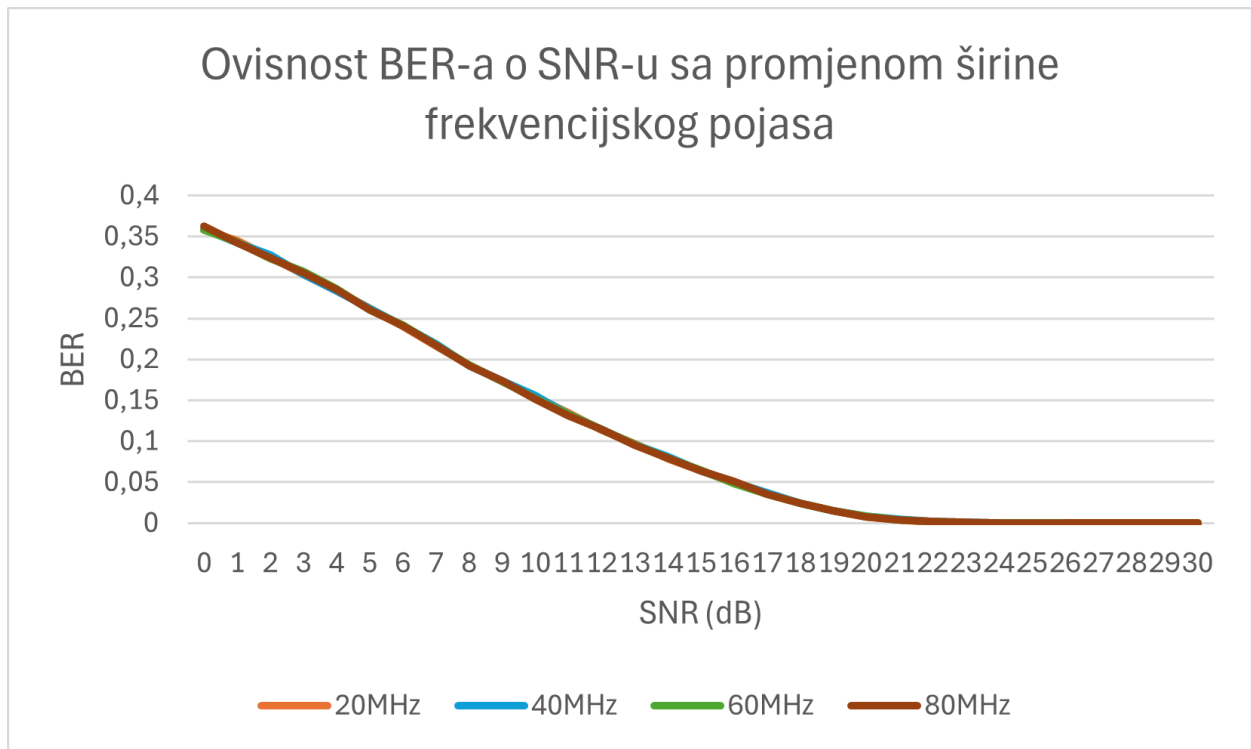
Graf na slici 4.13. prikazuje ovisnost brzine prijenosa o omjeru signal-šum (SNR) za različite širine frekvencijskog pojasa. Na x osi prikazan je SNR u dB, a na y osi prikazana je brzina prijenosa podataka u Gbps. Primjetno je da brzina prijenosa podataka raste s povećanjem SNR-a, jer bolji omjer signal-šum omogućava efikasniji prijenos podataka s manje grešaka, što rezultira većom učinkovitošću u prijenosu informacija. Širina frekvencijskog pojasa ima još značajniji utjecaj na brzinu prijenosa. Širi pojasevi, poput 80 MHz, omogućuju prijenos više podataka istovremeno, što za posljedicu ima veću brzinu prijenosa podataka. Razlika između užih i širih pojaseva postaje izraženija na višim vrijednostima SNR-a, gdje su krivulje širih pojaseva znatno strmije.



Sl. 4.13. Ovisnost brzine prijenosa podataka o SNR-u sa promjenom širine frekvencijskog pojasa

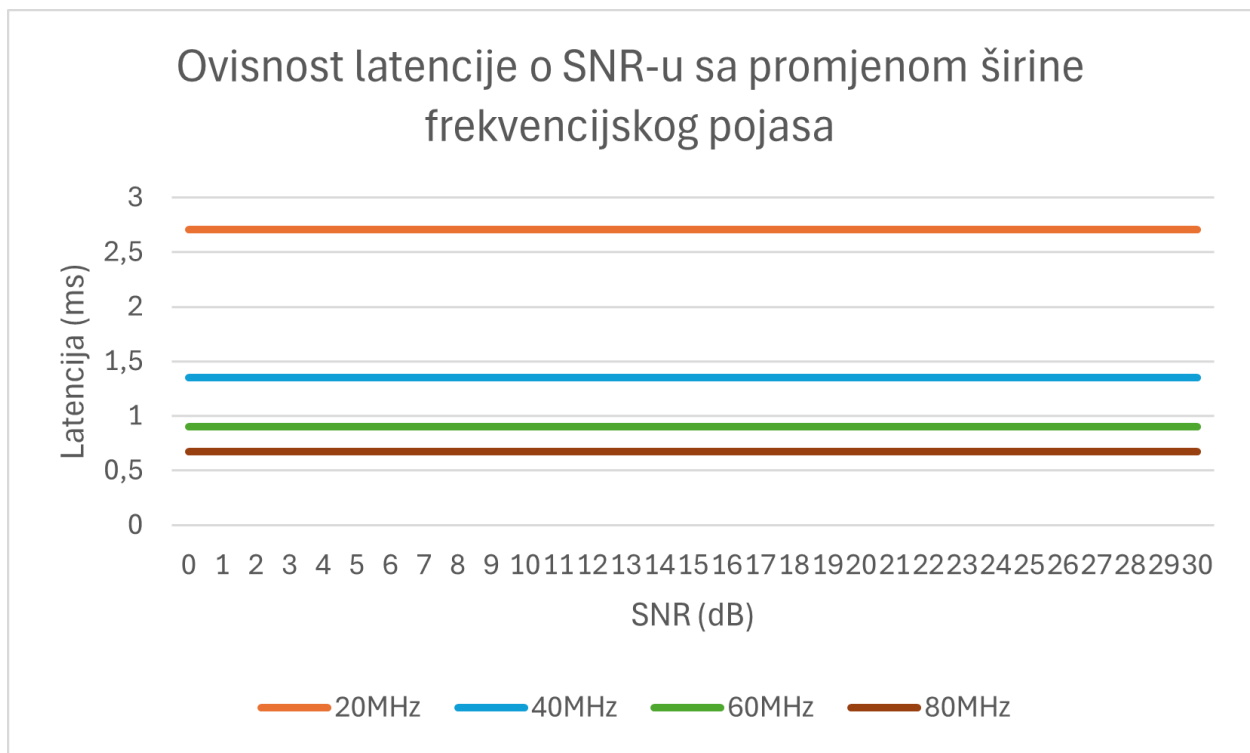
Graf na slici 4.14. prikazuje ovisnost BER-a o omjeru signal-šum (SNR) za različite širine frekvencijskog pojasa. Graf pokazuje da se povećanjem SNR-a, BER smanjuje. Na x osi prikazan je SNR u dB, a na y osi prikazan je BER. Na nižim razinama SNR-a (od 0 do 5dB) BER je relativno

visok jer šum dominira nad signalom, što za posljedicu ima veći broj pogrešaka. Kako SNR raste (preko 10dB) BER naglo pada i time pokazuje da signal postaje dominantniji u odnosu na šum pa je prijenos podataka precizniji. Međutim, na grafu se primjećuje da različite širine frekvencijskog pojasa imaju sličan utjecaj na BER, jer su linije gotovo identične i poklapaju se jedna s drugom. To znači da širina pojasa nema značaj utjecaj na BER za dane vrijednosti SNR-a. Iako širi frekvencijski pojas omogućava veći kapacitet za prijenos podataka, to ne mijenja broj grešaka po bitu.



Sl. 4.14. Ovisnost BER-a o SNR-u sa promjenom širine frekvencijskog pojasa

Graf na slici 4.15. prikazuje ovisnost latencije o omjeru signal-šum (SNR) za različite širine frekvencijskog pojasa. Na x osi prikazan je SNR u dB, a na y osi prikazana je latencija u ms. Vidljivo je da latencija ostaje nepromijenjena bez obzira na promjenu SNR-a, što znači da šum u ovom rasponu SNR vrijednosti nema utjecaj na kašnjenje prijenosa podataka. S druge strane, širina frekvencijskog pojasa znatno utječe na latenciju. Širi frekvencijski pojasevi poput 60 i 80MHz omogućuju nižu latenciju jer mogu prenijeti veći broj podataka u kraćem vremenu, smanjujući zagušenje i ubrzavajući prijenos. To je rezultat povećanog kapaciteta koji dolazi za većom širinom pojasa, što omogućuje istovremeni prijenos većih količina podataka s manje kašnjenja. Na primjer, pojas od 80MHz ima latenciju ispod 1ms, dok užiji pojasevi, poput 20MHz imaju veću latenciju jer ne mogu istovremeno prenijeti toliko podataka. U okviru 5G mreža smanjenje latencije je ključno za korištenje u sustavima poput autonomnih vozila i aplikacija virtualne stvarnosti.

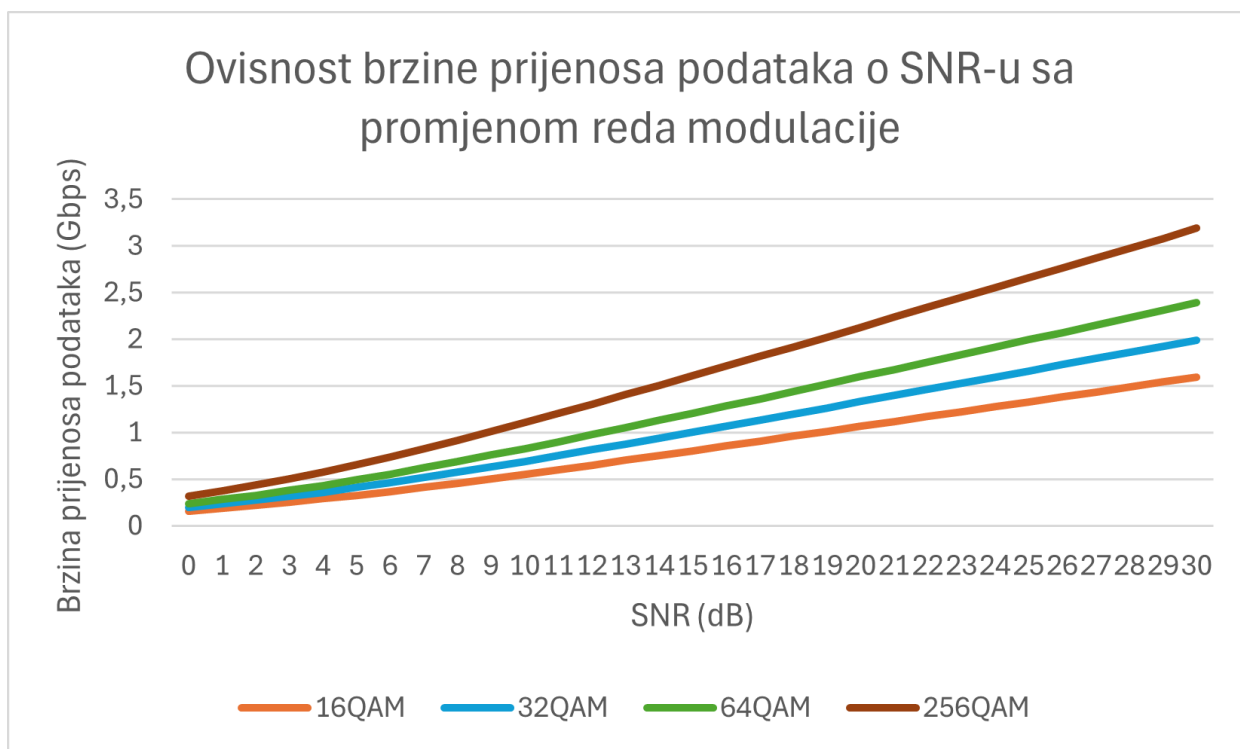


Sl. 4.15. Ovisnost latencije o SNR-u sa promjenom širine frekvencijskog pojasa

## 4.2. Utjecaj reda modulacije na brzinu prijenosa podataka, BER i latenciju

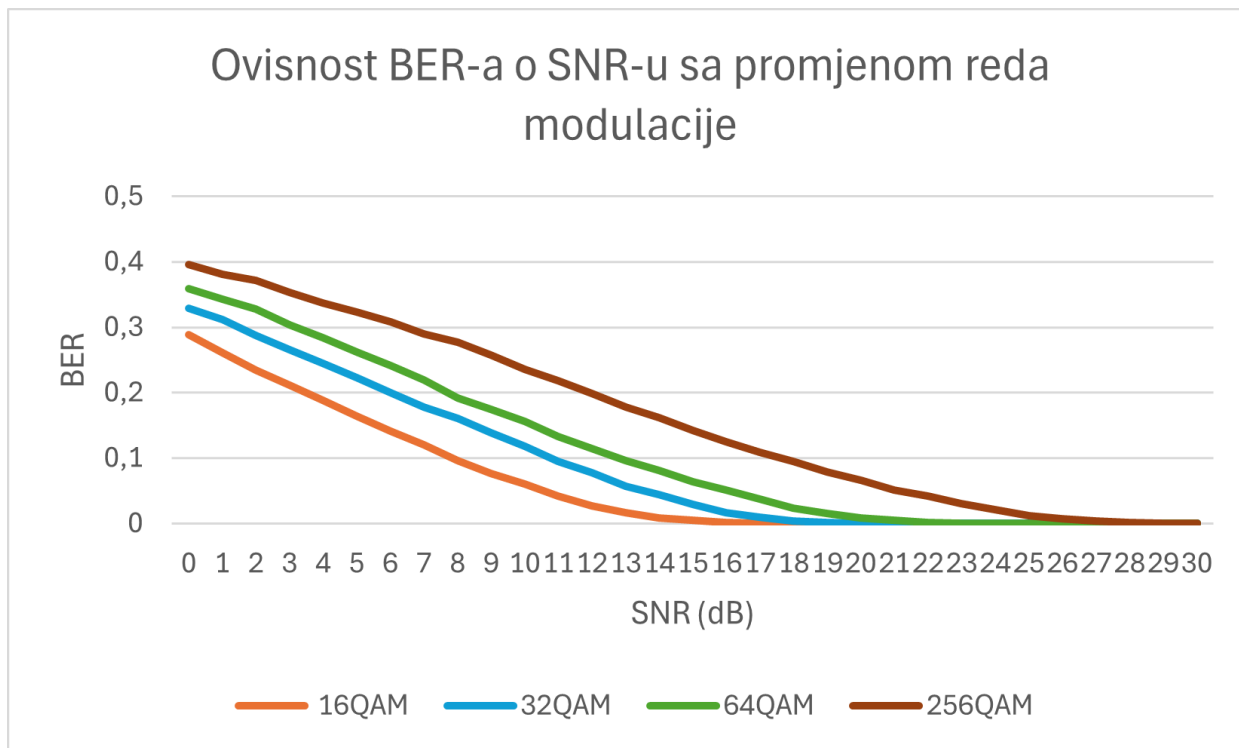
Unutar sljedećih simulacija SNR vrijednosti kreću se od 0 do 30dB sa korakom od 1dB, širina frekvencijskog spektra postavljena je na 40Mhz , broj podnosioca iznosi 52, a broj simbola 1040. Mijenja se red modulacije koji će iznositi 16, 32, 64, 256.

Na slici 4.16. može se vidjeti grafikon ovisnosti brzine prijenosa o omjeru signal-šum (SNR) za različite redove modulacije. Na x osi prikazan je SNR u dB, a na y osi prikazana je brzina prijenosa podataka u Gbps. Brzina prijenosa podataka raste s povećanjem SNR-a jer bolji omjer signal-šum omogućava veću efikasnost prijenosa podataka. Međutim, ključna razlika u ovom grafu dolazi s promjenom reda modulacije. Viši redovi modulacije, poput 256QAM, omogućuju prijenos više bitova po simbolu u usporedbi s nižim redovima, kao što je 16QAM, što rezultira većom brzinom prijenosa podataka za isti SNR. Na primjer, 256QAM može prenijeti najviše podataka jer koristi složeniji način kodiranja signala, ali također zahtijeva viši SNR kako bi bio učinkovit, s obzirom da je osjetljiviji na šum. Stoga, za postizanje maksimalnih brzina prijenosa u 5G mrežama, idealno je koristiti više redove modulacije poput 256QAM kada je SNR visok, dok niži redovi poput 16QAM mogu biti učinkovitiji u okruženjima s nižim SNR-om, gdje je potrebno osigurati stabilnost prijenosa unatoč većem šumu.



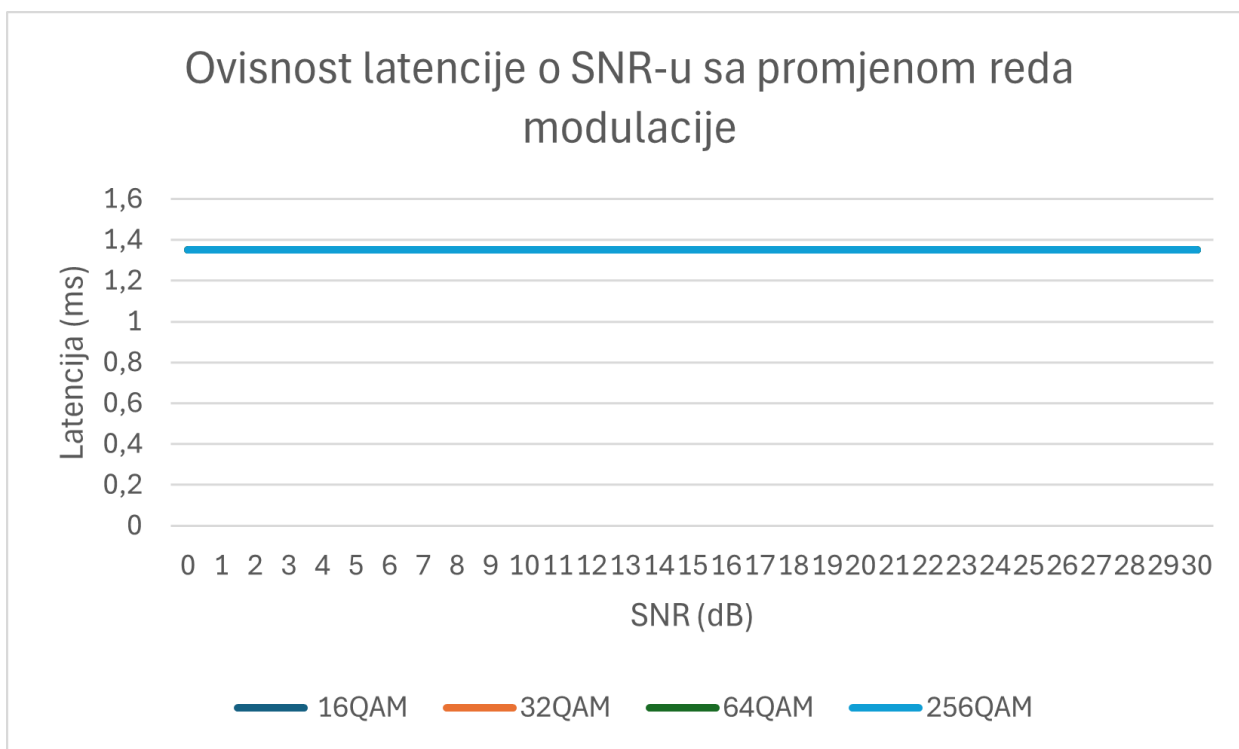
Sl. 4.16. Ovisnost brzine prijenosa podataka o SNR-u sa promjenom reda modulacije

Na slici 4.17. može se vidjeti grafikon ovisnosti BER-a o omjeru signal-šum (SNR) za različite redove modulacije. Na x osi prikazan je SNR u dB, a na y osi prikazan je BER. Kako SNR raste, primjećuje se značajan pad BER-a za sve modulacijske postupke, što je očekivano jer bolji omjer signal-šum omogućava prijenos signala s manje pogrešaka. Također, red modulacije značajno utječe na BER. Viši redovi modulacije, poput 256QAM, omogućuju prijenos više bitova po simbolu, ali su osjetljiviji na pogrešku zbog većeg broja stanja koji se nalaze bliže jedno drugome u konstalacijskom dijagramu. To objašnjava zašto linija za 256QAM ima najviši početni BER pri nižim SNR vrijednostima, ali postupno opada s povećanjem SNR-a. Pri visokim SNR-ovima (iznad 20dB), svi redovi modulacije dosežu vrlo niske vrijednosti BER-a, što znači da se prijenos podataka odvija s minimalnim pogreškama. Nasuprot tome, niži redovi modulacije, poput 16QAM, imaju niži početni BER i manje su osjetljivi na šum, što omogućava stabilniji prijenos podataka pri nižim SNR vrijednostima. Iako 16QAM prenosi manje podataka po simbolu, njegova veća otpornost na pogrešku zbog manjeg broja stanja čini ga prikladnijim u situacijama kada je SNR relativno nizak.



Sl. 4.17. Ovisnost BER-a o SNR-u sa promjenom reda modulacije

Na slici 4.18. može se vidjeti grafikon ovisnosti latencije o omjeru signal-šum (SNR) za različite redove modulacije. Na x osi prikazan je SNR u dB, a na y osi prikazana je latencija u ms. Za razliku od prethodnih grafova, ovdje je latencija konstantna bez obzira na promjene u SNR-u ili red modulacije. Modulacija, bez obzira na to je li 16QAM, 32QAM, 64QAM ili 256QAM, ne mijenja latenciju jer ona ne utječe na vrijeme potrebno da signal putuje od izvora do odredišta. U 5G mrežama, latencija je ključan faktor za aplikacije koje zahtijevaju brzi odgovor, ali iz ovog grafa možemo zaključiti da promjena reda modulacije ili SNR-a neće značajno utjecati na latenciju.

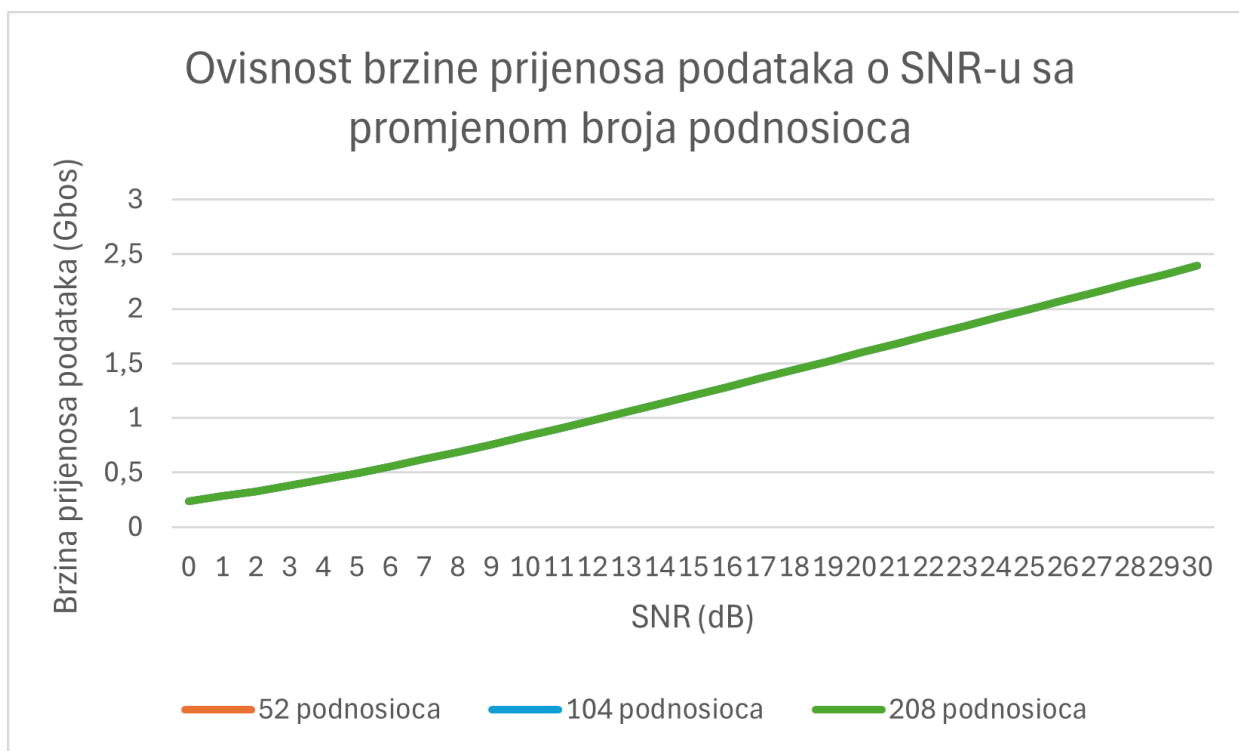


Sl. 4.18. Ovisnost latencije o SNR-u sa promjenom reda modulacije

### 4.3. Utjecaj broja podnosioca na brzinu prijenosa podataka, BER i latenciju

Kod sljedećih simulacija SNR vrijednosti kreću se od 0 do 30dB sa korakom od 1dB, širina frekvencijskog spektra postavljena je na 40Mhz, koristimo 64QAM modulaciju, a broj simbola iznosi 1040. Mijenja se broj podnosioca čije vrijednosti će iznositi 52, 104 i 208.

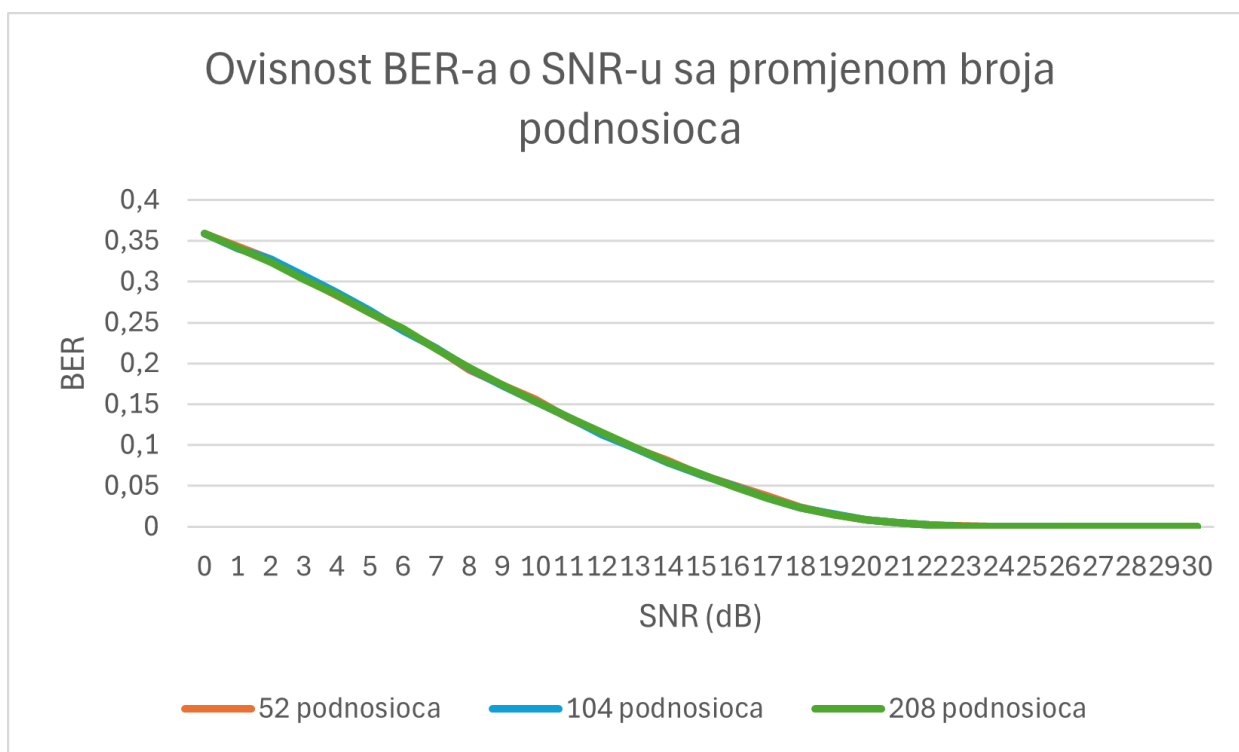
Graf na slici 4.19. prikazuje ovisnost brzine prijenosa podataka o omjeru signal-šum (SNR) pri različitim brojevima podnosioca (52, 104, 208). Na x osi prikazan je SNR u dB, a na y osi prikazana je brzina prijenosa podataka u Gbps. Zanimljivo je da sve linije leže jedna na drugoj, što znači da promjena broja podnosioca nema utjecaja na brzinu prijenosa podataka u ovom slučaju. Bez obzira na to radi li se o 52, 104 ili 208 podnosioca, brzina prijenosa podataka raste s povećanjem SNR-a te broj podnosioca ne igra značajnu ulogu. Ovakav rezultat može biti posljedica drugih ograničenja u sustavu koji koristi ove podnosioce, kao što su širina frekvencijskog pojasa i efikasnost modulacije koji određuju maksimalnu brzinu prijenosa. To znači da, iako veći broj podnosioca teoretski može povećati kapacitet prijenosa, ovdje postoje drugi faktori koji ograničavaju mogućnost povećanja brzine. Dakle, u okviru ove simulacije, SNR je jedini ključni faktor koji utječe na povećanje brzine prijenosa podataka.



Sl. 4.19. Ovisnost brzine prijenosa podataka o SNR-u sa promjenom broja podnosioca

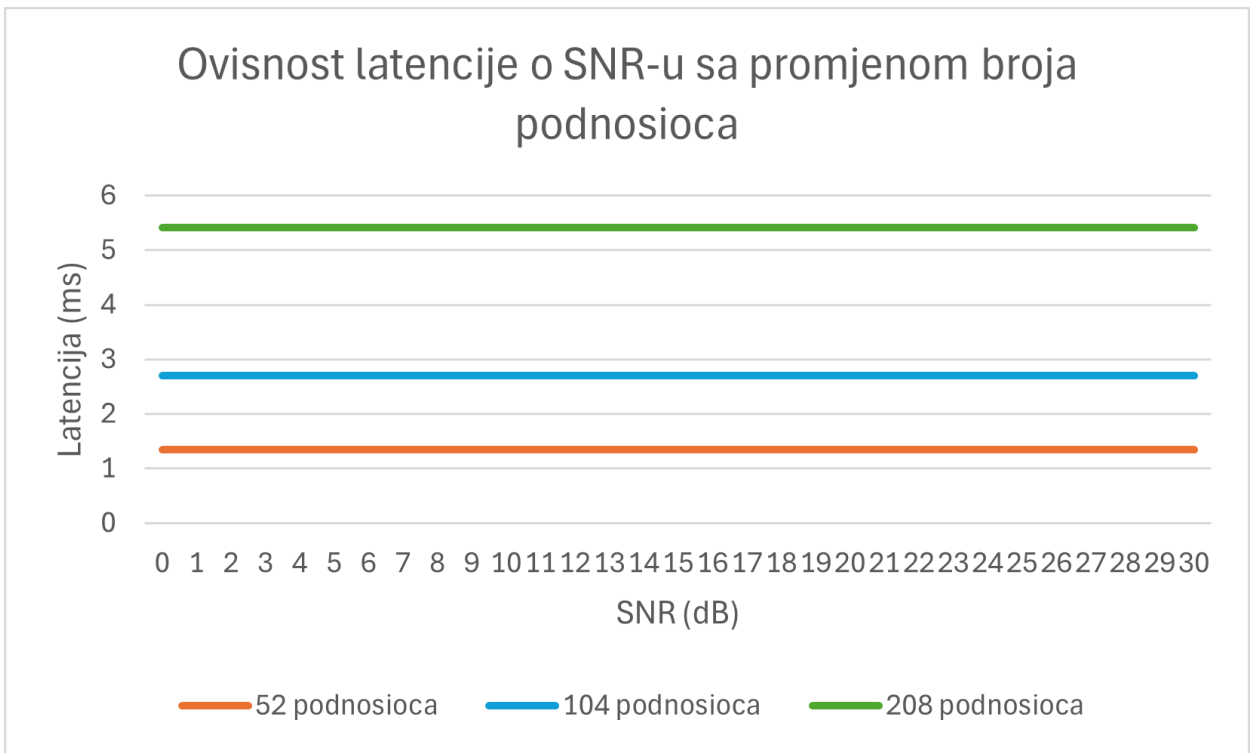
Graf na slici 4.20. prikazuje ovisnost BER-a o omjeru signal-šum (SNR) pri različitim brojevima podnosioca (52, 104, 208). Na x osi prikazan je SNR u dB, a na y osi prikazan je BER. Primjećuje se da BER opada s porastom SNR-a, što je uobičajeno jer veći omjer signal-šum smanjuje broj grešaka u prijenosu podataka. Ovaj pad je postupan, s početnim visokim BER-om pri niskim SNR vrijednostima, dok se s porastom SNR-a BER smanjuje gotovo do nule na visokim vrijednostima SNR-a. Može se primjetiti da bez obzira na broj podnosioca, sve tri linije (za 52, 104 i 208 podnosioca) se praktično preklapaju. To znači da promjena broja podnosioca nema značajan utjecaj na BER, što govori da broj podnosioca u ovom slučaju ne mijenja količinu grešaka po bitu, već je SNR ključni faktor koji određuje BER.





Sl. 4.20. Ovisnost BER-a o SNR-u sa promjenom broja podnosioca

Graf na slici 4.21. prikazuje ovisnost latencije o omjeru signal-šum (SNR) pri različitim brojevima podnosioca (52, 104, 208). Na x osi prikazan je SNR u dB, a na y osi prikazana je latencija u ms. Kao što se može vidjeti, latencija ostaje konstantna bez obzira na promjenu SNR-a, što znači da on nema utjecaja na vrijeme kašnjenja podataka. S druge strane, broj podnosioca očigledno utječe na latenciju jer svaka linija predstavlja različitu vrijednost latencije ovisno o broju podnosioca. Za 52 podnosioca, latencija je najniža i iznosi oko 1,5 ms. Za 104 podnosioca latencija iznosi oko 3 ms, a za 208 podnosioca ona je najviša i iznosi oko 5,5 ms. To pokazuje da veći broj podnosioca uzrokuje veće kašnjenje u prijenosu podataka zbog složenije obrade podataka kroz više paralelnih kanala. Dakle, dok SNR ne utječe na latenciju, povećanje broja podnosioca ima izravan utjecaj, povećavajući vrijeme koje je potrebno za prijenos podataka.



Sl. 4.21. Ovisnost latencije o SNR-u sa promjenom broja podnosioca

## 5. Zaključak

U okviru rada prikazano je i objašnjeno kako su se mobilne mreže razvile od prve generacije (1G) gdje je korišten analogni prijenos podataka, do 2G i 3G mreža kada se pojavljuje digitalni prijenos i mogućnost korištenja mobilnog interneta pa sve do predposljednje generacije (4G) gdje je doživljen značajan napredak u brzini i pouzdanosti usluge. Nakon toga dan je uvod na petu generaciju (5G) i objašnjena njena arhitektura, navedeni parametri te je uspoređena sa prethodnicima. U ovom završnom radu odrađene su simulacija 5G mreže koristeći program MATLAB kao alat. Cilj je bio izmjeriti neke najvažnije parametre poput latencije, brzine prijenosa podataka i BER-a sa promjenom širine frekvencijskog pojasa, reda modulacije i broja podnosioca te na taj način pružiti uvid u performanse 5G mreža. Simulacija je uključivala generiranje podataka za više korisnika, modulaciju, prijenos kroz kanal sa AWGN šumom i demodulaciju. Simulacijama je pokazano kako 5G dostiže velike brzine prijenosa podataka, što je jedan od najvažnijih parametara s obzirom na široku primjenu 5G mreža. Vrijednosti BER-a dobivene u simulaciji također su pokazatelj pouzdanosti ovog sustava mrežne komunikacije. Vrlo niske vrijednosti latencije dobivene u simulacijama igraju ključnu ulogu za primjenu 5G mreža u sustavima u auto industriji, zdravstvu te sustavima virtualne i proširene stvarnosti gdje je potreban gotovo trenutni odziv. U konačnici, razumijevanje performansi i ograničenja 5G tehnologije biti će ključno za daljnji napredak i implementaciju u sva područja modernog društva.

## LITERATURA

- [1] Mustansiriyah University, College of Engineering, "Evolution of Mobile Communication," 8 1 2022. [Online]. Available: [https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5\\_2022\\_01\\_08!04\\_30\\_36\\_PM.pdf](https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2022_01_08!04_30_36_PM.pdf). [Accessed 9 9 2024].
- [2] Ž. I. Gordan Šišul, »Povijesni razvoj javnih mobilnih mreža,« 18 3 2021. [Mrežno]. Available: <https://www.5g.hr/tehnologija/povijesni-razvoj-javnih-mobilnih-mreza/>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].
- [3] B. Burazer, »Hrvatski zavod za norme,« 21 11 2013. [Mrežno]. Available: <https://www.hzn.hr/UserDocsImages/pdf/EIS-Budu%C4%87nost%20mobilnih%20komunikacija%20i%20izazovi%20normizacije.pdf>. [Pokušaj pristupa 28 8 2024].
- [4] N. N. I. M. K. A. N. S. A. Majid Irfan Baba, »Evolution of Mobile Wireless Communication Systems from 1G to 5G: A Comparative Analysis,« 25 4 2018. [Mrežno]. Available: <https://1library.net/document/y439jjvz-evolution-mobile-wireless-communication-systems-g-comparative-analysis.html>. [Pokušaj pristupa 8 9 2024].
- [5] R. Baby, »Evolution of wireless technologies 1G to 5G in mobile communication,« 4 7 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.rfpage.com/evolution-of-wireless-technologies-1g-to-5g-in-mobile-communication/>. [Pokušaj pristupa 27 8 2024].
- [6] Ž. I. Jasna Janković, »Motivacija uvođenja 5G mreže,« 18 5 2021. [Mrežno]. Available: <https://www.5g.hr/tehnologija/motivancija-uvodenja-5g-mreze/>. [Pokušaj pristupa 1 9 2024].
- [7] Wikipedia, »5G,« 13 8 2024. [Mrežno]. Available: <https://hr.wikipedia.org/wiki/5G>. [Pokušaj pristupa 12 9 2024].
- [8] I. Havliček, »Arhitektura 5G mreže i mogućnosti primjene,« 22 5 2023. [Mrežno]. Available: <https://repozitorij.fpz.unizg.hr/islandora/object/fpz%3A3106/datastream/PDF/view>. [Pokušaj pristupa 5 9 2024].
- [9] I. Momić, »Načela rada 5G sustava,« 16 9 2022. [Mrežno]. Available: <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A3912/datastream/PDF/view#page=22&zoom=100,90,822>. [Pokušaj pristupa 12 9 2024].

## SAŽETAK

Ovaj rad se bavi simulacijama 5G mrežnog okruženja korištenjem programa MATLAB kao alata za tu simulaciju. Same simulacije obuhvaća mjerenje ključnih parametara poput brzine prijenosa podataka, latencije i Bit Error Rate-a sa promjenom širine pojasa, reda modulacije i broja podnosioca. Također, u radu je predstavljen razvoj mobilnih mreža od prve do pete generacije gdje je poseban naglasak stavljen na mreže pete generacije.

Ključne riječi: BER, brzina prijenosa podataka, latencija, MATLAB, simulacija 5G mreže

## **ABSTRACT**

Title: Simulation of 5G network environment

This paper deals with simulation of 5G network environment using MATLAB as a simulation tool. The simulation itself includes measuring key parameters such as data transfer rate, latency and Bit Error Rate with changes of bandwidth, modulation order and the number of subcarriers. Additionally, the paper presents the evolution of mobile networks from first to fifth generation with a special emphasis on fifth-generation networks.

Keywords: BER, data transfer rate, latency, MATLAB, 5G network simulation