

# Simulacija 4G mrežnog okruženja u MATLAB-u

---

**Pejaković, Marko**

**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:200:691112>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*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 4G MREŽNOG OKRUŽENJA U MATLAB-  
U**

**Završni rad**

**Marko Pejaković**

**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>	Marko Pejaković
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	5003, 27.07.2021.
<b>JMBAG:</b>	0165090054
<b>Mentor:</b>	doc. dr. sc. Denis Vranješ
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Simulacija 4G mrežnog okruženja u MATLAB-u
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Telekomunikacije i informatika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	U okviru ovog rada potrebno je opisati rad 4G mreže te korištenjem MATLAB-a izraditi simulaciju 4G mreže. Također je potrebno izmjeriti parametre mreže 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>	25.09.2024.
<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.

Ime i prezime Pristupnika:	Marko Pejaković
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	5003, 27.07.2021.
Turnitin podudaranje [%]:	5

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Simulacija 4G mrežnog okruženja u MATLAB-u**

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. 1G tehnologija .....	2
2.2. 2G tehnologija .....	3
2.3. 3G tehnologije.....	3
2.4. 4G tehnologija .....	4
2.5. 5G tehnologija .....	9
<b>3. SIMULACIJA 4G MREŽNOG OKRUŽENJA U MATLAB-U.....</b>	<b>10</b>
3.1. Naredbe simulacije.....	11
3.2. Promjena širine pojasa .....	16
3.3. Promjena reda modulacije .....	18
3.4. Promjena broja podnosioca .....	21
<b>4. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>25</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>27</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>29</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>30</b>

# 1. UVOD

Jedna od ključnih stvari za unapređenje modernog društva je razvoj telekomunikacijskih mreža. Na taj način omogućena je pouzdana i brza komunikacija na svjetskoj razini. Uvođenje četvrte generacije (4G) bežičnih mreža bio je važan korak za takav razvoj. Unaprijedile su se brzina prijenosa podataka, kvaliteta usluge te kapacitet mreže.

4G mobilna tehnologija je osnovana na dugoročnoj evoluciji (engl. *Long Term Evolution-LTE*) standardu te je pružila visokokvalitetni multimedijски sadržaj, brže preuzimanje i slanje podataka, stabilne mreže te dobru otpornost na zagušenost mreže. 4G tehnologija sastoji se od više slojeva i komponenti poput fizičkog sloja, raznih mrežnih protokola i mehanizama za upravljanje.

Što se tiče ovog završnog rada, simulirati će se 4G mrežno okruženje u programu MATLAB. MATLAB je koristan alat za simulaciju i analizu podataka te omogućuje veliki spektar funkcija, kao što su funkcije za modeliranje i evaluaciju komunikacijskih sustava. Cilj rada je prikazati rad 4G mreže pod raznim uvjetima. Ukupno je napravljeno 9 simulacija. Prvo se mijenjalo širina pojasa (engl. *Bandwidth*) u tri razine, 40MHz zatim 20MHz i na kraju 10MHz. Sljedeće se mijenjao red modulacije, također u tri razine, prvi red modulacije je 64, nakon njega 16 pa 8. Za kraj mijenjao se broj podnosioca isto u tri razine, počelo se s 128 podnosioca zatim s 64 i za kraj 32.

Prvi dio rada pruža osnovne informacije o bežičnim i mobilnim mrežama. Nabrojane su i ukratko opisane sve generacije mobilnih mreža od 1G do 5G. Iako je 5G najnovija generacija mobilnih mreža, fokus ovog rada bit će na 4G mrežama jer su one još uvijek u značajnoj upotrebi. Nakon opisa rada mreža različitih generacija slijedi objašnjenje provedenih simulacija 4G mrežnog okruženja nakon čega si prikazani rezultati i izneseni zaključci ovog rada.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Glavni cilj završnog rada je simulirati rad 4G mrežnog okruženje unutar programa MATLAB. Potrebno je izmjeriti parametre 4G mreže u različitim uvjetima: učestalost pogreške (engl. *Bit Error Rate-BER*), brzina prijenosa podataka i ukupno kašnjenje te ih prikazati uz pomoć tablice i grafikona.

## 2. MOBILNE MREŽE

Mobilne mreže omogućuju bežičnu komunikaciju između korisnika. Komunikacija se odvija pomoću radio valova. Jedan od osnovnih dijelova mobilnih mreža su bazne stanice. To su fizičke lokacije s antenama i opremom koje odašilju i primaju radio signale prema i od mobilnih uređaja. Drugi dio su mobilni uređaji, kao što su pametni telefoni i tableti, koji komuniciraju s baznim stanicama pomoću radio valova. Centralni dio mobilne mreže koji usmjerava glasovne i podatkovne pakete između baznih stanica i vanjskih mreža naziva se jezgra mreže. Ključni dio su frekvencijski spektri koji predstavljaju radio frekvencije koje mobilna mreža upotrebljava za prijenos podataka [1].

Mobilne mreže su se kroz godine mijenjale i napredovale pa tako postoje različite generacije. Prva generacija nazivala se 1G i ona je najstarija dok je najnovija generacija 5G. Svaka generacija donosi moderniju tehnologiju i bolje specifikacije. Mobilne mreže su ključne u današnje vrijeme zbog svoje mobilnosti i široke upotrebe. U nastavku detaljnije su opisane generacije mobilnih mreža.

### 2.1. 1G tehnologija

1G tehnologija je prva generacija telekomunikacijske bežične tehnologije. Koristi analogne radio signale za interakciju. Prvi put je predstavljena 1979.godine u Tokiju (Japan) od strane Nippon Telegraph i Telephone (NTT) tvrtke. Korištena je od početka 1980-ih do početka 1990-ih. 1981.godine 1G je uspostavljen u neke europske zemlje, a 1983. je uveden na američko tržište. Do kraja 1984. 1G je pokrивao cijeli Japan te je tako Japan postao prva država koja je imala 1G tehnologiju kroz cijelu zemlju. Brzina 1G tehnologije je iznosila maksimalno do 2.4kbps. Maksimalna propusnost je iznosila 30kHz. Jedina funkcija ove tehnologije su bili glasovni pozivi. Prije ovakvog načina komunikacije telefon je zahtijevao žičane veze za komunikaciju. Nakon uvođenja 1G tehnologije bilo je jednostavno uzeti telefon i komunicirati što je povećalo fleksibilnost komunikacije. 1G nadomještava 0G tehnologiju. Unutar 0G tehnologije su mobilni telefonski sustavi (engl. *Mobile Phone System*-MTS), napredni mobilni telefonski sustav (engl. *Advanced Mobile Phone System*-AMPS) i Push to Talk (PTT) koje su bile istaknute u to doba. 1G tehnologija koristila je jedan mrežni standard koji se zove Advanced Mobile Phone System (AMPS), koji i danas dominira [2]. Iako se dogodila revolucija u to vrijeme što se tiče komunikacije, 1G mreža je imala velike propuste. Zbog loše kvalitete zvuka, teško je bilo slušati drugu stranu poziva te sigurnost nije postojala jer nije bilo enkripcije te je prislušivanje poziva bila normalna stvar. 1G mreže su imale niski kapacitet što govori da je samo ograničeni broj

klijenata mogao istodobno biti povezan na mrežu u određenom geografskom području. Još jedan nedostatak ove tehnologije su bili mobilni uređaji. Mobilni uređaji su bili veliki, teški, neugodni za nošenje i skupi. Najpoznatiji među njima bio je Motorola DynaTAC 8000X koji je u to doba koštao gotovo 4000USD [3]. Iako su 1G mreže bile osnovni korak u razvoju mobilnih telekomunikacija, vrlo brzo su ih zamijenile novije generacije (2G, 3G, 4G i 5G) koje su donijele bolju verziju, digitalne tehnologije i modernije usluge.

## **2.2. 2G tehnologija**

Razvitak tehnologije doveo je do druge generacije komercijalne telekomunikacijske bežične tehnologije poznatija kao „2G“. 2G tehnologija koristi digitalne signale umjesto analogne za interakciju. Prvi put je uspostavljena 1991. u Finskoj te se temelji na Globalnom sustavu mobilnih komunikacija (engl. *Global System for Mobile Communications*-GSM). 2G je modernija tehnologija od prethodnika te je omogućila korisnicima slanje i primanje tekstualnih (engl. *Short Message Service*-SMS) i multimedijских poruka (engl. *Multimedia Messaging Service*-MMS) [2]. Brzina prijenosa ove tehnologije je bila do 14.4kbps, ali uz nadogradnje kao što su opća paketna radio usluga (engl. *General Packet Radio Service*-GPRS) i poboljšane brzine prijenosa podataka za GSM evoluciju (engl. *Enhanced Data rates for GSM Evolution*-EDGE) ta brzina je iznosila do 384kbps [4]. Kvaliteta zvuka je bila unaprijeđena te je zvuk bio čišći i jasniji tijekom razgovora i korisnik nije imao probleme s pozadinskim smetnjama. Sigurnost je također poboljšana zbog toga što su poruke i MMS-ovi bili digitalno šifrirani i samo ih je korisnik mogao otvoriti. 2G tehnologija je imala veći kapacitet, što je omogućilo komunikaciju više korisnika unutar istog područja. Mobilni uređaji su postali praktičniji i pristupačniji široj javnosti te im je baterija trajala duže. Jedan od poznatijih mobilnih uređaja u ovoj generaciji je Nokia 3310. 2G tehnologija je omogućila rast internetske industrije i široko usvajanje mobilnih telefona širom svijeta. Primjenom digitalnih komunikacija i novih usluga poput SMS-a i MMS-a, 2G je postavila osnovu za daljnji razvoj mobilnih mreža i novijih tehnologija kao što su 3G, 4G i 5G [2].

## **2.3. 3G tehnologije**

3G tehnologija je iduća generacija komercijalne telekomunikacijske bežične tehnologije. Nudi kvalitetnije usluge u svim područjima u odnosu na prethodnika. Koristi digitalni prijenos podataka te pruža poboljšanu kvalitetu glasa i podatkovnih usluga. Uspostavljena je 2001. godine i slijedi kriterije koje je postavila Međunarodna telekomunikacijska unija (engl. *International Telecommunication Union* - ITU). 3G mreže pružaju brzinu od 144Kbps u pokretnim uvjetima do 2Mbps u stacionarnim. U kasnijim inačicama 3G tehnologije, kao što su paketni pristup veliko



brzinom (engl. *High Speed Packet Access-HSPA*) i paketni pristup veliko brzinom plus (engl. *High Speed Packet Access plus-HSPA+*), omogućena je brzina do 21.6Mbps. 3G tehnologija je u potpunosti promijenila način korištenja mobilnih uređaja. Ova tehnologija je omogućila videopozive, mobilni internet, strujanje videa i glazbe, brže preuzimanje i prijenos podataka, slanje i primanje novca preko internet bankarstva te razvoj aplikacija koje su zahtijevale veće brzine prijenosa podataka i nižu latenciju. Korisnik je mogao koristiti 3G samo ako je imao mobilni uređaj koji je podržavao 3G tehnologiju [2]. Razvili su se pametni telefoni s boljim mogućnostima za korištenje internetom i aplikacijama, videopozive i multimedijalne sadržaje te se tako upoznajemo s prvim modelima iPhone-a, Android telefona i BlackBerry uređaja. 3G mreže su koristile različite frekvencijske opsege koji su ovisili o regiji i tehnologiji. To su bili opsezi oko 800MHz, 900MHz, 1800MHz, 1900MHz i 2100MHz. 3G mreže su također omogućile i roaming usluge te su na taj način korisnici koristili mobilne uređaje u inozemstvu s većom pouzdanošću i kompatibilnošću. 3G tehnologija je koristila napredne sigurnosne protokole za šifriranje podataka te tako povećala sigurnost komuniciranja [5]. 3G tehnologija je drastično unaprijedila mobilnu komunikaciju osiguravši brži prijenos podataka, kvalitetnije usluge i razvoj novih aplikacija koje su promijenile način na koji se koriste mobilni uređaji. Ova tehnologija postavila je osnovu za daljnji razvitak 4G i 5G tehnologija, koje donose još veće brzine i naprednije mogućnosti.

## 2.4. 4G tehnologija

4G tehnologija je četvrta generacija komercijalne telekomunikacijske bežične tehnologije. S radom je počela sredinom 2000-ih te je donijela poboljšanja u vezi brzine prijenosa podataka, kapaciteta mreže i kvalitete usluga [2].

Brzina prijenosa podataka definira brzinu kojom se podaci prenose s jednog uređaja na drugi preko mreže ili nekog drugog komunikacijskog kanala. Često se izražava u bitovima po sekundi (bps), kilobitima po sekundi (kbps), megabitima po sekundi (Mbps) ili gigabitima po sekundi (Gbps). Brzina prijenosa podataka utječe na efikasnost i kvalitetu mreže i prijenos podataka te se temelji se na širini frekvencijskog pojasa, vrsti modulacije i učestalosti pogreške (engl. *Bit Error Rate-BER*). Širina frekvencijskog pojasa (engl. *Bandwidth*) označava osnovni model u telekomunikacijama i obradi signala. Određuje koliki je raspon frekvencija unutar nekog pojasa koji signal zauzima ili raspon frekvencija koji sustav može predati ili primiti. Ima jako bitnu ulogu u simulaciji jer direktno utječe na 4G mrežu i njene karakteristike. Što je veća širina pojasa to je i veća maksimalna brzina prijenosa odnosno veće su brzine preuzimanja i slanja. Također, širina pojasa utječe i na kapacitet mreže, što je veća širina pojasa to se više korisnika može koristiti

mrežom i obratno. Ako širina pojasa nije prilagođena uvjetima korištenja može se dogoditi da se podaci krenu gubiti odnosno dođe do zagušenja mreže. Raspon frekvencija 4G mreže je najčešće između 700MHz i 3.5GHz. BER je omjer broja pogrešno detektiranih bitova i ukupno odaslanih bitova te predstavlja kvalitetu primljenog signala u realnom digitalnom sustavu. U sustavima gdje jedno stanje signala nosi N bitova mjeri se i stopa pogreške simbola (engl. *Symbol Error Rate-SER*). SER se za dovoljno velik broj odaslanih bitova približava teorijskoj vjerojatnosti pogreške  $P_e$  ako realni uvjeti odgovaraju uvjetima pod kojim je izvedena  $P_e$ . Ukoliko se pogreška detekcije signala može aproksimirati kao „pogreška najbližeg susjeda“, tada uz *Gray-ev* kod BER će biti približno jednak SER-u, a tako i vjerojatnosti pogreške. 4G mreža omogućuje brzinu prijenosa podataka do 100Mbps u pokretnim uvjetima i 1Gbps u fiksnim uvjetima. Takva brzina mreže je omogućila brže preuzimanje i prijenos podataka, glatko prikazivanje videozapisa visoke kvalitete i bolji doživljaj igranja videoigara [2].

Postoje dvije vrste 4G standarda. Jedan od njih je svjetska interoperabilnost za mikrovalni pristup (engl. *WorldWide Interoperability for Microwave Access-WiMAX*), a drugi je dugoročna evolucija (engl. *Long Term Evolution-LTE*). Oba standarda koriste ravnu arhitekturu osnovanu na IP protokolu. Raspon frekvencijskog pojasa WiMAX standarda je između 700MHz i 2,2 GHz dok je taj raspon kod LTE standarda između 2 i 11 GHz. Koriste jednake modulacije za silazne i ulazne veze: 16QAM i 64QAM te najčešće nude fleksibilnu propusnost [6]. Kvadratura amplitudna modulacija (engl. *Quadrature Amplitude Modulation-QAM*) predstavlja kvadraturnu diskretnu modulaciju amplitude s N kombinacija amplitude i faze prijenosnog signala. N je broj točaka (stanja) u konstalacijskom dijagramu. Istovremeno se mijenja i amplituda i faza prijenosnog signala i na taj način se prenosi više bitova u jednom stanju, a samim time i brzina prijenosa podataka. 8-QAM modulacija prenosi 3 bita po jednom stanju, 16-QAM 4 bita, a 64-QAM prenosi 6 bita. Ovakva modulacija je ključna za simulaciju jer direktno utječe na BER, brzinu prijenosa podataka i spektralnu efikasnost. 64-QAM prenosi najviše bita po stanju zato će imati najveću brzinu prijenosa podataka, ali je i najranjiviji na šum i smetnje pa samim time će BER kod njega biti najveći dok je kod 8-QAM obrnuto. 8-QAM će imati najmanju brzinu, ali će biti najotporniji na šum i smetnje.

Karakteristike koje obilježavaju 4G tehnologiju su niska latencija i veliki kapacitet. Niska latencija je ključna za aplikacije koje zahtijevaju brze reakcije poput online videoigara i videozapisa. Veći kapacitet je omogućio više korisnika istovremeno povezanih na mrežu bez gubljenja osnovnih karakteristika 4G mreže. Ove karakteristike su omogućile i neke napredne mobilne usluge kao što su glas preko IP-a (engl. *Voice over IP-VoIP*) te je na taj način dobivena

moгуćnost glasovnih poziva preko internet protokola. Video pozivi su bili poboljšane kvalitete te je 4G mreža podržavala prikaz videozapisa u visokoj rezoluciji (HD) i ultra visokoj rezoluciji (UHD). 4G tehnologija je dovela do razvoja pametnih telefona i tableta s naprednim funkcijama, boljim zaslonima i jaćim procesorima te je omogućila brže preuzimanje aplikacija, videoigara itd [7].

Osnovne tehnologije koje se koriste u 4G mrežama su ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (engl. *Orthogonal frequency division multiplexing*-OFDM), višestruki ulaz, višestruki izlaz (engl. *Multiple Input, Multiple Output*-MIMO) i agregacija nositelja (engl. *Carrier Aggregation*-CA). Ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje je metoda modulacije koja se upotrebljava da dijeli frekvencijski pojas na manje podnosiocice te ih se posebno modulira jedan po jedan. Ovakva modulacija smanjuje smetnje i poboljšava efikasnost. Na taj naćin dovodi se do bolje kvalitete signala i većih brzina prijenosa podataka. Podnosioci su određene frekvencije unutar frekvencijskog spektra te predstavljaju osnovni element prijenosa podataka u OFDM tehnologiji. Svaki od podnosioca prenosi dio informacije i svi podnosioci rade paralelno i na taj naćin omogućuju da se veća kolićina podataka prenese istovremeno. U teoriji s povećanjem broja podnosioca povećava se i brzina prijenosa podataka jer se podaci prenose paralelno, BER se može smanjiti, ali to ovisi i o drugim parametrima, a ne samo o broju podnosioca. Također, ukupno kašnjenje može se smanjivati, ali ovisi o dućini cikličkog prefiksa. Ukupno kašnjenje je vrijeme potrebno da se paket ili podaci prenesu od izvora do odredišta. Obuhvaća fizićka kašnjenja, kašnjenja u prijenosu, obradi i ćekanju, koja sva utjeću na performanse i efikasnost mreže. Dućina cikličkog prefiksa (engl. *Cyclic Prefix*-CP) je ključan parametar unutar OFDM sustava. Smanjuje mećusobne rezonancije izmeću stanja i pomaže pri sinkronizaciji prijemnika. Ciklički prefiks se dodaje na poćetak svakog OFDM simbola te se sastoji od kopije kraja tog OFDM simbola. Na taj naćin osigurava smanjuje kašnjenje simulacije i omogućava da se stanja ispravno dekodiraju. MIMO je tehnologija koja upotrebljava više antena na strani odašiljaća i na strani prijammnika. Istovremeno prenosi više kanala podataka poboljšavajući spektralnu efikasnost i brzinu prijenosa podataka. Jedan od tipova MIMO tehnologije je 2x2MIMO koja oznaćava da se nalaze dvije antene sa svake strane, sa strane odašiljaća i sa strane prijemnika. Ima široku primjenu te nudi unaprjećenu pouzdanost signala i umjerene brzine prijenosa podataka. 4x4MIMO je drugi tip MIMO tehnologije koja oznaćava da se nalaze ćetiri antene na strani odašiljaća i ćetiri antene na strani prijemnika. Primjenjuje se u poboljšanim mrežama, nudi veće brzine i bolju kvalitetu signala. Agregacija nositelja je komponenta 4G tehnologije koja izvršava kombinaciju više frekvencijskih pojaseva te tako ostvaruje veću propusnost. Također omogućuje veće brzine nego

što je to moguće samo s jednim pojasom [8]. Što se tiče sigurnosti, 4G mreže su koristile napredne sigurnosne protokole za šifriranje podataka i autentikaciju korisnika. Pojavili su se „Internet stvari“ (engl. *Internet of Things-IoT*) uređaji i aplikacije te povezali različite uređaje u pametnim domovima, industriji i drugim područjima. IoT uređaji su dijelovi sklopovlja, kao što su senzori i aktuatori. Imaju mogućnost povezivanja na internet ili lokalnu mrežu te na taj način razmjenjuju podatke s drugim uređajima ili aplikacijama [7].

Unutar 4G mreže koriste se resursni blokovi (engl. *Resource Blocks-RB*) koji su osnovna jedinica za dodjelu frekvencijskih i vremenskih resursa između korisnika. Imaju ključnu ulogu u organizaciji i raspodjeli resursa unutar frekvencijskog spektra koji se upotrebljava za prijenos podataka. Pomoću resursnih blokova povećava se propusnost i efikasnost mreže. Resursni blokovi koriste OFDM tehnologiju za prijenos podataka [9]. U frekvencijskog domeni, resursni blok se sastoji od 12 podnosioca. Svaki od podnosioca ima širinu od 15kHz, što govori da svaki resursni blok zauzima 180kHz u frekvencijskoj domeni. U vremenskoj domeni, resursni blok traje 0,5 milisekundi. Tijekom tog perioda koristi se 6 ili 7 OFDM simbola, ovisno o cikličkom prefiksu. Resursni blokovi se dinamički dodjeljuju korisnicima ovisno o potrebama prijena podataka i trenutnim uvjetima u mreži. Na primjer, korisniku kojemu je dodijeljeno više resursnih blokova imat će veću propusnost, a samim time i veću brzinu prijena podataka [10]. Oni su ključni unutar 4G mreže jer osiguravaju dinamičku i fleksibilnu raspodjelu resursa među korisnicima, optimiziraju propusnost, smanjuju smetnje i šum, osiguravaju da mreža radi neometano te prilagođavaju mrežu na temelju potrebe korisnika.

U 4G mrežama, parametri mreže se dinamički mijenjaju s obzirom na uvjete u stvarnom vremenu. Parametri ovise o mrežnom prometu, kapacitetu mreže, korisničkim zahtjevima, smetnjama i pokrivenosti signala. Dodjela resursa korisnicima (engl. *Resource Allocation*) se odvija pomoću višestrukog pristupa s ortogonalnom frekvencijskom podjelom (engl. *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access-OFDMA*). Resursi u vremenu i frekvenciji (resursni blokovi) dinamički se dodjeljuju korisnicima ovisno o trenutnom opterećenju mreže, kvaliteti signala i prioritetima na mreži. Na primjer, korisnik s kvalitetnijim signalom ili većim prioritetom mogu dobiti više resursa dok korisnici sa slabijim signalom ili manjim prioritetom mogu biti raspoređeni na manje zaokupljene resurse [11]. Adaptivna modulacija i kodiranje (engl. *Adaptive Modulation and Coding-AMC*) je mehanizam koji osigurava dinamičku promjenu modulacijskih shema i nivoa kodiranja u ovisnosti o kanalu. Na primjer, ako korisnik ima jak signal ili slab šum, koristit će se efikasnija modulacija (64-QAM) koja osigurava veće brzine prijena podataka i manji nivo kodiranja, dok korisnici u lošijim uvjetima prelaze na modulacije koje osiguravaju manju pogrešku

pri prijenosu kao što su 16QAM ili QPSK [12]. Unutar 4G mreža koristi se dinamička kontrola snage kako bi se povećala učinkovitost upotrebe resursa. Ovo uključuje prilagodbu snage prijenosa bazne stanice i korisničkih uređaja. Na primjer, korisnici koji su bliži baznoj stanici koriste manju snagu prijenosa. U 4G koristi se i dinamičko prenošenje i odnosi se na prijenos veze s jedne na drugu baznu stanicu i njihovu prilagodbu na mrežne uvjete. Za dinamičku prilagodbu koristi se još i koordinacija smetnji (engl. *Interface Coordination*) koja služi za održavanje nivoa kvalitete mreže u gusto naseljenim područjima [11]. Parametri unutar 4G mreže dinamički se mijenjaju upotrebljavajući napredne algoritme i metode kako bi se optimizirala kvaliteta mreže, smanjile smetnje i šumovi, povećao kapacitet mreže i osigurala najbolja usluga korisnicima.

4G tehnologija je veliki napredak mobilne komunikacije osiguravajući brže i pouzdanije prijenose podataka, moderne usluge i kvalitetnije korisničko iskustvo. Ona je postavila temelj za razvitak 5G tehnologije, koja donosi još veće brzine, manju latenciju i veći kapacitet mreže. Tablica 2.1. prikazuje osnovne parametre 4G tehnologije i njihove vrijednosti. Tipična vrijednost je ona koju korisnici uobičajeno imaju u stvarnim uvjetima korištenja. Najbolji slučaj je onaj koji imaju također korisnici, ali u nekim najboljim vanjskim uvjetima dok je teorijski maksimum ona veličina u savršenim uvjetima odnosno u laboratorijskim okruženjima.

Tablica 2.1. Prikaz vrijednosti parametara 4G mreže

<b>Parametri</b>	<b>Tipična vrijednost</b>	<b>Najbolji slučaj</b>	<b>Teorijski maksimum</b>
Brzina preuzimanja	10-50Mbps	Do 150Mbps	1Gbps
Brzina slanja	5-30Mbps	Do 50Mbps	100Mbps
Latencija	30-70ms	Oko 20ms	10ms
Frekvencijski pojasevi	Od 700MHz do 3.5GHz	Regionalno i specifično za operatere	Do 100MHz s agregacijom nositelja
Korisnički kapacitet	Nekoliko tisuća po baznoj stanici	Ovisi o prometnom opterećenju i spektru	Varira
Kvaliteta poziva (VoLTE)	HD glas, brzo uspostavljanje poziva	Rijetko prekidanje poziva	Bez prekida poziva, veća pouzdanost od 3G

## 2.5. 5G tehnologija

5G tehnologija je najnovija generacija komercijalne telekomunikacijske bežične tehnologije. Donosi značajan napredak u vezi brzine, kapaciteta i pouzdanosti u usporedbi s prethodnim generacijama mobilnih mreža. U teoriji brzina prijenosa podataka 5G tehnologije iznosi 20Gbps dok se u praksi pokazalo da brzina iznosi između nekoliko stotina Mbps i nekoliko Gbps. Karakteristike ove tehnologije su niska latencija odnosno manje kašnjenje. Latencija je manja od 1 milisekunde što je jako bitno za zahtjeve koji trebaju trenutne reakcije kao što su autonomna vozila, operacije na daljinu i virtualna stvarnost (engl. *Virtual Reality*-VR). U usporedbi s 4G tehnologijom, 5G ima veći kapacitet odnosno može podržati veći broj uređaja, što je bitno za pametne gradove, pametne domove, IoT uređaje itd. 5G mreža maksimalno iskorištava dostupni spektar tako što koristi modernije tehnike modulacije i na taj način se postiže bolja učinkovitost spektra [13]. Postoje različite vrste 5G tehnologije s obzirom na frekvencijski opseg koji koristi. MmWave (milimetarski valovi) je tehnologija koja upotrebljava visoke vrijednosti frekvencijskog spektra (između 24 i 100GHz). Prednost te tehnologije je velika brzina, ali nedostatak je ograničeni domet i zahtijevaju bolju infrastrukturu baznih stanica. Druga vrsta tehnologije je Sub-6GHz koja upotrebljava niže frekvencije (6GHz i niže), brzina je manja, ali ima kvalitetniju pokrivenost i otporniji je na prepreke. Treća tehnologija je dijeljenje dinamičkog spektra (engl. *Dynamic Spectrum Sharing*-DSS) koja osigurava dijeljenje spektra između 4G i 5G mreža [14]. 5G tehnologija je otvorila mnogo mogućnosti i namjena. Jedna od mogućnosti su pametni gradovi jer 5G osigurava povezanost za infrastrukturu. Na taj način bi se upravljalo prometnim sustavima, javnom sigurnošću i energijom. Također, 5G ima svoju primjenu u industriji jer omogućuje automatizaciju sustava i naprednu robotiku. Zbog svoje niske latencije i visoke pouzdanosti, 5G mreža ima primjenu i u medicini. Omogućuje dijagnostiku na daljinu, telemedicinu i operacijske zahvate na daljinu. 5G je još sigurniji od prethodnika zbog poboljšanih mehanizama autentifikacije korisnika i enkripcije podataka. Mana 5G mreža je potrošnja više energije zbog gustoće baznih stanica, ali polako se nadzire rješenje tog problema u vidu energetski efikasnijih komponenti i tehnologija te se na taj način smanjio utjecaj na okoliš [15]. 5G tehnologija donosi drastičan napredak u mobilnim komunikacijama, nudeći pogodnosti za nove aplikacije i usluge koje zahtijevaju velike brzine, nisku latenciju i pouzdanu povezanost. Ova tehnologija stvara temelj za buduće tehnologije u raznim industrijama i svakodnevnom životu.

### 3. SIMULACIJA 4G MREŽNOG OKRUŽENJA U MATLAB-U

U okviru ovog poglavlja bit će detaljnije pojašnjen tijek simulacije kao i parametri koji su mijenjani i mjereni.

Sama simulacija provedena je u programskom paketu MATLAB je računalna platforma za programiranje i numeričke proračune koju koriste milijuni inženjera i znanstvenika za analizu podataka, izradu algoritama i kreiranje modela. Glavna struktura podataka u MATLAB-u je matrica. Na taj način se osigurava lakša manipulacija s velikom količinom podataka.

Osnovne mogućnosti MATLAB-a su:

- analiza podataka: istraživanje, modeliranje i analiziranje podataka,
- grafika: vizualizacija podataka zbog sposobnosti stvaranja 2D i 3D grafikona
- programiranje: stvaranje skripti, funkcija i klasa,
- izrada aplikacije,
- vanjska jezična sučelja: korištenje MATLAB-a s Python-om, C/C++-om, Javom i drugim jezicima,
- paralelno računanje: izvršavanje velikih izračuna,
- funkcionalnosti za matematiku i numeričku analizu: MATLAB sadrži velike biblioteke za različite operacije, npr. za statistiku, *Fourier*-ove analize, integracije, diferencijalne jednačbe, optimizaciju itd.,
- *toolbox*-ovi: MATLAB uključuje i dodatne biblioteke za neke specifične aplikacije poput obrade signala, strojno učenje, kontrolne sustave, bio-informatike i računalne vizije,
- simulink integracija: MATLAB omogućuje suradnju sa Simulink-om za modeliranje i simulaciju dinamičkih sustava.

MATLAB nudi mogućnost promjene određenih parametara prijenosa u 4G mrežnom okruženju te mogućnost mjerenja parametara koji su bitni za određivanje kvalitete i efikasnosti prijenosa. U ovom radu promatralo se kako promjena širine pojasa, reda modulacije i broja podnosioca utječe na vjerojatnost pogreške, brzinu prijenosa i kašnjenje [16]

### 3.1. Naredbe simulacije

MATLAB kod koji se koristi za simulaciju 4G mreže:

**Linija**    **Kod**

```
1:      % Simulation Parameters
2:      carrierFrequency = 2.4e9;      % Carrier frequency in Hz
3:      bandwidth = 20e6;              % Bandwidth in Hz
4:      modulationOrder =64;          % 64-QAM modulation
5:      numSubcarriers = 64;          % Number of OFDM subcarriers
6:      numSymbols = 1000;            % Number of OFDM symbols
7:      snrRange = 0:1:25;            % Range of SNR values in dB
```

Sl. 3.1. Parametri simulacije 4G mrežnog okruženja

U prvom bloku naredbi određuju se parametri koji su potrebni za simulaciju 4G modela mreže. Naredba *carrierFrequency* postavlja nosivu frekvenciju na 2,4GHz.. U ovom slučaju širina pojasa postavljena je na 20MHz, ali će se kroz rad mijenjati. Sljedeća naredba je *modulationOrder* i s njom se definira red modulacije. U ovom slučaju red modulacije je 64. Naredba *numSubcarriers* postavlja broj OFDM podnosioca (engl. *subcarriers*) korištenih u simulaciji. *NumSymbols* označava broj OFDM simbola te je postavljen na 1000. Sljedeća naredba je *snrRange* koja označava raspon omjera signal-šum (engl. *Signal-To-Noise Ratio-SNR*) vrijednosti.

**Linija**    **Kod**

```
8:      % Preallocate arrays for results
9:      berArray = zeros(length(snrRange), 1);
10:     dataTransferRateArray = zeros(length(snrRange), 1);
11:     totalDelayArray = zeros(length(snrRange), 1);
```

Sl. 3.2. Dodjeljivanje polja završnim parametrima

Unutar polja *berArray*, *DataTransferRateArray* i *totalDelayArray* spremati će se rezultati simulacije. Potrebno ih je prethodno definirati kako bi se svi podaci uspješno spremili.

**Linija**    **Kod**

```
12:     for i = 1:length(snrRange)
13:         snr = snrRange(i);
```

Sl. 3.3. Glavna petlja simulacije

Unutar glavne petlje simulacije prolazi se kroz svaki SNR (*snrRange*) u rasponu. *Snr=snrRange(i)* postavlja trenutnu SNR vrijednost u izvođenje.



**Linija Kod**

```
14: % Generate random bits
15: numBits = numSubcarriers * log2(modulationOrder) * numSymbols;
16: data = randi([0 1], numBits, 1);
```

Sl. 3.4. Generiranje nasumičnih bitova

*NumBits* varijabla izračunava ukupan broj bitova za prijenos unutar simulacije dok se u varijablu *data* spremaju stvoreni nasumični bitovi. Nasumični bitovi su generirani pomoću naredbe *randi*.

**Linija Kod**

```
17: % 64-QAM Modulation
dataSymbols = qammod(data, modulationOrder, 'InputType', 'bit',
18: 'UnitAveragePower', true);
```

Sl. 3.5. Modeliranje podataka uz pomoć 64-QAM modulacije

Pomoću naredbe *qammod* nasumični bitovi, koji su stvoreni u prethodnom koraku, su modulirani pomoću 64-QAM modulacije. Modulirani nasumični bitovi su spremljeni u varijablu *dataSymbols*.

**Linija Kod**

```
19: % Reshape data into OFDM symbols
dataSymbolsMatrix = reshape(dataSymbols, numSubcarriers,
20: numSymbols);
```

Sl. 3.6. Preoblikovanje podataka u OFDM simbole

Modulirani podaci iz prethodnog koraka se preoblikuju u matricu kako bi se odradila OFDM modulacija. Za preoblikovanje u matricu korištena je naredba *reshape* te je sve spremljeno unutar varijable *dataSymbolsMatrix*.

**Linija Kod**

```
21: % Perform IFFT to generate OFDM time-domain signal
22: ofdmSignal = ifft(dataSymbolsMatrix);
```

Sl. 3.7. Izvođenje IFFT za generiranje OFDM signala

Naredba *ifft* primjenjuje inverznu Fourierovu transformaciju te na taj način pretvara simbole frekvencijske domene u OFDM signal vremenske domene. Fourierova transformacija je matematička metoda koja se upotrebljava za transformaciju signala iz vremenske domene u frekvencijsku domenu. U simulaciji korištena je brza Fourierova transformacija (engl. *Fast*

Fourier Transform-FFT) koja je efikasan algoritam za računanje diskretne Fourierove transformacije.

**Linija Kod**

```
23: % Add cyclic prefix
24: cpLength = numSubcarriers / 4;
25: ofdmSignalWithCP = [ofdmSignal(end-cpLength+1:end, :); ofdmSignal];
```

Sl. 3.8. Dodavanje cikličkog prefiksa

Unutar varijable *cpLength* izračunata je duljina cikličkog prefiksa dok se u varijabli *ofdmSignalWithCp* dodaje ciklički prefiks OFDM signalu.

**Linija Kod**

```
26: % Flatten OFDM signal for transmission
27: txSignal = ofdmSignalWithCP(:);
```

Sl. 3.9. Izjednačavanje OFDM signala za prijenos

Pomoću ove naredbe matrica OFDM signala je izjednačena u jedan vektor kako bi bilo pogodnije za prijenos.

**Linija Kod**

```
28: % Add AWGN
29: rxSignal = awgn(txSignal, snr, 'measured');
```

Sl. 3.10. Dodavanje AWGN kanal

Dodavanjem AWGN kanala, signalu se dodaje Gaussov bijeli šum koji se temelji na vrijednosti SNR-a. Gaussov bijeli šum je termički šum (pojavljuje se na omskim otporima zbog nepravilnog toplinskog gibanja elektrona) kod kojega je spektralna gustoća snage približno konstantna u području od 0 Hz do  $4.3 \cdot 10^9 \cdot T[\text{K}]$  Hz te se on modelira kao stacionarni, ergodični slučajni proces kod kojega se amplitude mijenjaju u skladu s Gausovim zakonom. Predstavlja realan tip nasumičnog šuma te omogućuje razumijevanje rada 4G simulacije u određenim uvjetima. Koristi se za analizu BER-a, određuje koliko se šuma može unijeti u odaslani signal kako bi se dobio prihvatljivi BER. Bez simuliranja Gaussovog bijelog šuma, teško je procijeniti kako 4G mreža radi u realnim uvjetima. Kanal aditivnog Gaussovog bijelog šuma (engl. *Additive White Gaussian Noise channel-AWGN*) je model kanala koji dodaje Gaussianov bijeli šum tijekom prijenosa podataka. Često se koristi u testiranju i simulaciji jer može prikazati realne uvjete prijenosa u digitalnim komunikacijama. Također se koristi i kod istraživanja utjecaja šuma na prijenos podataka.

**Linija Kod**

```
30: % Reshape received signal
    rxSignalMatrix = reshape(rxSignal, numSubcarriers + cpLength,
31: numSymbols);
```

Sl. 3.11. Preoblikovanje primljenog signala

Od ovog koraka pokušava se dobiti izvorni signal koji je poslan od predajnika. Pomoću naredbe *reshape* primljeni signal je preoblikuje nazad u matrični oblik.

**Linija Kod**

```
32: % Remove cyclic prefix
33: rxSignalWithoutCP = rxSignalMatrix(cpLength+1:end, :);
```

Sl. 3.12. Uklanjanje cikličkog prefiksa

Unutar varijable *rxSignalWithoutCP* spremljen je primljeni signal bez cikličkog prefiksa.

**Linija Kod**

```
34: % Perform FFT
35: receivedSymbols = fft(rxSignalWithoutCP);
```

Sl. 3.13. Primjena FFT

Pomoću naredbe *fft* primjenjuje se brza Fourierova transformacija. Signal se pretvara natrag iz vremenske domene u frekvencijsku domenu.

**Linija Kod**

```
36: % Reshape received symbols into a vector
37: receivedSymbolsVector = receivedSymbols(:);
```

Sl. 3.14. Izjednačavanje matrice primljenih simbola

Pomoću ove naredbe matrica primljenih simbola je izjednačena u jedan vektor.

**Linija Kod**

```
38: % 64-QAM Demodulation
    receivedData = qamdemod(receivedSymbolsVector, modulationOrder,
39: 'OutputType', 'bit', 'UnitAveragePower', true);
```

Sl. 3.15. Demodulacija pomoću 16-QAM modulacije

Primljeni signal demodulira se pomoću 64-QAM modulacije natrag u bitove. Za demodulaciju koristila se naredba *qamdemod*.

### **Linija Kod**

```
40: % Calculate Bit Error Rate (BER)
41: [numErrors, ber] = biterr(data, receivedData);
42: berArray(i) = ber;
```

Sl. 3.16. Izračun Bit Error Rate(BER) parametra

U ovom koraku simulacije izračunata je učestalost pogreške (BER) usporedbom poslanih i primljenih podataka. Bitna pogreška izračunata je pomoću naredbe *biterr*. Naredbom *berArray(i)=ber* određena vrijednost BER-a spremljena je za određenu vrijednost SNR-a.

### **Linija Kod**

```
43: % Calculate Data Transfer Rate (bps)
44: dataTransferRate = bandwidth * log2(modulationOrder) * (1 - ber);
45: dataTransferRateArray(i) = dataTransferRate;
```

Sl. 3.17. Izračun brzine prijenosa podataka

Unutar varijable *dataTransferRate* izračunata je brzina prijenosa podataka. Naredbom *dataTransferRateArray(i)=dataTransferRate* određena vrijednost brzine prijenosa podataka spremljena je za određenu vrijednost SNR-a.

### **Linija Kod**

```
46: % Calculate Total Delay
47: totalDelay = numSymbols * (numSubcarriers / bandwidth);
48: totalDelayArray(i) = totalDelay;
```

Sl. 3.18. Izračun ukupnog kašnjenja

Prvom naredbom izračunato je ukupno kašnjenje simulacije koje se temelji na broju simbola i podnosioca (engl. *subcarriers*). Naredbom *totalDelayArray(i)=totalDelay* određena vrijednost kašnjenja spremljena je za određenu vrijednost SNR-a.

### **Linija Kod**

```
49: % Display results in command window
50: fprintf('SNR (dB) \t BER \t\t Data Transfer Rate (Mbps) \t Total
51: Delay (ms)\n');
52: for i = 1:length(snrRange)
53:     fprintf('%d \t\t %e \t %f \t\t\t %f\n', snrRange(i), berArray(i),
54:     dataTransferRateArray(i) / 1e6, totalDelayArray(i) * 1e3);
55: end
```

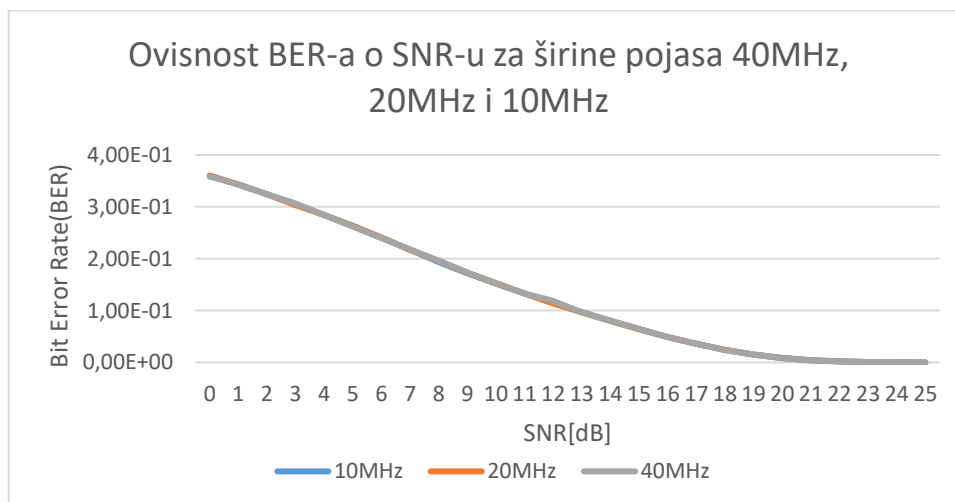
Sl. 3.19. Prikaz rezultata u CMD-u

Ovim blokom naredbi prikazali smo rezultate simulacije u tablici.

### 3.2. Promjena širine pojasa

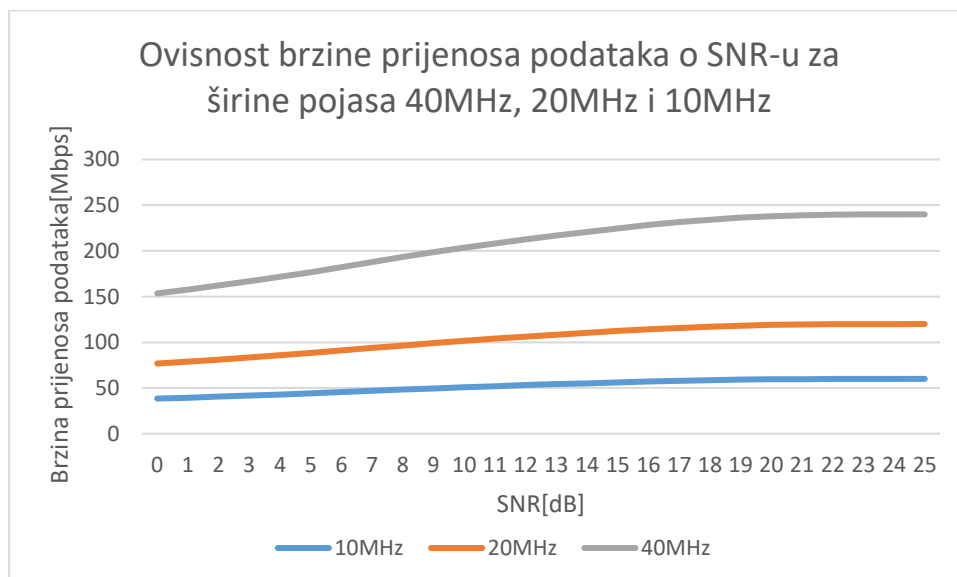
Unutar sljedećih simulacija nosiva frekvencija iznosi 2.4GHz, red modulacije je 64, broj podnosioca također 64, broj OFDM simbola postavljen je na 1000 i raspon SNR vrijednosti je od 0 do 25 dB, u koracima od 1 dB. Mijenjala se širina pojasa (engl. *bandwidth*) čije su vrijednosti iznosile 40MHz, 20MHz i 10 MHz.

Grafikon koji se nalazi na slici 3.20. prikazuje ovisnost BER-a o SNR-u uz širinu pojasa 40MHz, 20MHz i 10MHz. Na y-osi nalaze se vrijednosti BER-a dok se na x-osi nalazi SNR u vrijednostima od 0 do 25dB. Siva linija prikazuje BER za širinu pojasa od 40MHz, narančasta linija prikazuje za 20MHz i plava prikazuje za 10MHz širinu pojasa. Iz grafa daje se iščitati da SNR izravno utječe na BER. Na niskim vrijednostima SNR, učestalost pogreške je velika što govori da je signal u većoj mjeri oštećen šumom nego kada su vrijednosti SNR-a veće. Za veće vrijednosti SNR-a, BER je gotovo nula, što govori da je prijenos podataka kvalitetniji i precizniji, skoro bez greške. Što je veći omjer snage signala i snage šuma, signal postaje dominantniji u odnosu na šum i BER postaje manji. U ovom slučaju to je iznad 20dB SNR-a. Kada je taj omjer manji, signal je pun šuma i zbog toga je veći BER. Krivulje koje prikazuju utjecaj širine frekvencijskog pojasa na BER su identične, što govori da promjena širine pojasa nema značajan utjecaj na BER. Krivulje su najbližnije u višim SNR vrijednostima, što govori da, dok je SNR dovoljno visok, širina pojasa ne utječe na učestalost pogreške. Širina pojasa određuje količinu podataka koja se može prenijeti unutar određenog vremena. Širi spektar omogućuje veću brzinu prijenosa podataka, ali i ranjivost signala na šum, ali u ovom slučaju SNR prevladava u određivanju BER-a.



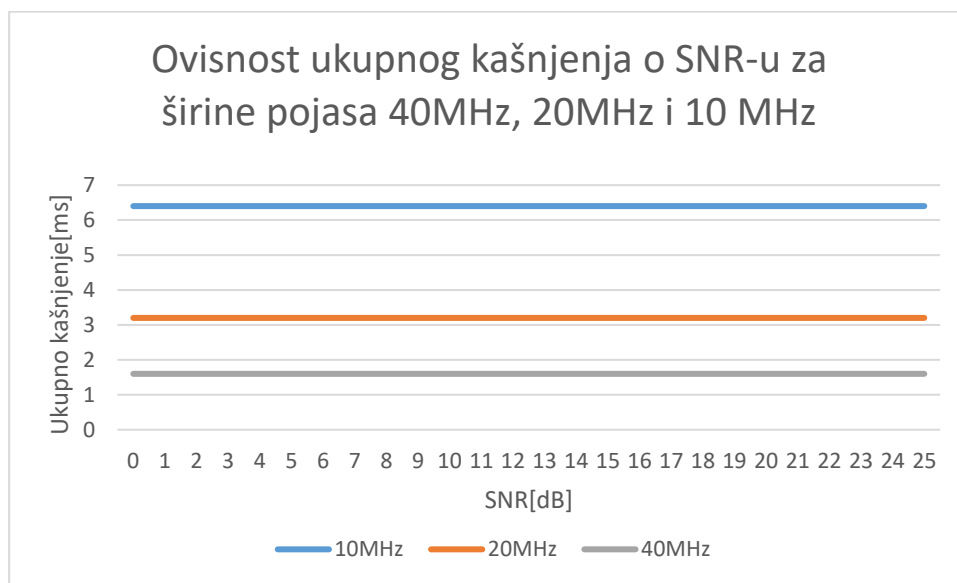
Sl. 3.20. Grafikon promjene BER-a na 40MHz, 20MHz i 10MHz širine pojasa

Graf koji se nalazi na slici 3.21. prikazuje ovisnost brzine prijenosa podataka o SNR-u na 40MHz, 20MHz i 10MHz širine pojasa. Na y-osi nalaze se vrijednosti brzina prijenosa podataka u Mbps dok se na x-osi nalazi SNR u vrijednostima od 0 do 25dB. Siva linija prikazuje brzinu prijenosa podataka za širinu pojasa od 40MHz, narančasta linija prikazuje za 20MHz i plava prikazuje za 10MHz širinu pojasa. Kako se SNR povećava, brzina prijenosa podataka raste za sve tri širine pojasa. Za niže vrijednosti SNR-a, brzina prijenosa je manja zbog većeg utjecaja šuma na signal i na taj način otežava prijenos. S porastom SNR, signal postaje dominantniji nad šumom, prijenos je sve kvalitetniji i precizniji i samim time se povećava brzina prijenosa podataka. U praksi, zbog dinamičkih promjena 4G mreže, s porastom SNR-a dolazi mogućnost povećanja reda modulacije. Na primjer, za niže vrijednosti SNR-a koristi se 8QAM modulacija koja može prenijeti samo 3 bita po stanju te je samim time i manja brzina prijenosa podataka dok za više vrijednosti SNR-a se koristi 64-QAM koja može prenijeti 6 bita po stanju i tako povećati brzinu prijenosa. Širina pojasa izravno utječe na brzinu prijenosa podataka. Kod širine pojasa od 10MHz brzina je najmanja i maksimalno iznosi 60Mbps. Kod širine od 20MHz maksimalna brzina iznosi 120Mbps. Najveća brzina prijenosa je kod širine pojasa od 40MHz i iznosi 240Mbps. Veća širina frekvencijskog pojasa omogućava veće brzine prijenosa podataka jer povećavam broj dostupnih kanala za prijenos unutar tog pojasa. Međutim, iz grafa daje se iščitati da za maksimalnu brzinu prijenosa nije dovoljna velika širina pojasa već da značajnu ulogu ima i omjer snage signala i snage šuma. Za maksimalnu brzinu potreban je veći SNR.



Sl. 3.21. Grafikon promjene brzine prijenosa podataka na 40MHz, 20MHz i 10MHz širine pojasa

Grafikon koji se nalazi na slici 3.22. prikazuje ovisnost ukupnog kašnjenja o SNR-u na 40MHz, 20MHz i 10MHz širine pojasa. Na y-osi nalaze se vrijednosti ukupnog kašnjenja u milisekundama dok se na x-osi nalazi SNR u vrijednostima od 0 do 25dB. Siva linija prikazuje ukupno kašnjenje za širinu pojasa od 40MHz, narančasta linija prikazuje za 20MHz i plava prikazuje za 10MHz širinu pojasa. Ukupno kašnjenje se često odnosi na vrijeme potrebno da se paket proslijedi kroz mrežu. Iz grafa da se primijetiti kako ukupno kašnjenje ne ovisi o vrijednosti SNR-a. Kašnjenje je konstantno kroz cijeli raspon SNR-a zato što je ono direktno povezano s širinom pojasa, a ne sa SNR-om. Širina pojasa određuje koliko podataka može biti preneseno u svakom trenutku, dok SNR određuje točnost prijena. Ukupno kašnjenje se smanjuje kako se povećava širina pojasa. Najveće kašnjenje je na širini pojasa od 10MHz i iznosi 6.4ms. Na širini pojasa od 20MHz kašnjenje je manje i iznosi 3.2ms dok je na 40MHz širine pojasa kašnjenje najmanje i iznosi 1.6ms. Povećanjem širine frekvencijskog pojasa povećava se kapacitet mreže i brzina prijena podataka, a samim time se smanjuje ukupno kašnjenje.

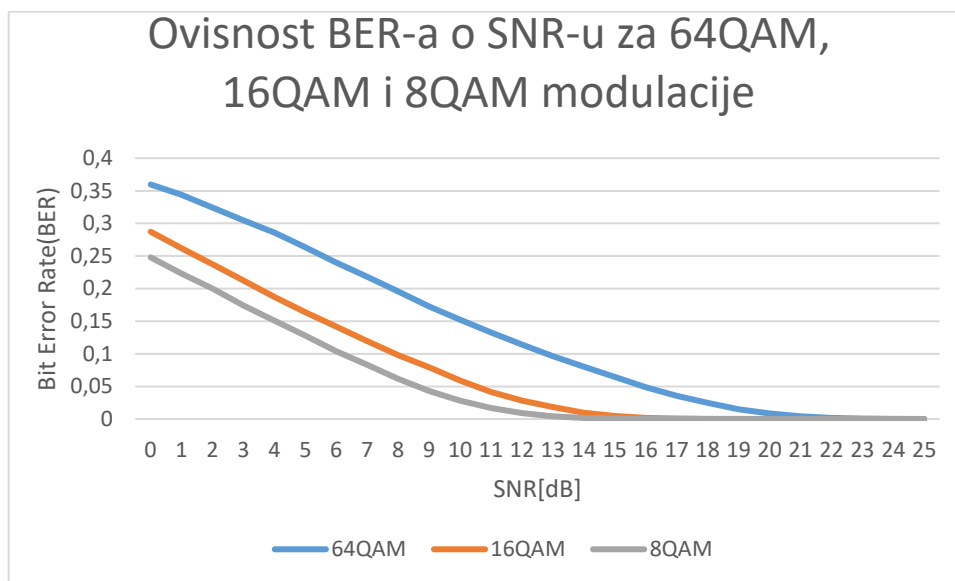


Sl. 3.22. Grafikon promjene ukupnog kašnjenja na 40MHz, 20MHz i 10MHz širine pojasa

### 3.3. Promjena reda modulacije

Unutar sljedećih simulacija nosiva frekvencija iznosi 2.4GHz, širina pojasa je 20MHz, broj podnosioca iznosi 64, broj OFDM simbola postavljen je na 1000 i raspon SNR vrijednosti je od 0 do 25 dB, u koracima od 1 dB. Mijenjao se red modulacije (engl. *modulation order*). Prva vrijednost je 64 zatim 16 i na kraju 8.

Graf koji se nalazi na slici 3.23. 3.23. 3.23. 3.23. 3.23. 3.23. 3.23. 3.23. prikazuje ovisnost BER-a o SNR-u za 64-QAM, 16-QAM i 8-QAM modulacije. Na y-osi nalaze se vrijednosti BER-a dok na x-osi se nalazi SNR u vrijednostima od 0 do 25dB. Siva linija prikazuje BER za 8-QAM modulaciju, narančasta linija prikazuje za 16-QAM i plava prikazuje za 64-QAM modulaciju. Iz grafa da se iščitati kako BER opada s povećanjem SNR-a za sve tri modulacije te za više vrijednosti SNR-a(iznad 15dB), BER je gotovo pa nula. 64-QAM modulacija prenosi 6 bita po stanju, samim time njezin konstalacijski dijagram je najgušći odnosno udaljenost između stanja je najmanja što dovodi do toga da su potrebne male promjene u signalu(smetnje i šum) kako bi došlo do pogreške. Zbog toga, pri nižem SNR-u, BER je najveći za 64-QAM modulaciju. Za pouzdaniji prijenos podataka potrebne su veće vrijednosti SNR-a. 16-QAM modulacija ima nešto niži BER od 64-QAM jer prenosi samo 4 bita po stanju te su udaljenosti između stanja u konstalacijskom dijagramu veće. Potrebna je veća promjena signala kako bi došlo do pogreške. 8-QAM ima najniži BER i najotpornija je na šum od sve tri modulacije. Prenosi 3 bita po stanju te su udaljenosti između stanja u konstalacijskom dijagramu najveće.

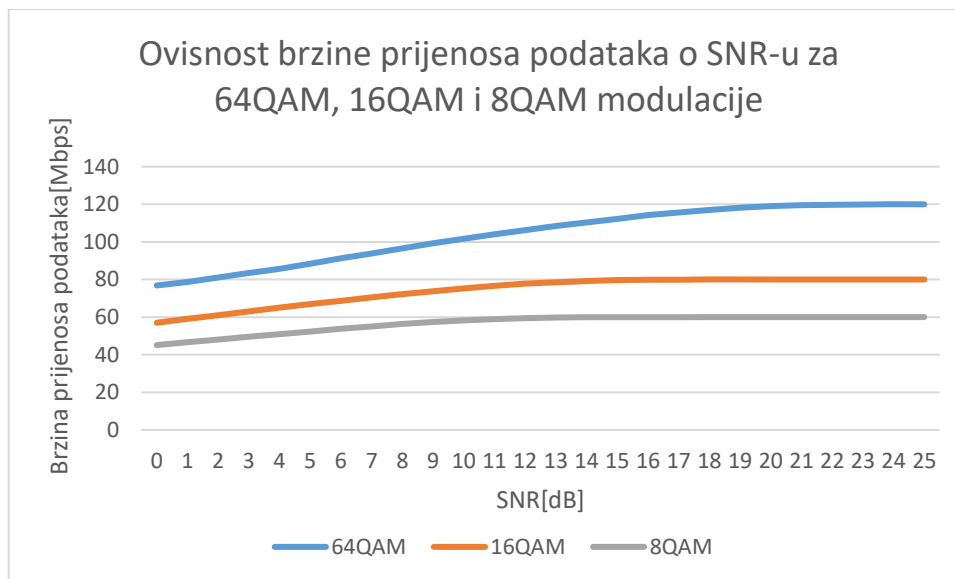


Sl. 3.23. Grafikon promjene BER-a za 64QAM, 16QAM i 8QAM modulacije

Grafikon koji se nalazi na slici 3.24. 3.24. 3.24. prikazuje ovisnost brzine prijenosa podataka o SNR-u za 64-QAM, 16-QAM i 8-QAM modulacije. Na y-osi nalaze se vrijednosti brzine prijenosa podataka dok se na x-osi nalazi SNR u vrijednostima od 0 do 25dB. Siva linija prikazuje brzinu prijenosa podataka za 8-QAM modulaciju, narančasta linija prikazuje za 16-QAM i plava prikazuje za 64-QAM modulaciju. Iz grafa dano je zaključiti kako se brzina prijenosa



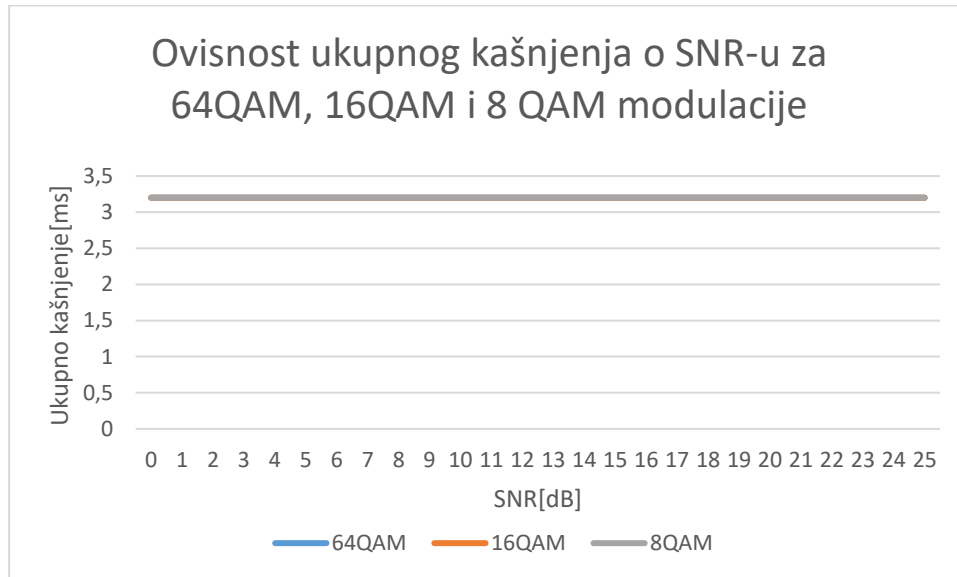
povećavam s porastom SNR-a za sve tri modulacije. Za niske vrijednosti SNR-a, brzina prijenosa podataka je nešto niža jer je signal loše kvalitete i ima dosta šuma. Najveću brzinu prijenosa podataka ima 64-QAM modulacija zbog toga što prenosi 6 bita po stanju. Brzina 64-QAM modulacije u ovoj simulaciji iznosi 120Mbps. Nešto nižu brzinu prijenosa podataka ima 16-QAM jer prenosi 4 bita po stanju i ona iznosi 80Mbps. Međutim, 16-QAM ne zahtijeva toliko visoke vrijednosti SNR-a za postizanje maksimalne brzine. 16-QAM postigne maksimalnu brzinu već na 15dB SNR-a. Najmanju brzinu prijenosa ima 8-QAM jer prenosi samo 3 bita po stanju. Brzina 8-QAM modulacije u ovoj simulaciji iznosi 60Mbps. Ova modulacija već na 12dB SNR-a postigne maksimalnu brzinu. U praksi, mreža se dinamički prilagođava uvjetima kanala. Ako je omjer snage signala i snage šuma visok, mreža će koristiti 64-QAM modulaciju i tako povećati brzinu prijenosa podataka. Međutim, ako je SNR nizak odnosno postoje veće količine šuma i smetnji u signalu, koristit će se manje složene modulacije poput 16-QAM ili 8-QAM i na taj način smanjila pogreška prijenosa.



Sl. 3.24. Grafikon promjene brzine prijenosa podataka za 64QAM, 16QAM i 8QAM modulacije

Graf koji se nalazi na slici 3.25. prikazuje ovisnost ukupnog kašnjenja o SNR-u za 64-QAM, 16-QAM i 8-QAM modulacije. Na y-osi nalaze se vrijednosti ukupnog kašnjenja dok se na x-osi nalazi SNR u vrijednostima od 0 do 25dB. Siva linija prikazuje ukupno kašnjenje za 8-QAM modulaciju, narančasta linija prikazuje za 16-QAM i plava prikazuje za 64-QAM modulaciju. Ukupno kašnjenje ostaje konstantno za bilo koju vrijednost SNR-a odnosno SNR ne utječe na kašnjenje. SNR je ključan za kvalitetu signala i brzinu prijenosa podataka, a ne za prosljeđivanje paketa kroz mrežu. Iz grafikona jasno se vidi da promjena reda modulacije ne utječe na ukupno

kašnjenje. Jedini razlog zbog kojeg red modulacije ne utječe na ukupno kašnjenje je da kašnjenje u 4G mrežama uglavnom ovise o udaljenosti, mrežnoj arhitekturi i zagušenosti mreže. Ukupno kašnjenje u ovoj simulaciji iznosi 3.2ms za sva tri red modulacije i za bilo koju vrijednost SNR-a. U praksi, kašnjenje se smanjuje tako što se unaprijedi mrežna infrastruktura ili se optimiziraju rute prijenosa.



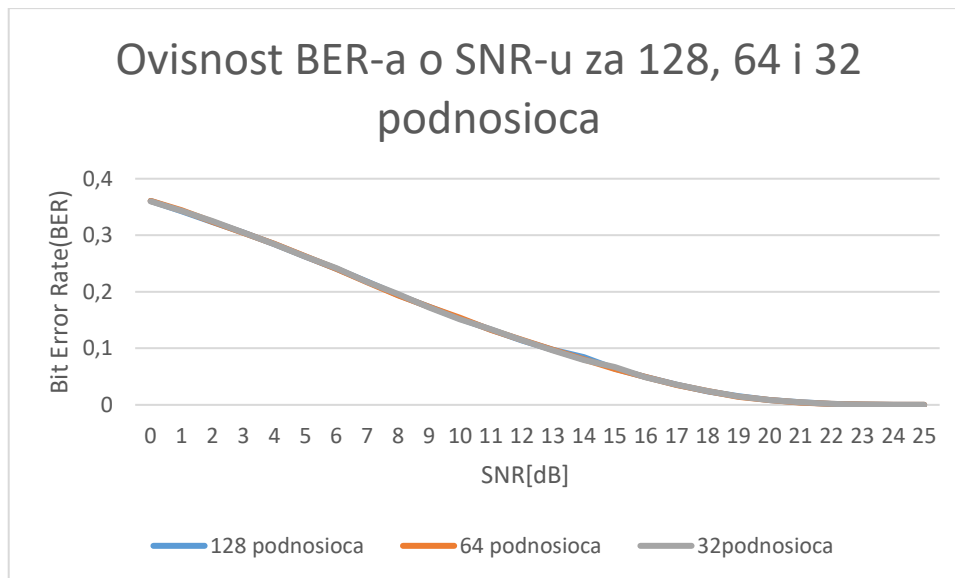
Sl. 3.25. Grafikon promjene ukupnog kašnjenja za 64QAM, 16QAM i 8QAM modulacije

### 3.4. Promjena broja podnosioca

Unutar sljedećih simulacija nosiva frekvencija iznosi 2.4GHz, širina pojasa je 20MHz, red modulacije je 64, broj OFDM simbola postavljen je na 1000 i raspon SNR vrijednosti je od 0 do 25 dB, u koracima od 1 dB. Mijenjao se broj podnosioca (engl. *numSubcarriers*). Početna vrijednost je 128 pa 64 i zadnja vrijednost iznosi 32.

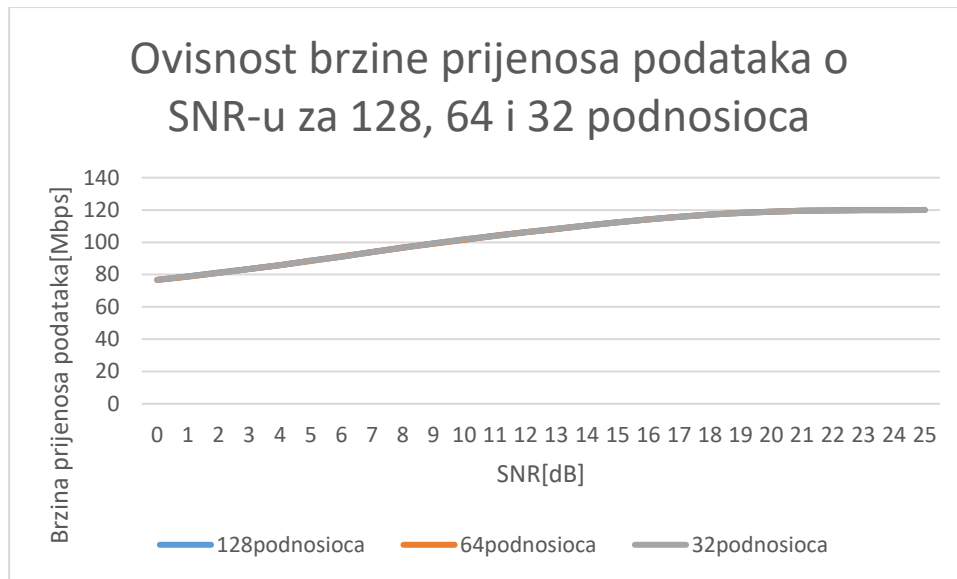
Grafikon koji se nalazi na slici 3.26. prikazuje ovisnost BER-a o SNR-u za 128, 64 i 32 podnosioca. Na y-osi nalaze se vrijednosti BER-a dok se na x-osi nalazi SNR u vrijednostima od 0 do 25dB. Siva linija prikazuje BER za 32 podnosioca, narančasta linija prikazuje za 64 i plava prikazuje za 128 podnosioca. Iz grafa se može iščitati kako BER opada kako se povećava SNR. Za niže vrijednosti SNR-a, BER je veći odnosno utjecaj šuma na signal je veći nego kad je SNR manji. Za vrijednosti iznad 20dB, BER je gotovo pa nula. Također, graf pokazuje kako se mijenja broj podnosioca, BER ostaje identičan i za 128 podnosioca i za 64 i za 32 odnosno broj podnosioca ne utječe na učestalost pogreške. Svi podnosioci koriste podatke unutar istog frekvencijskog

spektra i iste tehnike modulacije te je to razlog zašto broj podnosioca ne utječe na BER. Broj podnosioca nema značajnu ulogu u promjeni BER-a.



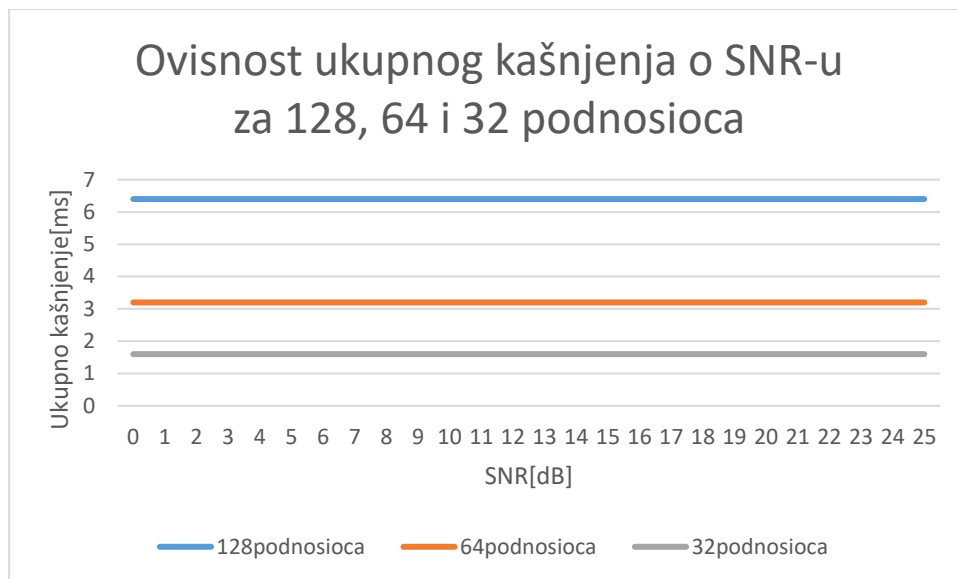
Sl. 3.26. Grafikon promjene BER-a za 128, 64 i 32 podnosioca

Graf koji se nalazi na slici 3.27. prikazuje ovisnost brzine prijenosa podataka o SNR-u za 128, 64 i 32 podnosioca. Na y-osi nalaze se vrijednosti brzine prijenosa podataka dok se na x-osi nalazi SNR u vrijednostima od 0 do 25dB. Siva linija prikazuje brzinu prijenosa podataka za 32 podnosioca, narančasta linija prikazuje za 64 i plava prikazuje za 128 podnosioca. Iz grafa lako je iščitati da brzina prijenosa podataka ne ovisi o broju podnosioca. Sve tri krivulje su identične. To se događa zbog toga što je širina pojasa ograničena, a svi podnosioci dijele istu propusnost. Brzina prijenosa podataka je povećava kako se povećava i SNR. Za niže vrijednosti SNR-a, brzina je manja zbog većeg utjecaja šuma na signal. Maksimalna vrijednost brzine prijenosa postiže se na 20dB SNR-a i iznosi 120Mbps.



Sl. 3.27. Grafikon promjene brzine prijenosa podataka za 128, 64 i 32 podnosioca

Grafikon koji se nalazi na slici 3.28. prikazuje ovisnost ukupnog kašnjenja o SNR-u za 128, 64 i 32 podnosioca. Na y-osi nalaze se vrijednosti ukupnog kašnjenja dok se na x-osi nalazi SNR u vrijednostima od 0 do 25dB. Siva linija prikazuje ukupno kašnjenje za 32 podnosioca, narančasta linija prikazuje za 64 i plava prikazuje za 128 podnosioca. Ukupno kašnjenje ne ovisi o vrijednostima SNR-a odnosno jednako je od 0 do 25dB SNR-a. Najveća razlika je kada se mijenja broj podnosioca. Što je veći broj podnosioca, veće je ukupno kašnjenje. Ukupno kašnjenje za mrežu s 128 podnosioca iznosi 6.4ms. To je razumljivo zbog toga je veći broj podnosioca osigurava prijenos podataka kroz više paralelnih kanala unutar OFDM sustav, ali zahtijeva dužu obradu i samim time povećava ukupno kašnjenje. Za mrežu sa 64 podnosioca, ukupno kašnjenje je 3.2ms dok sa 32 podnosioca iznosi 1.6ms. Što je manji broj podnosioca, manje je ukupno kašnjenje. Manji broj podnosioca osigurava manje opterećenje na infrastrukturu 4G mreža i bržu obradu podataka i na taj način smanjuje kašnjenje.



Sl. 3.28. Grafikon promjene ukupnog kašnjenja za 128, 64 i 32 podnosioca

## 4. ZAKLJUČAK

Za simulaciju 4G mrežnog okruženja koristili su se osnovni LTE parametri i funkcije za implementaciju te iste simulacije. Cilj simulacije 4G mreže bio je generirati, modulirati, prenositi, demodulirati i dekodirati podatke kroz 4G mrežu i na taj način doći do određenih parametara kao što su učestalost pogreške (engl. *Bit Error Rate*-BER) brzina prijenosa podataka (engl. *Data Transfer Rate*) i ukupno kašnjenje (engl. *Total Delay*).

Općenito za sve simulacije vrijedi:

- što je veći SNR, to je manji BER,
- što je veći SNR, to je brzina prijenosa podataka veća,
- ukupno kašnjenje ne ovisi o vrijednosti SNR-a

Nakon simulacija u kojima su se dogodile promjene širine pojasa daje se zaključiti:

- za niske razine SNR-a, BER je identičan na svim razinama širine pojasa,
- za visoke razine SNR-a, BER je najmanji na 20MHz,
- povećanjem širine pojasa, povećava se brzina prijenosa podataka, a najveća brzina prijenosa podataka je na 40MHz,
- povećanjem širine pojasa, smanjuje se ukupno kašnjenje simulacije, najmanje kašnjenje je na 40MHz

Nakon simulacija u kojima su se dogodile promjene reda modulacije daje se zaključiti:

- što je veći red modulacije, brzina prijenosa podataka je veća, a najveća brzina prijenosa je na 64-QAM modulaciji,
- što je red modulacije manji, BER je također manji, najmanji BER je na 8-QAM modulaciji,
- red modulacije ne utječe na ukupno kašnjenje simulacije te je ostalo isto tijekom sve tri simulacije

Nakon simulacija u kojima su se dogodile promjene broja podnosioca daje se zaključiti:

- broj podnosioca ne utječe na brzinu prijenosa podataka te je ona ista u sve tri simulacije,
- za niske razine SNR-a, BER je identičan za sve tri simulacije,

- za visoke razine SNR-a, najmanji BER je kod simulacije s 32 podnosioca,
- povećanjem broja podnosioca, povećava se ukupno kašnjenje simulacije i obratno

Ovim simulacijama prikazano je da 4G sustav može osigurati veliku brzinu prijenosa podataka uz malenu razinu pogrešaka i kašnjenja. Na taj način 4G je prikladan za moderne komunikacije. MATLAB je snažan alat za simulacije kao i za analizu bežičnih sustava. Kroz ovakav alat moguće je istraživati i kroz podešavanja različitih parametara doći do bolji performansi.

## LITERATURA

- [1] U. o. York, »What are mobile networks?,« University of York, [Mrežno]. Available: <https://online.york.ac.uk/what-are-mobile-networks/>. [Pokušaj pristupa 16 9 2024].
- [2] FOCC, »Razlika između 1G, 2G, 3G vs. 4G i 5G,« FOCC, 23 2 2019. [Mrežno]. Available: <https://hr.opticalpatchcable.com/news/difference-between-1g-2g-3g-vs-4g-and-5g-21537444.html>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].
- [3] A.B.R., »1G Mobile Networks,« Medium, 31 3 2021. [Mrežno]. Available: <https://anji96.medium.com/1g-mobile-networks-1b415978108c>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].
- [4] R.M., »Unraveling the Wonders of 2G in IoT Connectivity,« Simbase, 10 5 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.simbase.com/iot-glossary-dictionary/2g>. [Pokušaj pristupa 10 6 2024].
- [5] PUSR, »3G,« PUSR, 8 12 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.pusr.com/blog/3G.html?sw-lang=Enns>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].
- [6] S.J., »Difference between WiMax and LTE,« Geeks For Greeks, 8 7 2022. [Mrežno]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-wimax-and-lte/>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].
- [7] Thales, »4G LTE explained (Long Term Evolution) - Updated,« Thales, 28 12 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/technology/lte>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].
- [8] Arxiv, »Carrier Aggregation Enabled MIMO-OFDM Integrated Sensing and Communication,« Arxiv, 17 5 2024. [Mrežno]. Available: <https://arxiv.org/html/2405.10606v1>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].
- [9] M.D., »Defition of Resource Block in LTE and 5G,« LinkedIn, 1 4 2024. [Mrežno]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/definition-resource-block-lte-5g-malaka-dahanayake-e6loc>. [Pokušaj pristupa 16 9 2024].
- [10] S.A., »What is resource block in LTE?,« Huawei, 10 2 2023. [Mrežno]. Available: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/What-is-resource-block-in-LTE/thread/667281696346750976-667213872962088960>. [Pokušaj pristupa 16 9 2024].
- [11] A. S. S. L.N.D., »Resource Allocation in 4G and 5G Networks:A Review,« ResearchGate, 1 12 2021. [Mrežno]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/357586857\\_Resource\\_Allocation\\_in\\_4G\\_and\\_5G\\_Networks\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/357586857_Resource_Allocation_in_4G_and_5G_Networks_A_Review). [Pokušaj pristupa 16 9 2024].
- [12] T.C.T., »Adaptive Modulation and Coding for LTE Wireless Communication,« ResearchGate, 1 4 2015. [Mrežno]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/274573467\\_Adaptive\\_Modulation\\_and\\_Coding\\_for\\_LTE\\_Wireless\\_Communication](https://www.researchgate.net/publication/274573467_Adaptive_Modulation_and_Coding_for_LTE_Wireless_Communication). [Pokušaj pristupa 16 9 2024].
- [13] Wikipedija, »5G,« Wikipedija, 29 8 2023. [Mrežno]. Available: <https://hr.wikipedia.org/wiki/5G>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].
- [14] 5. Observatory, »What is 5G?,« 5G Observatory, [Mrežno]. Available: <https://5gobservatory.eu/about/what-is-5g/>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].



- [15] I. M.F., »What is 5G?,« IBM, 20 2 2024. [Mrežno]. Available: <https://www.ibm.com/topics/5g>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].
- [16] MathWorks, »Math. Graphics. Programming,« MathWorks, [Mrežno]. Available: <https://ch.mathworks.com/products/matlab.html>. [Pokušaj pristupa 10 9 2024].

## SAŽETAK

Naslov: Simulacije 4G mrežnog okruženja u MATLAB-u

Sažetak: Ovaj rad se bavi simulacijom 4G mrežnog okruženja u programu MATLAB. Ukupno je napravljeno devet simulaciju u kojima su se dogodile promjene širine pojasa, promjene reda modulacije i promjene broja podnosioca. Širina pojasa je mijenjana s 40MHz na 20MHz i na kraju na 10MHz. Prvi red modulacije bio je 64 zatim 16 i za kraj 8. Broj podnosioca je mijenjan s 128 na 64 i na kraju na 32 podnosioca. Cilj rada je bio prikazati parametre 4G mrežnog okruženja u različitim uvjetima. Izmjereni parametri 4G simulacije su učestalost pogreške(engl. *Bit Error Rate-BER*), brzina prijenosa podataka(engl. *Date transfer rate*) u Mbps i ukupno kašnjenje(engl. *Total delay*) u milisekundama. Rezultati simulacije prikazani su numerički i grafički. Također, unutar rada opisane su bežične mreže i sve njene generacije od 1G do 5G s naglaskom na 4G. Opisan je i alat u kojem se izvršava simulacija, a to je MATLAB.

Ključne riječi: Bit Error Rate, brzina prijenosa podataka, MATLAB, simulacija, 4G

## **ABSTRACT**

Title: 4G network environment simulation in MATLAB

Abstract: This paper deals with the simulation of a 4G network environment in the MATLAB program. In total, nine simulations were made in which bandwidth changes, modulation order changes and the number of subcarriers were changed. The bandwidth was changed from 40MHz to 20MHz and finally to 10MHz. The first line of modulation was 64, then 16 and finally 8. The number of subcarriers was changed from 128 to 64 and finally to 32 subcarriers. The aim of the work was to show the parameters of the 4G network environment in different conditions. The measured parameters of the 4G simulation are BER (Bit Error Rate), data transfer rate in Mbps and total delay in milliseconds. The simulation results are presented numerically and graphically. Also, the paper describes wireless networks and all their generations from 1G to 5G with an emphasis on 4G. The tool in which the simulation is executed, MATLAB, is also described.

Key words: Bit Error Rate, data transfer rate, MATLAB, simulation, 4G