

# Računalna simulacija širokopoasnog pristupa mreži.

---

Martić, Tomislav

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:200:711146>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-25**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I**

**INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Preddiplomski stručni studij Elektrotehnike, smjer Informatika**

**RAČUNALNA SIMULACIJA ŠIROKOPOJASNOG  
PRISTUPA MREŽI**

**Završni rad**

**Tomislav Martić**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1S: Obrazac za ocjenu završnog rada na stručnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na stručnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Tomislav Martić
<b>Studij, smjer:</b>	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Informatika
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	AI4244, 28.09.2012.
<b>JMBAG:</b>	0079052041
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Vanja Mandrić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	prof. dr. sc. Krešimir Grgić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	prof. dr. sc. Vanja Mandrić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	prof. dr. sc. Slavko Rupčić
<b>Naslov završnog rada:</b>	Računalna simulacija širokopojasnog pristupa mreži.
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Telekomunikacije i informatika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	Teorijski obraditi širokopojasni pristup mreži s naglaskom na TDM, FDM, CDMA. Povijest, te primjena danas - povezati s 5G. U jednom od programa (primjerice Matlab), simulirati svaki od navedenih pristupa mreži.
<b>Datum ocjene pismenog dijela završnog rada od strane mentora:</b>	30.09.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela završnog rada od strane mentora:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Datum obrane završnog rada:</b>	11.10.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela završnog rada (obrane):</b>	Dobar (3)
<b>Ukupna ocjena završnog rada:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio stručni prijediplomski studij:</b>	11.10.2024.

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

Osijek, 11.10.2024.

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Tomislav Martić
<b>Studij:</b>	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer Informatika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	AI4244, 28.09.2012.
<b>Turnitin podudaranje [%]:</b>	6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Računalna simulacija širokopojasnog pristupa mreži.**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Vanja Mandrić

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

1. UVOD .....	1
2. ŠIROKOPOJASNI PRISTUP MREŽI .....	2
2.1 Povijest širokopojasnog pristupa mreži .....	4
2.2 Primjena u 5G .....	5
2.3 TDM .....	8
2.4 FDM.....	11
2.5 CDM .....	14
3. PRIMJENA TEHNIKA U PRAKTIČNOM DIJELU .....	18
3.1 TDMA .....	18
3.2 FDMA.....	26
3.3 CDMA .....	33
4. ZAKLJUČAK .....	42
LITERATURA.....	43
SAŽETAK.....	45
ABSTRACT .....	46
ŽIVOTOPIS .....	47

# 1. UVOD

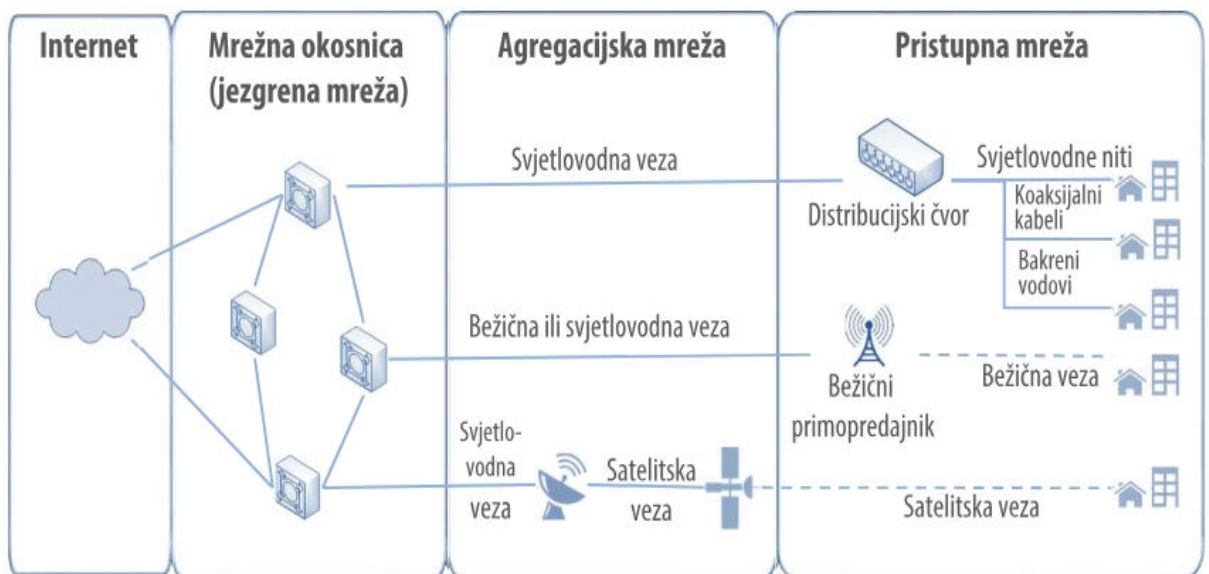
Odabrana tema završnog rada je „Računalna simulacija širokopojasnog pristupa mreži“. Prvo poglavlje završnog rada predstavlja uvod u kojem se upoznaje čitatelja s temom završnog rada. Drugo poglavlje se veže za teorijski dio širokopojasnog pristupa mreži u kojoj su obuhvaćena poglavlja koja se vežu za povijest širokopojasnog pristupa mreži, primjenu u 5G, TDM, FDM i CDM. Nakon toga slijedi praktični dio u Matlab programu gdje se simulira svaki od navedenih pristupa mreži.

Prilikom procesa prijenosa informacija i podataka u telekomunikacijskoj mreži bitno je prvo odrediti postupak dodjele komunikacijskog kanala uz kvalitetan sustav potpunog eliminiranja ili barem značajnog smanjenja smetnji u komunikacijskom kanalu koji nastaju posljedicom istovremenih prijenosa. Takva vrsta komunikacije naziva se višestruki pristup, a može se ostvariti različitim metodama i tehnikama.

Zadatak rada jeste teorijski obraditi širokopojasni pristup mreži s naglaskom na TDM, FDM i CDM. Povijest, te primjena danas – povezati sa 5G tehnologijom. U Matlab programu simulirati svaki od navedenih pristupa mreži.

## 2. ŠIROKOPOJASNI PRISTUP MREŽI

Sam pojam širokopojasnog pristupa se može povezati za veće brzine interneta i ostale tehničke značajke pomoću kojih su omogućeni novi sadržaji, aplikacije i usluge. Danas je uloga interneta u svijetu enormne količine, a upravo je brzina i visoka dostupnost interneta ono što omogućuje širokopojasni pristup mreži. Širokopojasna pristupna mrežna se uobičajeno sastoji od tri dijela: mrežna okosnica (jezgrena mreža), agregacijska mreža te pristupna mreža koje su prikazane slikom 2.1 [1].



Slika 2.1: Struktura širokopojasne mreže [1]

Sa slike 2.1 je vidljivo da postoje dvije vrste širokopojasne infrastrukture koje se danas upotrebljavaju: žična i bežična. Pod žičnom mrežom pripadaju infrastrukture koje koriste svjetlovodne niti, koaksijalne kabele i bakrene telefonske vodove, a pod bežičnu mrežu pripadaju infrastrukture koje upotrebljavaju zemaljsku bežičnu opremu i satelite. Najveću brzinu preuzimanja podataka i brzinu učitavanja podataka imaju svjetlovodne niti, a zatim slijede koaksijalni kabele, bakreni telefonski vodovi, zemaljska bežična oprema i sateliti.

U kontekstu cjelokupnog interneta, pojam širokopojasni nema preveliko tehničko značenje. Taj se pojam upotrebljava kako bi se opisala bilo koja infrastruktura koja ima pristup internetu velike brzine. Također je važno da je brži u odnosu na klasični tradicionalni pristup putem telefonske linije i da je konstantno dostupan. Od strane komisije definirane su tri kategorije brzine preuzimanja podataka [1]:

- osnovni pristup (brzine između 144 kbps i 30 Mbps)
- brzi pristup (brzine između 30 Mbps i 100 Mbps)
- ultra brzi pristup (brzine veće od 100 Mbps)

Širokopojasni pristup mreži predstavlja način gdje se korisnička računala povezuju s internetom uz puno veću brzinu prijenosa podataka nego što ju je moguće ostvariti pomoću klasičnog modemskog pristupa telefonskom linijom. Brzina interneta putem telefonske linije iznosi do 56 kbit/s [2].

Iz prethodno navedenih definicija može se zaključiti kako se pojam širokopojasnog pristupa mreže usko veže za povezivanje na internet s izuzetno velikim brzinama prijenosa podataka, kao i konstantnoj dostupnosti. Osim navedenog, širokopojasna tehnologija će omogućiti i prijenos puno većih količina podataka u odnosu na prethodne tehnologije. Razvijanje širokopojasnog pristupa mreži je od velike važnosti kako bi se buduće digitalne usluge i aplikacije mogle razvijati. S povećanjem i napretkom širokopojasnog pristupa mreži rad od kuće će biti više dostupan, tehnologije unutar zdravstva će biti bolje i naprednije, obrazovanje u svim obrazovnim institucijama će se podignuti na višu razinu, zabava će doživjeti neke svoje nove oblike, a također će doći i do razvijanja pametnih gradova. Za današnji suvremeni moderni svijet, sve ovo je od velike važnosti, a izrazito danas jer se čovjek danas svakodnevno služi prijenosom podataka.

U zadnjih nekoliko godina, širokopojasni pristup mreži je našao primjenu kod ljudi u obavljanju velikog broja poslova. Danas širokopojasni pristup mreži pripada među najaktivnija područja informacijske tehnologije. Razina inovativnosti svakodnevno napreduje, a svi napreci u zadnjih nekoliko godina imali su veliki utjecaj na poslovanje, dijeljenje informacija i zabavu. Danas je internet postao gotovo neizbježan medij i konstanta pojava te je jako mali broj ljudi koji se ne koriste internetom. Upravo to su razlozi zašto je došlo do ovako značajnog napretka tehnologije [3].



Temeljna ideja širokopojasnog pristupa mreži osnovana je na bežičnom povezivanju u konceptu izvedbe točka-više točaka. Taj pojam označava da je riječ o sektorskim antenama, a one pokrivaju određeno područje u kojeg je moguće pronaći pristupne terminale s pripadajućim orijentiranim antenama. Čvorište može sadržavati jednu ili nekoliko antena koje će pokrivati sektor pod određenim kutom. Najvažnije karakteristike sustava su vrsta modulacije, frekvencija, domet sustava, kapacitet i širina sektora [4].

## **2.1 Povijest širokopojasnog pristupa mreži**

Prvom inačicom interneta koja je bila dostupna za komercijalnu upotrebu smatra se Dial-up Internet koji zahtjeva telefonsku liniju za rad na način da nije moguće obavljanje telefonskih poziva dok se koristi Internet. U počecima je brzina predstavljala najveći problem jer su se do kraja 20. stoljeća korisnici nadali brzini od 56 kBps. Preuzimanje datoteka bilo je izuzetno dugačak proces, a prijenos glazbe ili videa je bio nemoguć proces [5].

Sljedeći razvoj se veže za uvođenje širokopojasnog i bežičnog interneta. Početkom 21. stoljeća došlo je do zamjenjivanja Dial-upova sa širokopojasnom vezom, a polovica internetskih korisnika imala je širokopojasnu vezu do 2007. godine. Pomoću širokopojasnog pristupa omogućen je prijenos izuzetno velikih količina podataka puno većim brzinama korištenja ADSL-a. Najveća razlika širokopojasnog pristupa u odnosu na Dial-up je što je uvijek povezan s internetom te ga nije potrebno „uključiti“ kako bi radio. Krajem 20. stoljeća došlo je do prve komercijalne uporabe bežičnog interneta. Prije su se upotrebljavali Ethernet kabele koji su morali biti fizički priključeni na računalo za rad, a ovi uređaji su ubrzo zamijenili Ethernet kabele. Velik broj kafića, kompanija, trgovina i slično je uveo pristupne točke bežičnog interneta iz razloga što nude javni pristup internetu koji je u većini slučajeva besplatan i rade uz pomoć bežične lokalne mreže (WLAN) koja je povezana s usmjerivačem [5].

Do 2008. godine došlo je do velike potražnje za internetskim podacima jer su internetske video igrice postale popularne, YouTube se počeo razvijati, a i došlo je do osnivanja raznih društvenih medija. Sve to je označilo da je pravo vrijeme za dolazak optičkog širokopojasnog pristupa. Optički kabele su korisnicima omogućili puno brži pristup internetskim stranicama jer su se počeli upotrebljavati svjetlosni impulsi za prijenos podataka. No, tada optički kabele nisu imali razne mogućnosti kao što imaju danas [6].

Bez obzira što tada optički kabeli nisu pružali ni približno što mogu danas, svejedno su ljudi tada bili impresionirani tim brzinama. Jasno je da se početkom 21. stoljeća proizvode prvi pametni mobilni uređaji, a samim time i 3G koji je omogućio mogućnost povezivanje interneta s bilo kojeg mjesta gdje je prisutna kvalitetna internetska veza. Od samih početaka, danas je širokopojasni pristup dosegnuo jednu potpuno novu razinu u vidu FTTC-a jer su brzine prijenosa veće nego ikad. Upravo to je omogućilo napredak treće generacije, samim time i razvoj četvrte i pete generacije, odnosno 4G i 5G, a sve to za posljedicu ima pojednostavljen način života za korisnike.

## **2.2 Primjena u 5G**

Prije samog prelaska primjene 5G na širokopojasnoj pristupnoj mreži potrebno je definirati pojam 5G mreže. Ljudi uglavnom pojam 5G povezuju s bržim prijenosom podataka na internetu. No, sami pojam 5G mreže nosi više od toga. 5G mreža je nasljednik 4G i 3G, a služi za povezivanje između nekoliko uređaja kako bi se omogućila maksimalna prenosivost. Osim što je brzina prijenosa podataka narasla, također je došlo do napretka tehnologije i infrastrukture.

Pomoću 5G tehnologije, odnosno mreže pete generacije se predstavlja generacija standarda bežičnih telekomunikacija. Cilj ove tehnologije je povećanje kapaciteta u odnosu na 4G tehnologiju. Ova tehnologija bi trebala korisnicima osigurati veću gustoću širokopojasnog pristupa mreži te podržavati pouzdaniju komunikaciju između uređaja i podržavati komunikaciju između dva ili više uređaja. 5G tehnologija ima tri elementa [1]:

- pokretni poboljšani širokopojasni pristup
- usluge od kritične važnosti
- enormni internet stvari

Kako bi 5G tehnologija doživjela svoj vrhunac potrebno je da se temelji na infrastrukturi svjetlovodnih niti iz razloga što će 5G mreža onda nadopuniti širokopojasnu mrežu velikih brzina.

Kao što je prethodno navedeno, najvažnija karakteristika 5G tehnologije je veća brzina u odnosu na svoje prethodnike. Prednost 5G tehnologije je mogućnost povezivanja većeg broja uređaja koje mogu slati korisniku informacije te obavljati procese vezane za komuniciranje. Primjena 5G tehnologije se očitava u nekoliko različitih poslova kao što su rad od kuće, udaljeni nadzor pacijenata, upravljanje strojevima na daljinu, dijagnostika i slično. Pametni gradovi imati će u skorijoj budućnosti mogućnost prilagođavanja prometne signalizacije s obzirom na trenutno stanje prometa. Energija će se moći raspodijeliti na efikasniji i pametniji način, doći će do reguliranja odvoza otpada i slično. Osim navedenoga, u budućnosti se pomoću 5G tehnologije očekuju novi poslovni modeli i aplikacije, napredna rješenja u poljoprivredi i industriji, automatizirana vozila te napredak u granama kao što su energetika, zdravstvo, financijske usluge i javna sigurnost. Automatizirana vozila će imati mogućnost povezivanja preko 5G mreže kako bi s ostalim vozilima mogli dijeliti podatke vezane za promet i nesreće u gradovima. Već danas se 5G tehnologija upotrebljava kod automobila koji koriste samostalno upravljanje. Primjena 5G tehnologije u širokopojasnom pristupu mreže je izuzetno velika, a ima još mjesta za napredak [7].

Kako je prethodno navedeno, 5G tehnologija se u velikoj mjeri primjenjuje unutar širokopojasnog pristupa mreži. Slučajevi gdje se 5G tehnologija u širokopojasnom pristupu mreži može upotrebljavati su sljedeći [8]:

- a) širokopojasni pristup u područjima gdje su velike grupe – događaji s velikim brojem ljudi poput sportskih natjecanja i koncerata, stambene ili komercijalne zgrade i centri gradova. Na mjestima kao što su ova može doći do zagušenosti mreže iz razloga što jako velik broj ljudi u isto vrijeme na vrlo malom geografskom području pristupa internetu, odnosno mreži.
- b) slabo naseljena ili nenaseljena područja. Slaba pokrivenost na ovakvim područjima je zbog malog broja konstantnih korisnika. Pomoću 5G tehnologije želi se svim korisnicima pružiti jednaka mogućnost za uporabu 5G mreže bez obzira na lokaciju s koje pristupaju. Prema današnjim standardima širokopojasnog pristupa mreži želi se postići brzina prijenosa podataka između korisnika od minimalno 50 Mbit/s.
- c) napredni scenariji mobilnosti korisnika – podrazumijeva uporabu mobilnih usluga u prijevoznim sredstvima velikih brzina kao što su složene mobilne usluge za vrijeme vožnje automobilom ili brzim vlakom. Kvaliteta usluge i brzina kretanja su obrnuto

proporcionalni, odnosno sa porastom brzine kretanja kvaliteta usluge kod korisnika postaje sve slabija.

- d) sigurna i neometana komunikacija službenicima javne sigurnosti ukoliko dođe do elementarnih nepogoda ili tomu sličnih hitnih situacija. Do sada se ovaj oblik komunikacije izvodio samo u privatnim mrežama, a to označava ogromna ulaganja u infrastrukturu. Pomoću 5G mreže se omogućava robusna i prioritarna komunikacija po potrebama ovisno o situaciji.
- e) Internet stvari – predstavlja samostalnu komunikaciju i povezivanje velikog broja različitih uređaja sve od senzora preko uređaja koji se koriste za pametne gradove pa sve do dronova. Ovi uređaji zahtijevaju različitu vrstu usluge. Ponašanje mreže je potrebno prilagoditi prema vrsti oblika komunikacije.
- f) komunikacija namijenjena bežičnom upravljanju bilo da se radi o stvarnim ili virtualnim objektima. Očekivana latencija za pružanje ove usluge će biti ispod mili sekunde.

S obzirom na prethodno korištenu tehnologiju četvrte generacije, takozvanu 4G mrežu, poboljšani širokopojasni pristup mreži je očekivano unaprjeđenje u odnosu na prethodno korišteno. 5G tehnologija se u širokopojasnom pristupu mreži u najvećoj mjeri upotrebljava za komunikaciju između ljudi, to jest kako bi se mogli pristupiti višemedijskom sadržaju, podacima i uslugama. Poboljšani širokopojasni pristup u sebi sadrži izuzetno visoke kvalitete prijenosa sadržaja i virtualnu stvarnost. Kako se takve usluge razvijaju, tako će nastajati potreba za većim brzinama prijenosa. Osim navedenoga, s korisničke će se strane zahtijevati računalni resursi u oblaku kako bi se obavljale složene obrade podataka [8].

Može se zaključiti kako bi se ostvarili takvi rezultati širokopojasnog pristupa mreže potrebno je naglasak staviti na područje pokrivenosti, povećanje kapaciteta mreže, mobilnost i propusnost. Vidljivo je da se pomoću širokopojasnog pristupa mreži želi svim korisnicima pružiti dovoljno kvalitetna usluga na svakom mjestu u svakom trenutku. No, također je potrebno znati da ukoliko dođe do poboljšanja jedne od navedenih značajki dolazi do pada druge značajke. Naprimjer, ukoliko se povećava područje pokrivenosti mreže dolazi do smanjenja brzine prijenosa podataka. Upravo to je razlog kako bi se odabrala prava tehnologija i arhitektura s ciljem najbolje ostvarenih rezultata u realnim situacijama.

U 5G mreži unutar širokopojasnog pristupa mreži moguće je ostvariti unaprjeđenje usluge na dva načina [8]:

1. uporaba novih frekvencijskih pojaseva – s dodatnim frekvencijskim pojasevima dolazi do povećanja resursa koji se upotrebljavaju za komunikaciju što za posljedicu ima bolje rezultate. Najzanimljivije frekvencijsko područje je područje milimetarskih valova jer je moguće ostvariti izuzetno velike brzine prijenose podataka. No, nedostatak je osjetljivost na vremenske uvjete i mali doseg.
2. razvijenim više antenskim sustavima nude mogućnost masivnog povećanja broja odašiljačkih antena i oblikovanje dijagrama zračenja (pad dometa komunikacije pri većim frekvencijama zbog viših frekvencija koje za posljedicu imaju veće gušenje signala)

### **2.3 TDM**

TDM, odnosno višestruki pristup vremenskoj podjeli predstavlja kanal koji je podijeljen u različite vremenske odsjeke s ograničenim prostorom. Različitim korisnicima koji su povezani na mrežu se dodjeljuju vremenski odsjeci, odnosno termini. Osnova ova tehnike je multipleksiranje s vremenskom podjelom. Naprimjer, ako prvom prijammniku pripada mjesto broj 1, a drugom prijammniku pripada mjesto broj 2, isto će se nastaviti s uzastopnim prijammnicima do posljednjeg odašiljača. Nakon toga, dodjela mjesta kreće iz početka na način da se ponavlja sve dok ne dođe do završetka veze te to mjesto postane slobodno ili se taj broj dodijeli nekom drugom uređaju ili prijammniku [9].

Za multiplekser se može reći da predstavlja krug koji kombinira signale na izvornom kraju komunikacijske veze. Zadatak multipleksera je da prihvaća ulaz od svakog individualnog krajnjeg korisnika, da svaki signal rastavi u segmente i da tako rastavljenim segmentima dodijeli kompozitni signal u ponavljajućem nizu. Unutar kompozitnog signala se nalaze podaci od nekoliko pošiljatelja. Na suprotnom kraju kabela velike udaljenosti, individualni signali se odvajaju uz pomoć sklopa koji se naziva demultiplekser. Takvi signali se usmjeravaju prema odgovarajućim korisnicima. Svaki dvosmjerni komunikacijski krug zahtijeva multiplekser/demultiplekser na svakom kraju kabela velike udaljenosti koji ima veliku propusnost [10].

Iz prethodno navedenog dolazi se do zaključka da TDM označava višestruki pristup vremenskih odsjeka te da ima jednog korisnika po „slotu“, odnosno odsječku. Za prijenos podataka upotrebljava se ne kontinuirani prijenos.

Ukoliko je potrebno poslati veći broj signala na velikoj udaljenosti, važno je da se projektiranje izvede pažljivo kako bi se osigurala ispravnost funkcioniranja sustava. Fleksibilnost je glavna prednost TDM metode. Zbog fleksibilnosti dopuštene su različite varijacije u broju signala koji se šalju duž linije. Također se konstantno prilagođavaju vremenski intervali kako bi se na najbolji mogući način upotrijebila dostupna propusnost. Uobičajeni primjer komunikacijske mreže je internet jer se količina prometa mijenja u velikoj mjeri svaki sat [10].

Osnovne značajke TDM su [11]:

- dijeljenje frekvencije jedne prijenosne mreže s nekoliko klijenata,
- dostava podataka je pojednostavljena iz razloga što je prijenos ne kontinuiran
- moguće je slanje frekvencijskih područja na određeni zahtjev unutar dinamičkom TDM-a,
- niska potrošnja,
- cjelokupni proces primopredaje nije složen,
- visoka brzina prijenosa,
- potrebni zaštitni „slotovi“, odnosno odsječci,
- napredno izjednačavanje može biti potrebno za visoke brzine prijenosa podataka ako je kanal „frekvencijski selektivan“ i stvara intermedijacijske smetnje,
- složenost dodjele frekvencije/mjesta.

Učinkovitost TDM se može prikazati sljedećom formulom [12]:

$$b_t = T_f \times R \quad (2-1)$$

Gdje:

- $b_t$  predstavlja ukupni broj bitova po okviru
- $T_f$  predstavlja trajanja jednog okvira
- $R$  predstavlja brzinu prijenosa kanala

Pomoću prethodno navedene formule može se izračunati učinkovitost TDM-a na način da se pomnoži trajanje jednog okvira s brzinom prijenosa kanala. Ukoliko se uzme da je brzina prijenosa kanala 64 kbps (64000 bitova po sekundi), a pomoću neke veze se prenosi 8000 okvira, na jednostavan se način može izračunati da je ukupan broj bitova po okviru 8 što predstavlja učinkovitost TDM. Ukoliko se želi izračunati brzina prijenosa kanala, ukupni broj bitova po okviru je potrebno podijeliti s trajanjem jednog okvira. Naprimjer, ukoliko je ukupan broj bitova po okviru 8, a brzina prijenosa kanala se poveća za duplo te iznosi 128 kbps, broj bitova po okviru će iznositi 16000.

Svakom korisniku je dopušteno slanje informacija samo unutar određenih vremenskih razdoblja. Različiti korisnici prenose informacije u različitim vremenskim odsječcima. Za vrijeme kada korisnici odašilju zauzimaju cjelokupni frekvencijski pojas (razdvajanje između korisnika se obavlja unutar vremenske domene). TDM zahtijeva kontrolni čvor koji je centraliziran, a koji za osnovnu funkciju ima prijenos periodičkog referentnog niza pomoću kojeg su definirani okviri. Također osim navedenoga, centralizirani kontrolni čvor ima ulogu nametnuti mjere sinkronizacije svih korisnika. Upravo na taj način se definirani okviri dijele na vremenske odsječke, a svakom se korisniku dodjeljuje vremenski odsječak unutar kojeg će prenositi svoje informacije [13].

TDM metoda koja predstavlja metodu podijeljenog višestrukog pristupa se često upotrebljava za prijenos podataka i u digitalnom prijenosu glasa. Može se primijetiti kako je TDM kanal u osnovi podijeljen na nekoliko neovisnih kanala za pojedinačnog korisnika. Prema tome, metode komunikacijskog dizajna koje su opisane za komunikaciju s jednim korisnikom direktno su primjenjive i nema problema u okruženju višestrukog pristupa, osim ako je riječ o dodatnom zadatku koji se dodjeljuje dostupnim korisnicima određenih kanala [14].

Unutar digitalnih 2G staničnih sustava kao što je Globalni sustav za mobilne komunikacije (GSM), IS-136, *Personal Digital Cellular* (PDC), iDEN te unutar standarda *Digital Enhanced Cordless Telecommunications* (DECT) za prijenosne telefone se koristi TDM tehnologija. Osim navedenog, u velikoj se mjeri TDM upotrebljava u radio mrežama i satelitskim sustavima. Razlog uporabe ove metode je kako bi se omogućilo zemaljskim stanicama da mogu emitirati s prekidima na istoj frekvenciji, ali s vremenom njihovog prijenosa na način da su raspoređeni tako da se prekidi ne prekrivaju kad stignu na satelit, nego je riječ o tome da dolaze jedan iza drugoga u nizu. Prema tome su svi uspješno primljeni od demodulatora raspodjele modema prijavnika za odašiljač [15].

Kontrola veze na svim udaljenim web stranicama koje sadrže pripadajuće kontrole informacije je potrebna za neometan i kvalitetan rad TDM-a. Oprema računala koje sadržava prijavnike za odašiljač govori svakoj VSAT web lokaciji koji određeni vremenski interval treba koristiti u TDM okviru. Na svim web stranicama se povremeno emitira prethodno navedeni vremenski plan. Takav vremenski plan određenog snimanja može biti fiksiran na način da se svakoj web lokaciji dodijeli određeni postotak u cjelokupnom vremenu TDM okvira. Osim toga, može biti i dinamičan, a onda se dodijeljeno vremensko razdoblje prilagođava prema potrebama medija web lokacije.

## **2.4 FDM**

FDM metoda se temelji na multipleksiranju s podjelom frekvencija gdje se pomoću različitih frekvencija dodjeljuju različite širine pojasa na identičnom kanalu. Ove se širine pojasa u višestrukome pristupu s frekvencijskom podjelom dodjeljuju različitim korisnicima, prijavnima ili uređajima koji su povezani na mrežu zajedničkog kanala [16].

Višestruki pristup s raspodjelom frekvencija sadrži frekvencije koje su podijeljene na određeni broj kanala prema vremenu i snazi. Svakom se korisniku kanala dodjeljuje različiti frekvenciji opseg, a FDM je zadužen kako bi korisnicima dodijelio jedan ili više frekvencijskih opsega.

Unutar FDM tehnike se raspoloživa širina prijenosa kruga dijeli frekvencijom na uže pojaseve među kojima se svaki upotrebljava za posebni kanal za prijenos glasa ili podataka. Pomoću FDM tehnologije omogućen je prijenos nekoliko korisničkih kanala na jedan fizički krug [17]. Upravo to će omogućiti da jedan prijenosni medij poput kabela ili optičkog vlakna



bude dijeljen s nekoliko neovisnih signala. Osim toga, FDM tehnika se koristi za paralelni prijenos odvojenih serijskih bitova ili segmenata signala koji su veće brzine.

Za FDM metodu se može reći kako predstavlja frekvencijsko multipleksiranje čija se tehnika temelji na multipleksiranju od nekoliko signala preko zajedničkog medija. U ovoj se metodi signali različitih frekvencija kombiniraju kako bi se ostvario istodobni prijenos. Ukupna propusnost je podijeljena na skup frekvencijskih pojaseva koji se ne preklapaju. Svaki nositelj pojaseva ima različiti signal koji je generiran od strane jednog uređaja za slanje signala. Kako bi se spriječilo preklapanje signala, frekvencijski signali su odvojeni jedan od drugog takozvanim trakama neiskorištenih frekvencija, koji se još nazivaju zaštitni pojasevi. Pomoću multipleksera se kombiniraju modulirani signali na samom kraju za slanje. Preko komunikacijskog kanala se odvija prijenos kombiniranog signala kako bi se omogućio istodobni prijenos nekoliko neovisnih tokova podataka. Postupkom demultipleksiranja se na prijemnom kraju izdvajaju pojedinačni signali iz kombiniranog signala [18].

Svaki korisnik emitira bez vremenskih ograničenja, no ima na mogućnost korištenje samo jednog dijela od cjelokupnog raspoloživog frekvencijskog pojasa. Unutar frekvencijske domene odvojeni su različiti korisnici [13].

Dolazi se do zaključka da je najčešći primjer FDM-a multipleksiranje poziva unutar telefonske mreže. Velik broj korisnika ima mogućnost istovremenog razgovaranja bez da smetaju jedni drugima. Takva se komunikacija obavlja putem zajedničkog bežičnog kanala. Takav bežični kanal predstavlja niz frekvencijskih pojasa koji su dodijeljeni za prijenos informacija.

FDM tehnika se može upotrebljavati za razne aplikacije kao što su satelitska komunikacija, kabela televizija, radijsko emitiranje, i mobilni uređaji. Također, ovu je tehniku moguće kombinirati s ostalim tehnikama kako bi došlo do povećanja cjelokupne učinkovitost i propusnosti [19].

Frekvencijsku je podjelu moguće obaviti na vrlo jednostavan način iz razloga što svi odašiljači koji dijele medij imaju spektre izlazne snage u pojasevima koji se ne preklapaju. Razni problemi do kojih dolazi zbog različitih kašnjenja unutar TDM, eliminirani su unutar FDM-a. Jedan od glavnih nedostataka FDM-a je izuzetno visoka cijena i složeni potrebni propusni pojasi filtri. Za razliku od FDM-a, TDM upotrebljava puno jeftinije logičke funkcije. Također, još jedan od glavnih nedostataka unutar FDM-a je što imaju izuzetno rigorozan zahtjev za linearnost medija [13].

Kao što je prethodno navedeno, FDM predstavlja tehniku gdje se korisnički signali moduliraju pomoću različitih frekvencija. Za ovu se tehniku smatra da je najčešća tehnika multipleksiranja. WDM radi na jednakom principu kao što je slučaj s FDM-om, no jedina je razlika u tome što je WDM medij kabel s optičkim vlaknima i što su frekvencije koje se prenose izuzetno visoke. Ova tehnologija postaje sve popularnija zbog izuzetno visoke dostupne propusnosti unutar optičkih vlakana. U odnosu na TDM tehniku, FDM ima prednost jer u TDM-u svaki korisnik dobiva punu propusnost samo za vremenski odsječak koji je dodijeljen korisniku što znači da se može dogoditi da neki vremenski odsječak može ostati neiskorišten ukoliko korisnik ne odašilje [19].

Osnovne značajke FDM su [11]:

- potrebni su filtri visokih sposobnosti unutar radijskih okruženja,
- otporan na smetnje unutar komunikacijskog kanala,
- nije osjetljiv na problem čujnosti,
- svaki korisnički prijenos se odvija na različitim frekvencijama, a s obzirom na to, svakom korisniku je pridruženo posebno frekvencijsko mjesto.

FDM tehnika radi na način da sve signale odašilje duž iste veze velike brzine istovremeno sa svakim signalom koji je postavljen na različitu frekvenciju. Za ispravan rad FDM-a potrebno je izbjeći preklapanje frekvencija. Iz tog razloga potrebno je imati dovoljnu širinu pojasa kako bi se mogao prenijeti širok raspon potrebnih frekvencija. Demultipleksor na prijemnom kraju radi na način da dijeli signale s ugađanjem odgovarajuće frekvencije. Može se reći da FDM funkcionira na sličan način poput radijskog emitiranja gdje se nekoliko različitih emitiranja odvija istodobno, ali na različitim frekvencijama. Upravo to omogućuje slušateljima da odaberu koju frekvenciju, odnosno koju stanicu žele slušati na svom radiju [20].

Razlozi ograničenja ove vrste tehnike su zbog toga što je potrebno da svi signali prijmnika budu međusobno pravokutni. Također osim toga, potrebno je da sinkronizacija bude precizna između odašiljača i prijmnika.

Glavne razlike između FDM i TDM tehnike su sljedeće [19]:

- u FDM tehnici unutar posebnih frekvencijskih pojaseva mjesto zauzimaju korisnički podaci, a kod TDM tehnike signali zauzimaju posebne vremenske odsječke u istom frekvencijskom spektru
- kod FDM-a je smanjena propusnost za svakog korisnika, no prijenos je kontinuiran, dok je kod TDM-a riječ o punoj propusnosti za svakog korisnika, ali je prijenos moguće obaviti samo u određenom vremenskom periodu
- FDM se uglavnom upotrebljava kada je riječ o analognim signalima, a TDM se koristi za digitalne signale
- kod FDM-a nije potrebna sinkronizacija, dok je kod TDM tehnike sinkronizacija potrebna
- FDM tehnika zahtjeva kompleksan strujni krug, dok kod TDM tehnike strujni krug nije složen
- kod FDM-a se preslušavanje češće događa, dok kod TDM tehnike nema preslušavanja u velikoj mjeri
- FDM ima manje kašnjenje širenja, a TDM ima više kašnjenje širenja

## 2.5 CDM

Za vrijeme Drugog svjetskog rata razvijena je CDMA tehnologija od strane engleskih saveznika s ciljem zaštite svojih bežičnih prijenosa od ometanja. Nakon što se rat završio, ova se tehnologija patentirala od strane Qualcomm-a te ju je upravo on učinio komercijalno dostupnom. Prvi CDMA sustav pokret je nastao pred kraj 20. stoljeća od strane kompanije *Hutchinson Telepone Co* u Hong Kongu [21].

Kratica CDMA predstavlja višestruki pristup s kodnom podjelom. Poboljšanje performansi koje je dobiveno od strane DS proširenog spektra signala kroz dobitak obrade i dobitak kodiranja može se upotrebljavati za omogućavanje raznim DS signalima proširenog spektra da zauzmu jednaku širinu pojasa kanala, ali pod uvjetom da svaki signal ima svoju zasebnu PN sekvencu. Prema tome, moguće je imati nekoliko korisnika koji mogu istodobno prenositi poruke preko iste propusnosti kanala. Svaki korisnik unutar ove vrste digitalne komunikacije ima poseban PN kod koji se upotrebljava za prijenos preko zajedničke propusnosti kanala [14].

S obzirom da je CDMA nastao za vrijeme Drugog svjetskog rata jasno je da se veže za protokole koji se upotrebljavaju unutar bežičnih komunikacija druge i treće generacije. Pomoću ove tehnike može se omogućiti većem broju signala kako bi se zauzeo jedan prijenosni kanal uz uporabu raspoložive propusnosti.

Kako je prethodno navedeno, CDMA predstavlja višestruki pristup kodne podjele, a konkretno označava vrstu multipleksiranja koja će dopustiti različitim kanalima da zauzmu jedan prijenosni kanal. Ovakva se tehnologija obično upotrebljava u sustavima mobilnih uređaja ultra visoke frekvencije, odnosno frekvencijski pojaseva između 800 MHz i 1.9 GHz [22].

CDMA tehnika upotrebljava analogno digitalnu pretvorbu zajedno u kombinaciji s tehnologijom proširenog spektra. Audio ulaz se prvotno digitalizira u binarne elemente. Zatim se frekvencija signala mijenja prema definiranom kodu uzorka. Upravo to će omogućiti presretanje signala od strane prijammnika čiji je frekvencijski odziv programiran s istim kodom. Iz razloga što postoji više od milijun mogućih kodova za sekvenciju frekvencija, cjelokupna privatnost je povećana, a kloniranje je otežano [23].

Unutar CDMA, svakom korisniku se dodjeljuje jedinstveni niz kodova koji se koristi kako bi se kodirao vlastiti podatkovni signal. S obzirom da prijammnik poznaje slijed kodova korisnika, on dekodira primljeni signal i obnavlja izvorne podatke. U odnosu na širinu pojasa izvornog signala, širina pojasa kodiranog signala se odabire tako da bude puno veća. Drugim riječima, zbog procesa kodiranja dolazi do povećanja, odnosno širenja spektra signala podataka. Osnova CDMA je modulacija proširenog spektra. Ukoliko nekoliko korisnika istodobno odašilje signal proširenog spektra prijammnik će i dalje imati mogućnost razlikovanja korisnika. To vrijedi samo pod uvjetom da svaki korisnik ima posebni kod koji će imati zadovoljavajuće nisku unakrsnu korelaciju s ostalim kodovima [13].

Pomoću korelacije primljenog signala s lokalno generiranog koda određenog korisnika se odvija međusobno razdvajanje signala. Sustav može detektirati korisnički kod ukoliko se signal slaže s istim jer će onda funkcija korelacije biti velika. Ukoliko dođe do toga da željeni korisnički kod nema ništa zajedničko sa signalom korelacija će biti bliža nuli što za posljedicu ima uklanjanje signala. Kako je navedeno u prethodnoj tezi, ova se operacija zove unakrsnom korelacijom. Automatska korelacija predstavlja kada je kod u korelaciji sa signalom unutar bilo kojeg trenutka osim nule. Automatska se korelacija upotrebljava kako bi se odbile

smetnje s nekoliko staza. Može se reći da su prednosti CDMA-a zaštita privatnosti i fleksibilna raspodjela resursa.

Osim svima poznatog naziva CDMA, ovaj se pojam još može nazvati i oblikom „širenja spektra“ iz razloga što je propusnost podataka kod modulirano kodiranog signala puno veća od podataka koji se prenose [9].

CDMA se razlikuje u velikoj mjeri u odnosu na vremensko i frekvencijsko multipleksiranje, odnosno TDM i FDM. Unutar sustava višestrukog pristupa s kodiranom podjelom, takozvanog CDMA, korisnik ima mogućnost pristupa cjelokupnom pojasu za vrijeme kompletnog trajanja. Temeljno načelo označava da se različiti CDMA kodovi upotrebljavaju između različitih korisnika [18].

Osnovne značajke CDMA su sljedeće:

- a) temelji se na tehnologiji proširenog spektra koja na optimalan način upotrebljava raspoloživu propusnost
- b) velika sigurnost
- c) manji broj ljudi koristi CDMA
- d) brzi prijenos podataka
- e) CDMA mobilni uređaji ne emitiraju jako velika zračenja

Kod CDMA-a s porastom broja kodova povećava se i broj korisnika. Prednosti kod CDMA-a su sljedeće [18]:

- a) Zahtijevanje čvršće kontrole snage jer će korisnik u blizini bazne stanice koja odašilje jednakom snagom ugušiti signal. Svi signali trebaju imati više ili manje jednaku snagu na prijemu.
- b) Poboľšan prijem signala jer se odgođene verzije vremena signala mogu prikupiti i upotrebljavati za donošenje odluka na razini bita.
- c) Moguća upotreba kod fleksibilnog prijena.
- d) Smanjenje su smetnje.

Sa svojim prednostima uvijek dolaze i određeni nedostaci, a neke od njih kod CDMA-a su sljedeće [18]:

- a) Važno je da se duljina koda pažljivo odabere iz razloga što velika duljina koda za posljedicu može uzrokovati kašnjenje ili smetnje.

b) Potrebna je vremenska sinkronizacija.

c) Zbog postupnog prijenosa dolazi do povećane upotrebe radio resursa te može doći do smanjenja kapaciteta.

d) Iz razloga što stanice zahtijevaju stalnu čvrstu kontrolu snage može se dogoditi nekoliko primopredaja.

Dobar dio ljudi miješa pojmove CDMA i GSM kada pokušavaju prenijeti svoje mobilne uređaje s jednog pružatelja mobilne usluge na neki drugi. Neki od mobitela su napravljeni samo kako bi mogli raditi na njihovoj radijskoj mreži i nisu kompatibilni s tehnologijama mobilne komunikacije drugih mreža. To je izrazito bilo u počecima, a sada se dizajniraju mobilni uređaji koji mogu raditi na CDMA i GSM mrežama. Obje tehnike predstavljaju tehnologije višestrukog pristupa koje omogućuju razne podatkovne veze i više poziva na jednom radijskom kanalu. Razlika je što GSM pretvara svaki poziv u digitalni podatak, prenosi ih putem zajedničkog kanala u određeno vrijeme i nakon toga svaki poziv spaja na drugom kraju linije željenog primatelja. Prednost kod GSM-a je što je omogućen istodobni prijenos podataka i upućivanje glasovnih poziva te jeftinija proizvodnja [23].

CDM je pronašao primjenu u sljedećem [21]:

- GPS
- Kompanije mobilnih uređaja
- Standardi mobilnih uređaja
- Satelitski sustav za prijevoz

### 3. PRIMJENA TEHNIKA U PRAKTIČNOM DIJELU

#### 3.1 TDMA

Tehnologija višestrukog pristupa s vremenskim dijeljenjem (TDMA) simulirana je u MATLAB programu kako bi se proučilo njezino funkcioniranje u različitim scenarijima, primjerice kada postoji šum u komunikacijskom kanalu. Napravljeno je simulacijsko okruženje kreirano u MATLAB-u koje korisnicima omogućuje generiranje i procjenu TDMA signala unosom određenih parametara kao što su prijenosna frekvencija, modulacijska frekvencija i šum. U početku program traži unos broja korisnika koje koristi TDMA sustav kao i prijenosne frekvencije za svakog korisnika. Za rukovanje visokofrekvencijskim valovima i pružanje precizne vremenske rezolucije, simulacija je imala kratko trajanje (10 milisekundi) i visoku frekvenciju uzorkovanja (1 MHz).

Prilikom uzorkovanja, važno je poštovati pravila Nyquistovog teorema koji kaže da frekvencija uzorkovanja signala mora biti najmanje dvostruko veća od najveće frekvencije prisutne u signalu.

Slijedeći TDMA smjernice, ova dodjela uspješno multipleksira korisničke signale u vremenskoj domeni. Signal svakog korisnika je postavljen u svoj odgovarajući vremenski osječak kako bi se stvorio kompozitni signal za prijenos, koji je bio kombinirani TDMA signal. Aditivni bijeli Gaussov šum (AWGN) dodaje se kombiniranom TDMA signalu na korisnički definiranoj razini omjera signala i šuma (SNR) kako bi se oponašale situacije u stvarnom svijetu. Ova faza je omogućila procjenu otpornosti sustava i ispitivanje utjecaja šuma na odaslani signal.

Nakon toga, kompozitni signal sa šumom je demoduliran kako bi se izdvojili pojedinačni korisnički signali. To je zahtijevalo ponovno stvaranje izvornih signala za usporedbu i analizu nakon odvajanja signala svakog korisnika prema unaprijed određenim vremenskim okvirima.

Analiza rezultata:

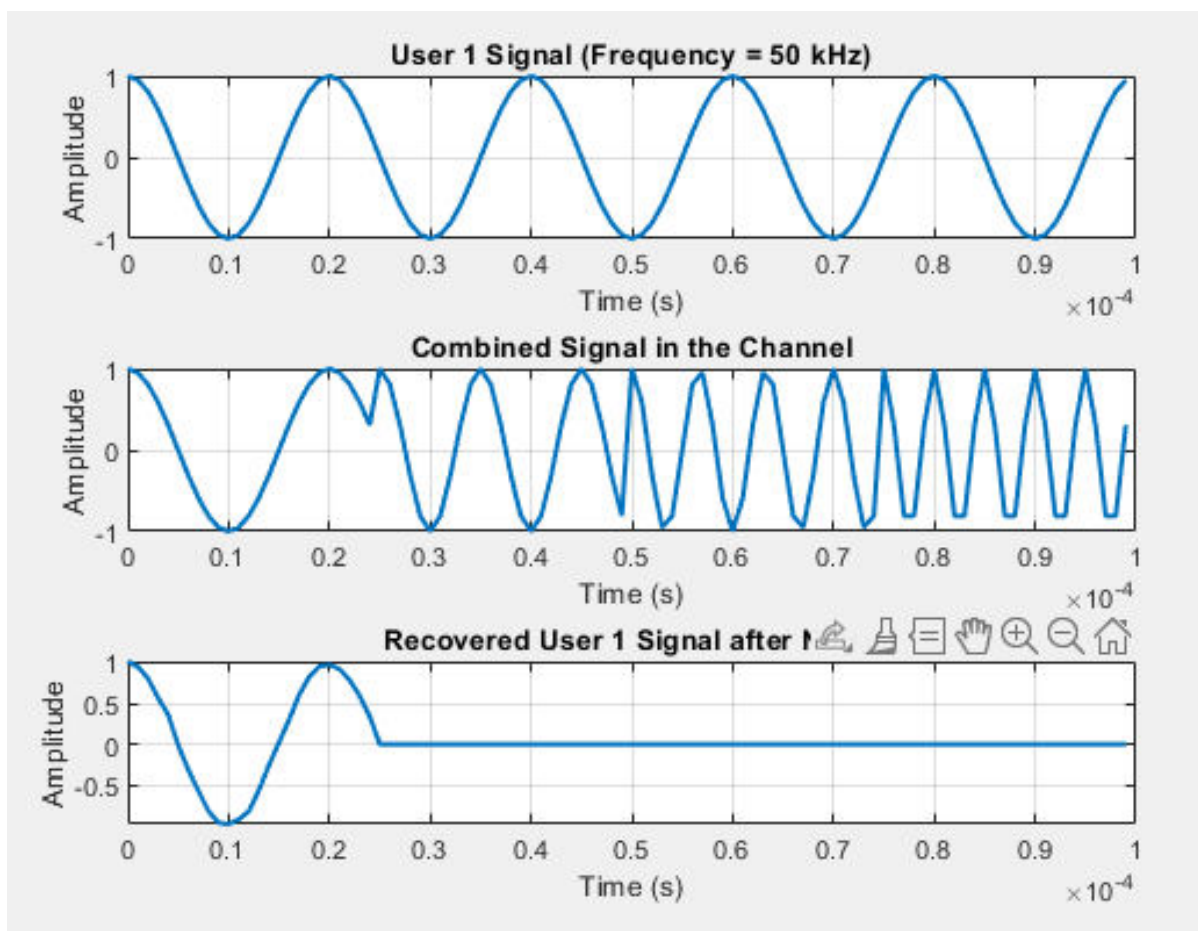
Broj korisnika: 4

Frekvencija korisnika (u kHz): 50, 100, 150 i 200 kHz

Omjer signala i šuma (SNR): 30 dB

Korisnik 1:

Prvi graf na donjoj slici prikazuje početni signal koji je stvoren na frekvenciji od 50 kHz za korisnika 1. Signal ima konstantnu amplitudu i periodičnu frekvenciju. Drugi graf prikazuje kombinirani TDMA signal za vremenski odsječak korisnika 1. Na tom grafu možemo vidjeti promjene u amplitudi i smetnje u signalu, što je uobičajeno kada se originalni signal pomiješa sa šumom prijenosnog kanala. Obnovljeni signal od korisnika 1 prikazan je u trećem grafu nakon što je prošao preko kanala sa smetnjama pri omjeru signal/šum od 30 dB. Signal pokazuje dobru demodulaciju i smanjenje šuma budući da zadržava svojstva izvornog valnog oblika.



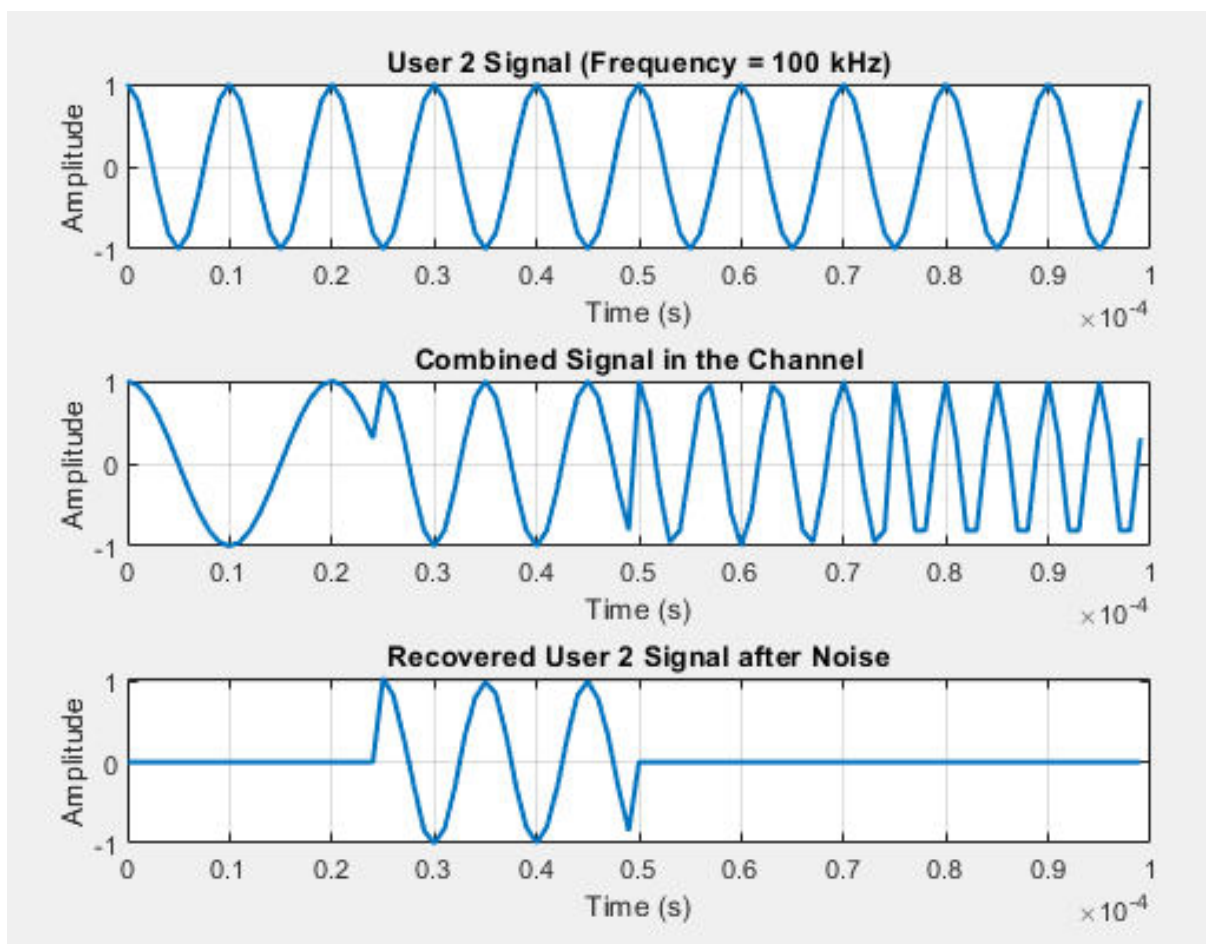
Slika 3.1: Korisnik 1 [izrada autora]



Korisnik 2:

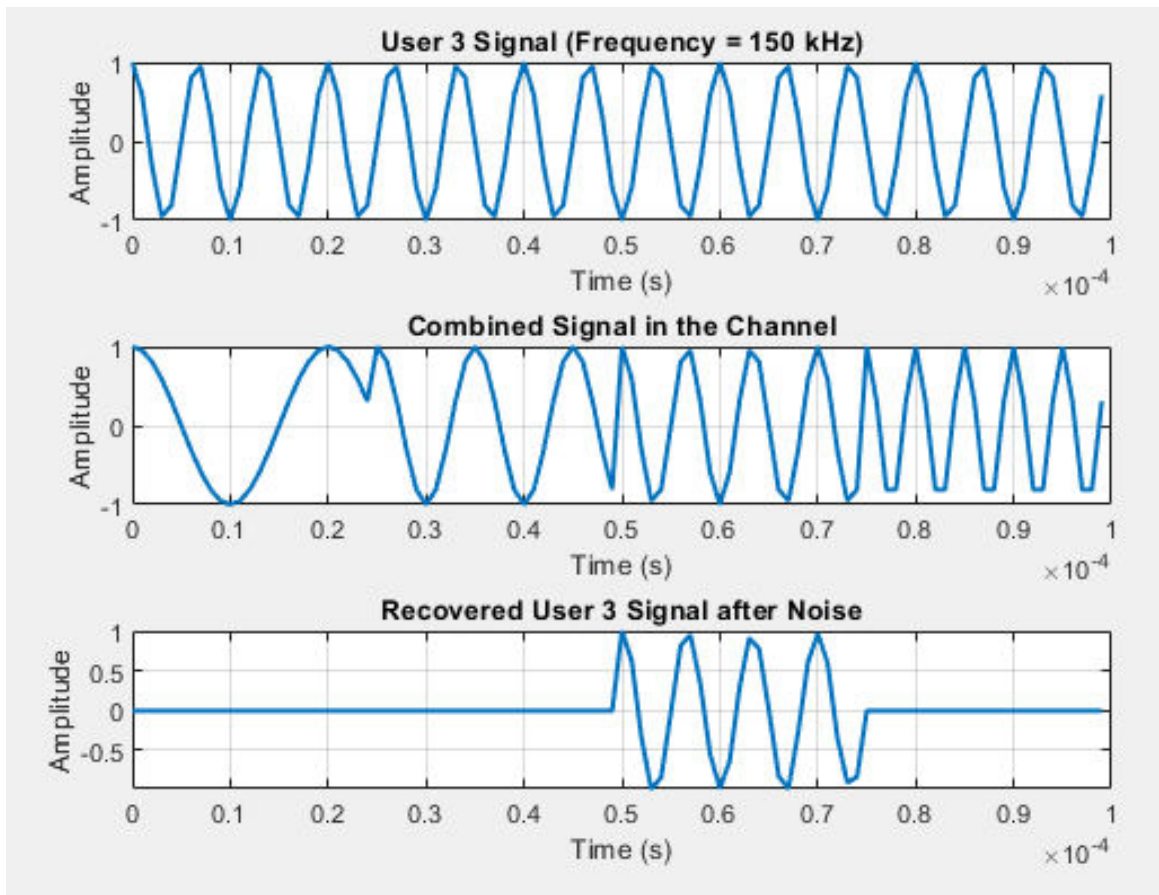
Prvi graf na donjoj slici prikazuje signal drugog korisnika s dvostruko većom frekvencijom od prvog korisnika (100 kHz). Ovaj signal također ima konstantnu amplitudu i jasno definiranu frekvenciju. Drugi graf prikazuje signala korisnika 2 kako se kombinira sa šumom prilikom prolaska kroz kanal. Signal se kombinira s šumom, što rezultira promjenama u amplitudi i mogućim izobličenjima u valnom obliku. To je prikaz kako bi signal izgledao tijekom prijenosa kroz stvarni komunikacijski kanal gdje prisutnost šuma može značajno utjecati na kvalitetu signala.

Na trećem grafu prikazan je signal korisnika 2 nakon što su primijenjene tehnike za uklanjanje šuma i demodulaciju. Signal izgleda vrlo slično originalnom, što ukazuje na uspješan oporavak signala od šuma. Amplituda i osnovni valni oblik su sačuvani, pokazujući efikasnost korištenih metoda obrade signala



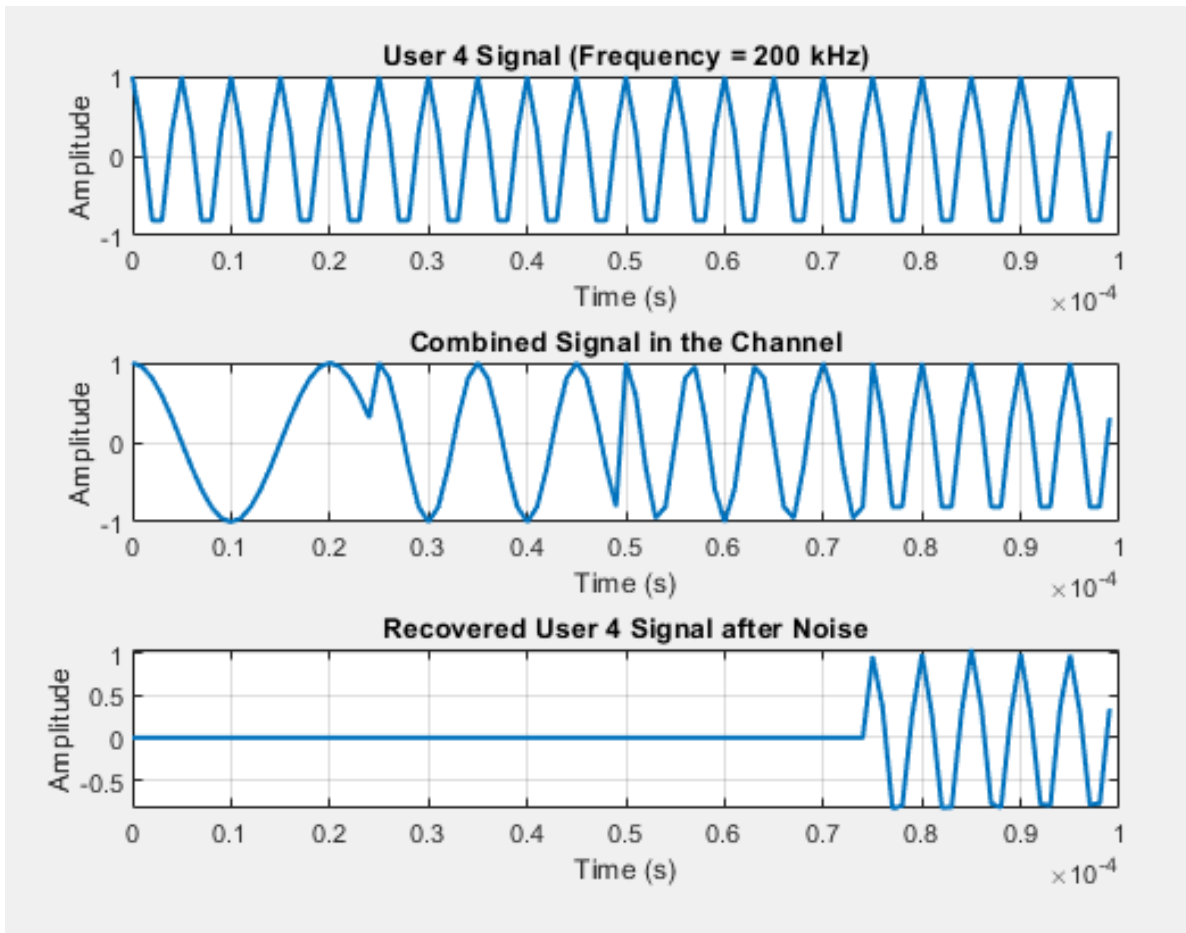
Slika 3.2: Korisnik 2 [izrada autora]

Prvi graf na donjoj slici prikazuje signal korisnika 3 s frekvencijom od 150 kHz. Signal pokazuje konstantnu amplitudu i visoku frekvenciju. Drugi graf prikazuje kako signal korisnika 3 izgleda kada je kombiniran sa šumom unutar komunikacijskog kanala. Ova vizualizacija je korisna za analizu kako šum utječe na signal pri višim frekvencijama. Posljednji graf pokazuje signal korisnika 3 nakon što je prošao process oporavka od šuma.



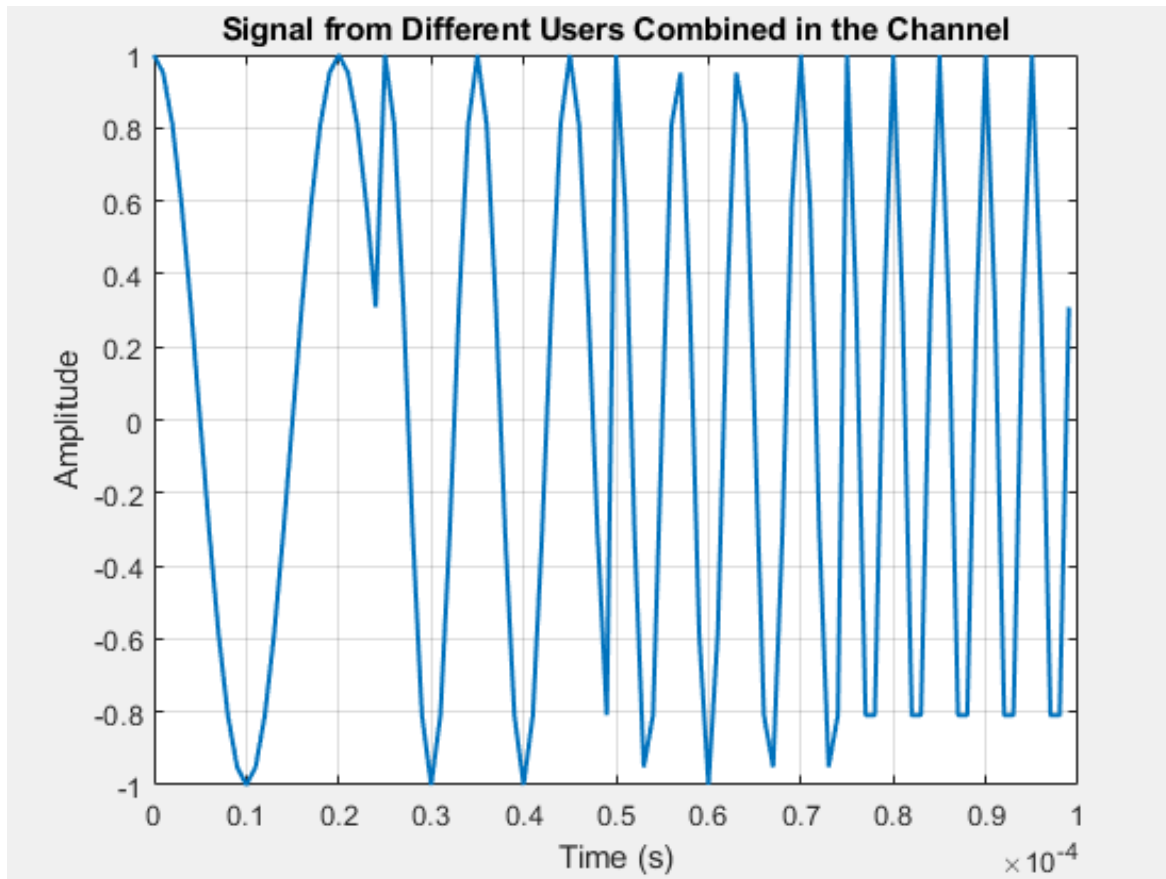
Slika 3.3: Korisnik 3 [izrada autora]

Prvi graf na donjoj slici prikazuje signal korisnika 4 s najvišom frekvencijom od 200 kHz među prikazanim korisnicima. Signal pokazuje konstantnu amplitudu i jasno definiranu visoku frekvenciju. Drugi graf predstavlja kako signal korisnika 4 izgleda kada je kombiniran sa šumom unutar komunikacijskog kanala, primjećuje se variranje kod amplitude i u obliku signala, što ukazuje na utjecaj šumova na signal tijekom njegovog prijenosa. Treći graf prikazuje kako izgleda signal korisnika 4 nakon procesa filtriranja i oporavka. Signal je oporavljen u jasnije definirane vremenske segmente, što ukazuje na učinkovitu tehniku oporavka koja minimizira utjecaj šuma.



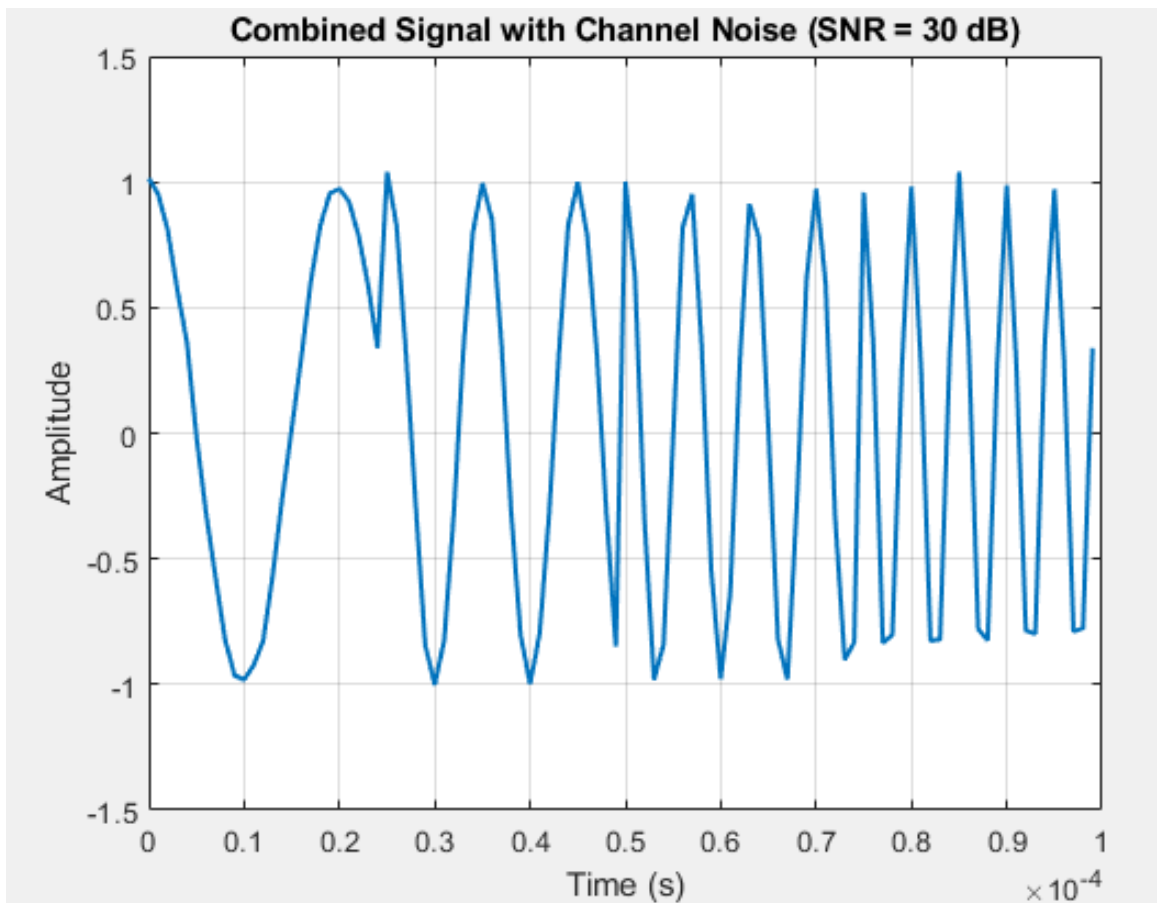
Slika 3.4: Korisnik 4 [izrada autora]

Kombinirani signal sva četiri TDMA korisnika prikazan je na sljedećoj slici. Kompozitni signal se proizvodi kada se signal svakog korisnika emitira tijekom vremenskog odsječka koji mu je dodijeljen, čime se izbjegavaju međusobne smetnje signala. Značajka vremenske podjele TDMA ilustrirana je na slici, koja prikazuje vremenske odsječke dodijeljene svakom korisniku.



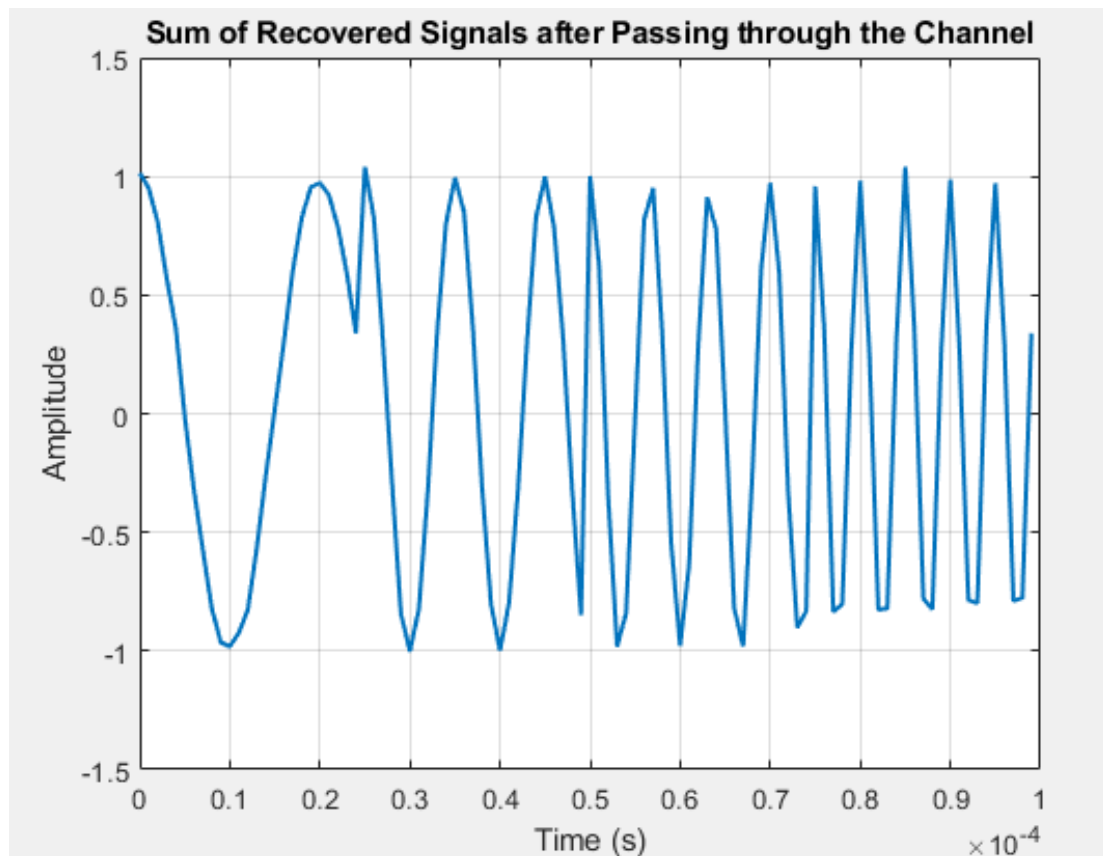
Slika 3.5: Kombinirani signal svih korisnika unutar kanala [izrada autora]

Na donjoj slici je prikazan kombinirani TDMA signal nakon što je izložen šumu, s omjerom signala i šuma od 30 dB. Unatoč prisutnosti šuma, signal zadržava dovoljno svoje strukture, što ukazuje na relativno visoku kvalitetu prijenosa s minimalnim pogoršanjem zbog šuma. To sugerira da je signal robustan u uvjetima s umjerenim nivoom šumova u kanalu.



Slika 3.6: Kombinirani signal sa šumom 50 dB [izrada autora]

Zbroj svih obnovljenih korisničkih signala nakon što su prošli kroz kanal sa šumom prikazan je na donjoj slici. Signal koji se vidi pokazuje uspješnu demodulaciju i efikasno smanjenje šuma, čime su očuvane osnovne karakteristike izvornih signala. Ovaj kombinirani signal ilustrira efikasnost sustava u vraćanju korisničkih podataka nakon izloženosti smetnjama i šumu, naglašavajući pouzdanost i performanse sustava u stvarnim uvjetima komunikacije.



Slika 3.7: Zbroj svih obnovljenih korisničkih signala nakon prolaska kroz kanal [izrada autora]

Rezultati pokazuju koliko dobro TDMA sustav multipleksira signale nekoliko korisnika u vremenskoj domeni. Unutar dodijeljenog vremenskog intervala isporučuje se signal svakog korisnika, a visoki omjer signala i šuma jamči da nema smetnji tijekom prijenosa. Sustav može demodulirati i obnoviti signal svakog korisnika s izvrsnom točnošću, kao što pokazuju obnovljeni signali za sve korisnike. Ukupna izvedba pokazuje da je TDMA pouzdana tehnika za multipleksiranje korisnika u širokopolasnoj pristupnoj mreži, nudeći jedinstven i dobro definiran prijenos signala zajedno s učinkovitim smanjenjem šuma.

### 3.2 FDMA

Cilj je bio koristiti MATLAB za simulaciju i konstruirati višestruki pristup s frekvencijskom podjelom. Kako bi se upravljalo brojnim korisnicima koji šalju signale preko različitih prijenosnih frekvencija preko istog komunikacijskog kanala, stvorena je FDMA tehnika.

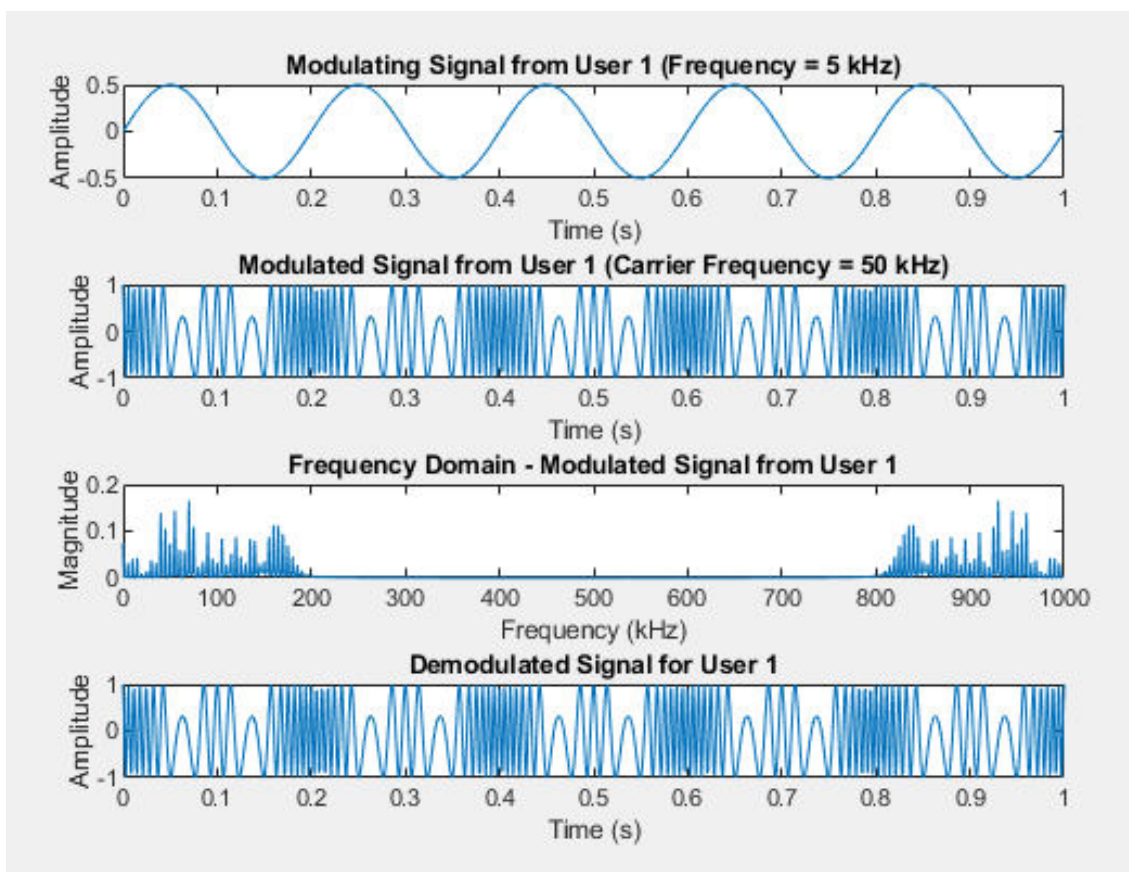
Simulacijski softver razvijen u MATLAB-u, koji je dizajniran za proučavanje i analizu FDMA sistema, traži od korisnika inicijalne ulazne parametre prije pokretanja simulacije. Ovi parametri uključuju broj aktivnih korisnika u komunikacijskom sistemu, njihove prijenosne frekvencije, modulacijske frekvencije, te razinu omjera signala i šuma (SNR).

Za simulaciju FDMA sistema, modulacijski signal za svakog korisnika generira se kao kombinacija sinusnih valova na određenim frekvencijama. Svaki od ovih signala zatim je frekvencijski moduliran koristeći jedinstvenu prijenosnu frekvenciju dodijeljenu svakom korisniku. Korisnici softvera specificiraju odstupanje frekvencije tj. omjer odstupanja frekvencije i frekvencije modulirajućeg signala. Veće odstupanje frekvencije omogućava modulirajućem signalu da nosi više informacija, ali također povećava širinu spektra emitiranog signala. Ovaj princip omogućava precizniju kontrolu nad propusnošću signala te pomaže za bolje iskorištavanje dostupnog frekvencijskog spektra u komunikacijskom kanalu.

Na temelju unaprijed definirane razine omjera signala i šuma (SNR), u kombinirani signal dodan je aditivni bijeli Gaussov šum (AWG) koristeći funkciju `randn`, koja generira slučajne vrijednosti iz normalne distribucije. Ove vrijednosti su zatim skalirane prema zadanoj razini SNR-a kako bi se simuliralo realne uvjete šuma u komunikacijskom kanalu. Snaga šuma izračunata je tako da odgovara zadanoj vrijednosti SNR-a, čime se osigurava realistično testno okruženje slično onome što se može očekivati u stvarnim komunikacijskim mrežama. Ova simulacija smetnji i slabljenja pomaže u analizi kako šum utječe na kvalitetu signala. Za oporavak signala svakog korisnika, kombinirani šumni signal je demoduliran korištenjem originalnih prijenosnih frekvencija i modulacijskih parametara. Svaki korisnički signal je uspješno rekonstruiran metodom demodulacije, što omogućuje preciznu analizu integriteta signala nakon prolaska kroz šumni kanal.

Performanse FDMA sustava pod različitim okolnostima mogu se potom temeljito ispitati zahvaljujući iscertavanju obnovljenih signala pored originalnih modulacijskih signala i kombiniranog signala kanala. Ova metodologija pokazuje koliko je FDMA sustav prilagodljiv, dopuštajući simulaciju realnih situacija šuma dok podržava mnoge korisnike i različite frekvencije.

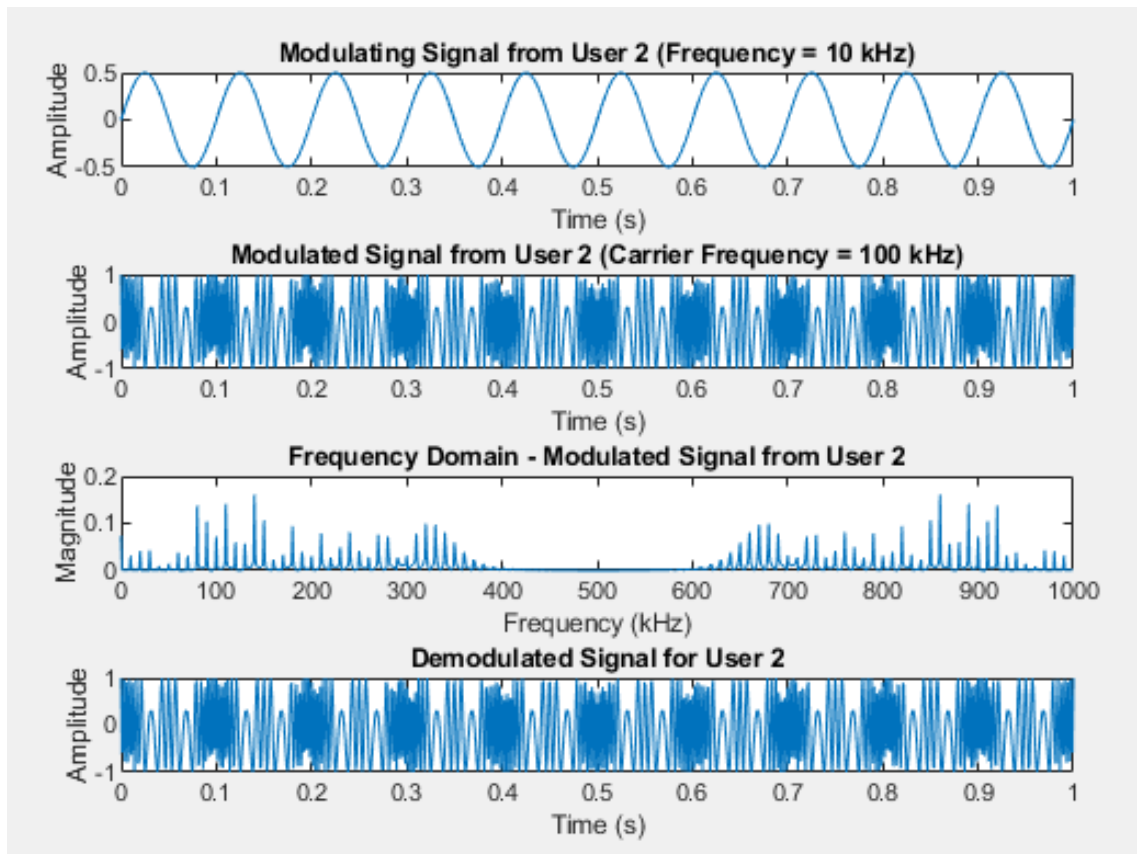
Modulacijski signal korisnika 1 pokazuje sinusoidalni valni signal s frekvencijom od 5 kHz. Kada je moduliran s prijenosnom frekvencijom od 5 kHz, signal prolazi frekvencijsku modulaciju i generira jedinstveni uzorak odstupanja frekvencije. Nakon prijenosa putem kanala sa omjerom signala i šuma od 30 dB-a, demodulirani signal blisko oponaša izvorni modulacijski signal, što ukazuje da je razina šuma u biti zanemariva i da je integritet signala očuvan što se može vidjeti uspoređujući drugi i četvrti graf.



Slika 3.8: Korisnik 1 [izrada autora]

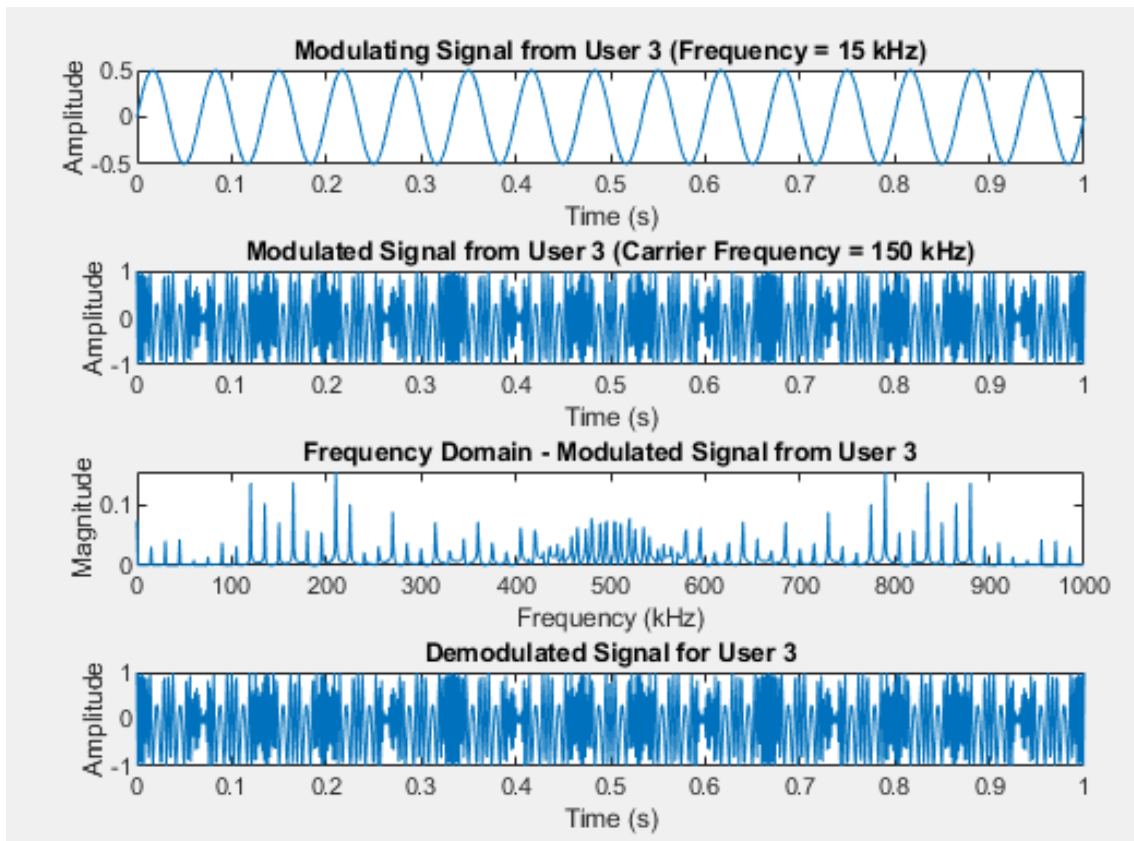
Korisnik 2 šalje sinusoidalni val na 10 kHz kao modulacijski signal. Kod modulacije s prijenosnom frekvencijom od 100 kHz, generira se modulirani signal s vidljivim promjenama frekvencije. Kada se šalje preko kanala s visokim omjerom signala i šuma, demodulirani signal zadržava visoku razinu preciznosti u odnosu na modulacijski signal. Ovo pokazuje koliko učinkovito FDMA održava jasnoću i integritet signala usprkos potencijalnom šumu kanala.





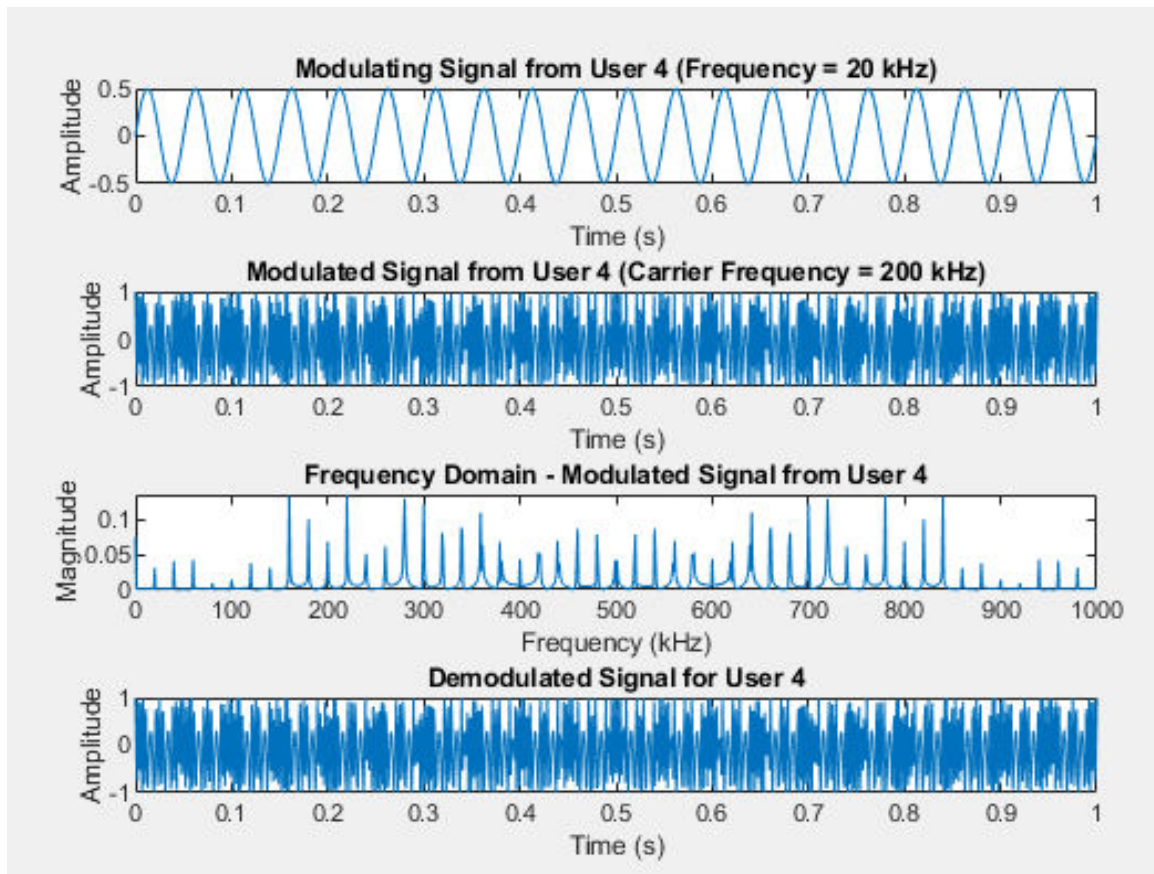
Slika 3.9: Korisnik 2 [izrada autora]

Kada je moduliran s prijenosnom frekvencijom od 150 kHz, modulacijski signal korisnika 3 na 15 kHz prikazuje različite karakteristike frekvencijske modulacije. Zbog visoke razine signala i šuma, demodulirani signal pokazuje male varijacije u odnosu na originalni modulacijski signal nakon što je prošao kroz kanal. Ovo sugerira da FDMA sustav može precizno povratiti signal uz malo ili nimalo šuma ili smetnji.



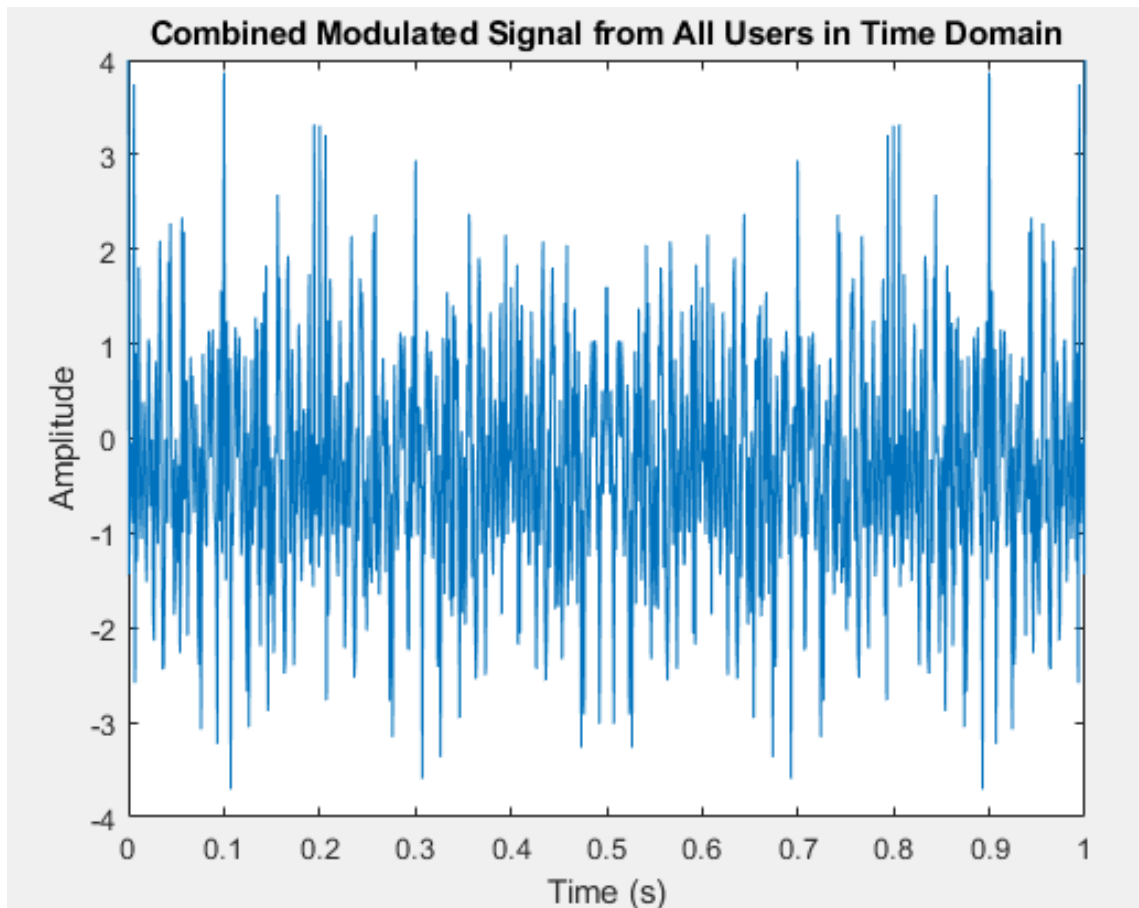
Slika 3.10: Korisnik 3 [izrada autora]

Modulacijski signal korisnika 4 je moduliran na frekvenciji od 20 kHz koristeći prijenosnu frekvenciju od 200 kHz. Unatoč visokom omjeru signala i šuma, demodulirani signal uspješno replicira originalni modulacijski signal nakon što je prenesen kroz kanal. Ovo pokazuje da FDMA sustav može efektivno obnoviti signal bez značajnih smetnji ili šuma.



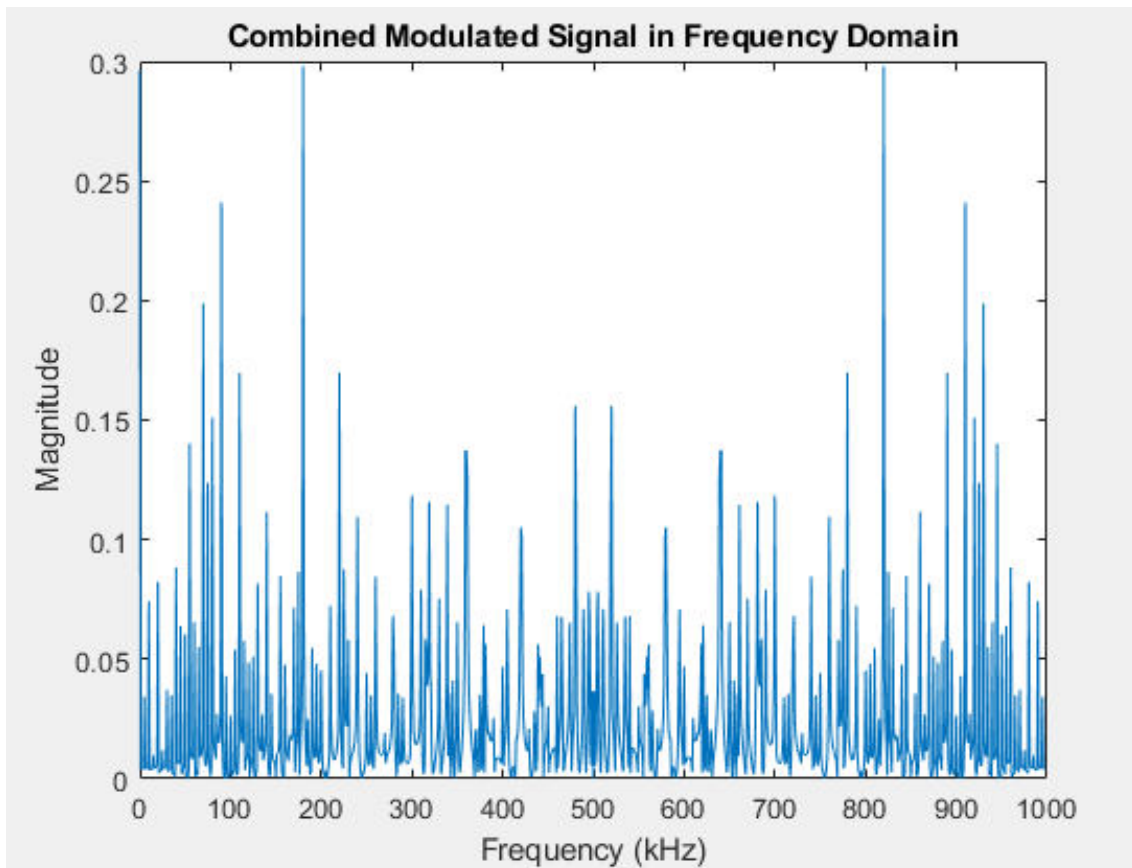
Slika 3.11: Korisnik 4 [izrada autora]

Superpozicija moduliranih signala prikazana je kombiniranim signalom u kanalu, koji se sastoji od doprinosa sva četiri korisnika. Zbog visoke razine omjera signala i šuma od 30 dB, smetnje su svedene na minimum, što omogućuje preciznu demodulaciju i oporavak signala za svakog korisnika.



Slika 3.12: Kombinirani modulacijski signal svih korisnika u vremenskoj domeni [izrada autora]

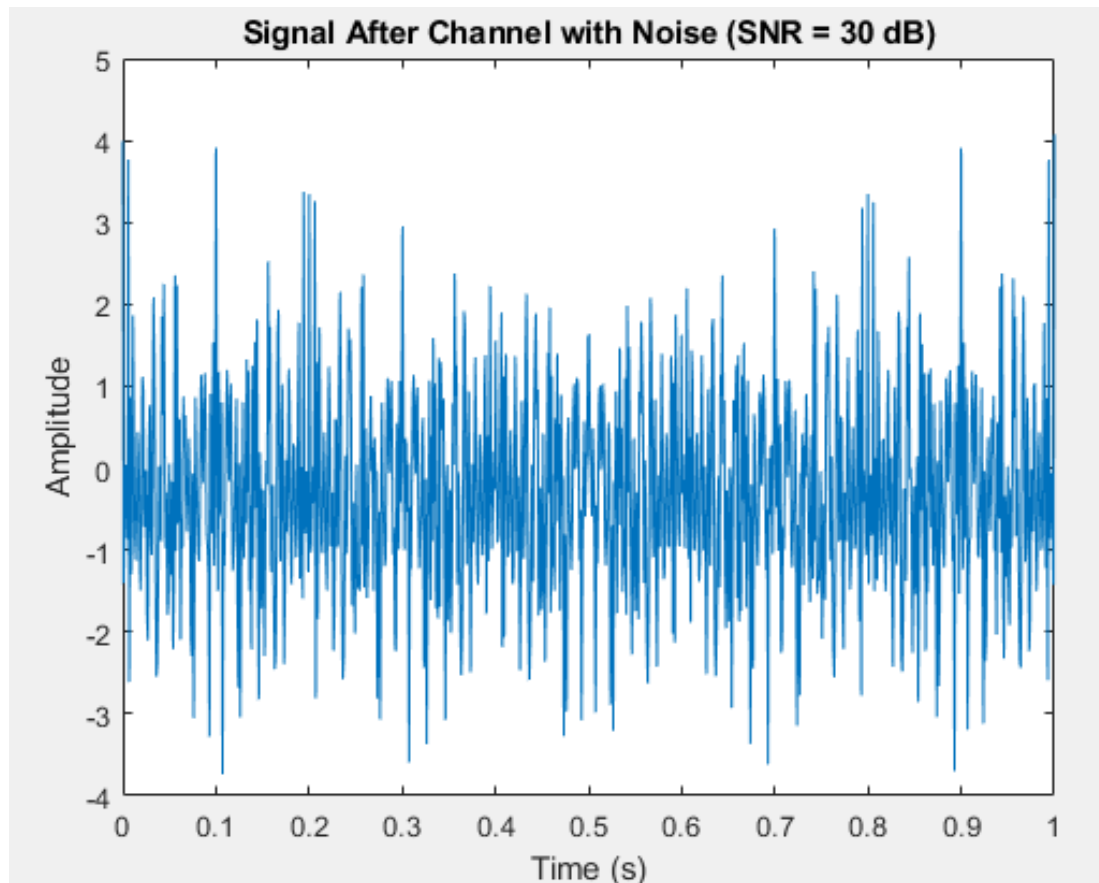
Na donjoj slici vidimo spektralni prikaz kombiniranog moduliranog signala u frekvencijskom domenu, koji ilustrira kako se signali različitih korisnika u FDMA sistemu distribuiraju kroz spektar. Svaki vrh u grafu predstavlja frekvencijsku komponentu pojedinog korisnika. Razmak između vrhova odražava raspodjelu frekvencijskog spektra koja osigurava da signali ne interferiraju jedni s drugima, čime se maksimizira iskoristivost spektra i smanjuje međusobno ometanje signala. Ovaj spektralni prikaz demonstrira kako FDMA omogućuje višestrukim korisnicima da dijele isti komunikacijski kanal nezavisno, svaki unutar svojeg jedinstvenog frekvencijskog pojasa.



Slika 3.13: Kombinirani modulacijski signal svih korisnika u frekvencijskoj domeni [izrada autora]

Učinkovitom podjelom signala prema njihovim prijenosnim frekvencijama, FDMA tehnika osigurava da komunikacija svakog korisnika bude neometana i jedinstvena. Ova simulacija pokazuje korisnost FDMA u stvarnim komunikacijskim mrežama potvrđujući njegovu otpornost u rukovanju brojnim korisnicima s različitim dodjelama frekvencija i visokim SNR uvjetima.

Na donjoj slici je prikazan signal nakon što je prošao kroz komunikacijski kanal sa šumom, gdje visoki nivo šuma na SNR od 30 dB uzrokuje fluktuacije amplitude, što predstavlja izazov za demodulaciju i izolaciju korisnih informacija iz signala.



Slika 3.14: Signal nakon prolaska kroz kanal sa šumom 30 dB [izrada autora]

U ovoj simulaciji smo istražili koliko je uspješan višestruki pristup s frekvencijskom podjelom (FDMA) u različitim scenarijima, obrađujući posebnu pozornost na utjecaj prijenosnih i modulacijskih frekvencija, odstupanje frekvencije i razine omjera signala i šuma (SNR).

### 3.3 CDMA

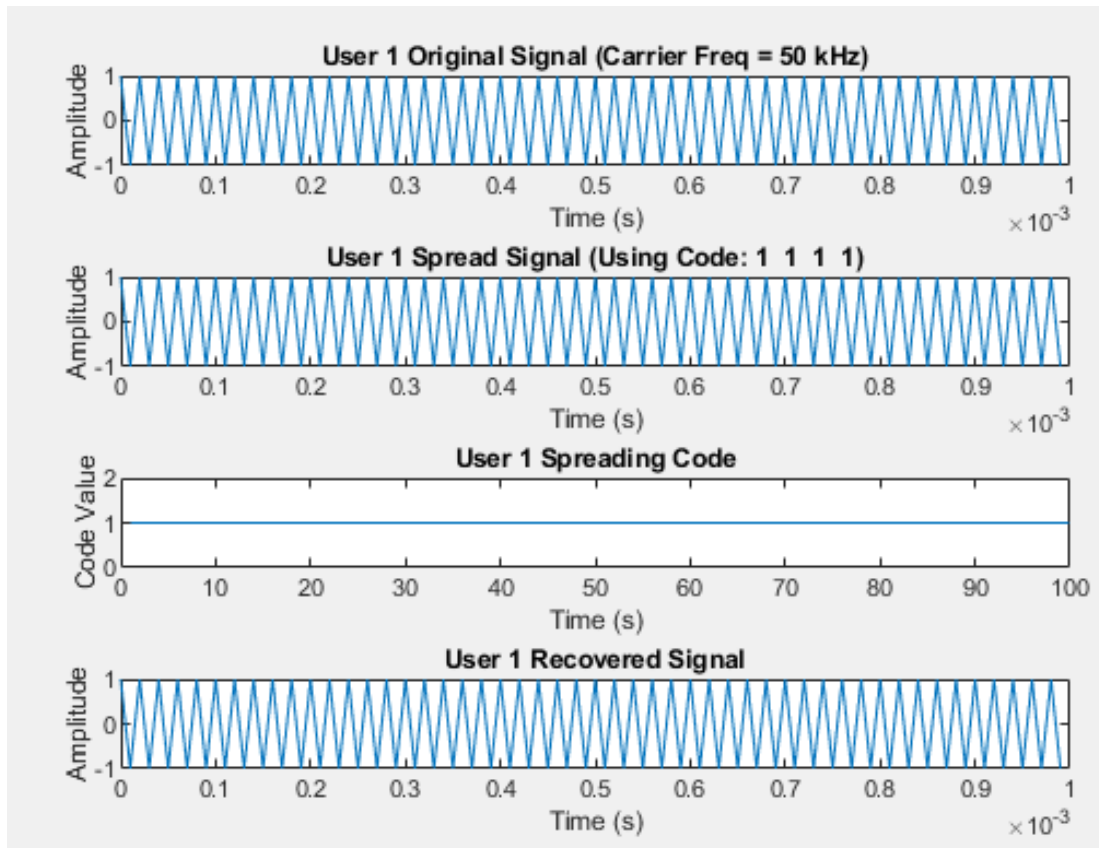
Ova simulacija je imala za cilj ispitati izvedbu nekoliko korisnika koji dijele isti frekvencijski pojas implementacijom sustava s višestrukim pristupom kodne podjele (CDMA) koristeći MATLAB. Za četiri korisnika odabrali smo frekvenciju uzorkovanja od 100 000 Hz, a trajanje signala od 0,01 sekunde bile su specifikacije simulacije koje bi pomogle u analizi signala tako visoke frekvencije. Signal svakog korisnika moduliran je korištenjem zajedničke prijenosne frekvencije od 10 kHz, varijacije frekvencije od 200 Hz i razine signal-šum (SNR) od 10 dB. Jasnom distribucijom signala svakog korisnika razvijeni su ortogonalni Walsh-Hadamardovi kodovi koji jamče da nema smetnji među korisnicima.

Kosinusni signali svakog korisnika generirani su i zatim rašireni pomoću njihovih jedinstvenih Walsh-Hadamardovih kodova, što je rezultiralo ukupnim CDMA signalom. Zatim je, kako bi se oponašali komunikacijski kanali u stvarnom svijetu, kombiniranom signalu dodan aditivni bijeli Gaussov šum (AWGN), koji predstavlja različite razine šuma u situacijama u stvarnom svijetu. Rezultirajući kombinirani signal sa šumom je potom demoduliran kako bi se povratili originalni signali svakog korisnika, koji su dobiveni množenjem kombiniranog šumnog signala s odgovarajućim kodom širenja za svakog korisnika i zbrajanjem rezultata da bi se dobili smanjeni signali.

Isertavanje izvornog, proširenog i obnovljenog signala za svakog korisnika omogućilo je analizu rezultata. Širenje signala pokazalo je utjecaj kodova širenja, iako su izvorni signali bili lako uočljivi kao kosinusni valovi. Nakon demodulacije, obnovljeni signali pokazali su veliku sličnost s izvornim signalima, što ukazuje da je CDMA pristup bio uspješan u obnavljanju korisničkih signala čak i u prisutnosti drugih korisničkih signala i šuma. Kako bi se pokazalo kako šum utječe na signal kao cjelinu, prikazan je i kombinirani CDMA signal i šum.

Ova simulacija pokazuje otpornost CDMA-a u višekorisničkom okruženju demonstrirajući sposobnost kodova za ortogonalno širenje da učinkovito dijele korisničke signale i smanjuju smetnje. Niska razina signala i šuma simulacije istaknula je sposobnost sustava za upravljanje bučnim okruženjima i pružanje pouzdanog oporavka signala. Korištenjem simulacije uspjeli smo dobiti uvid u to koliko dobro CDMA sustavi funkcioniraju u situacijama kada nekoliko korisnika dijeli isti frekvencijski pojas, kao u bežičnim komunikacijskim mrežama.

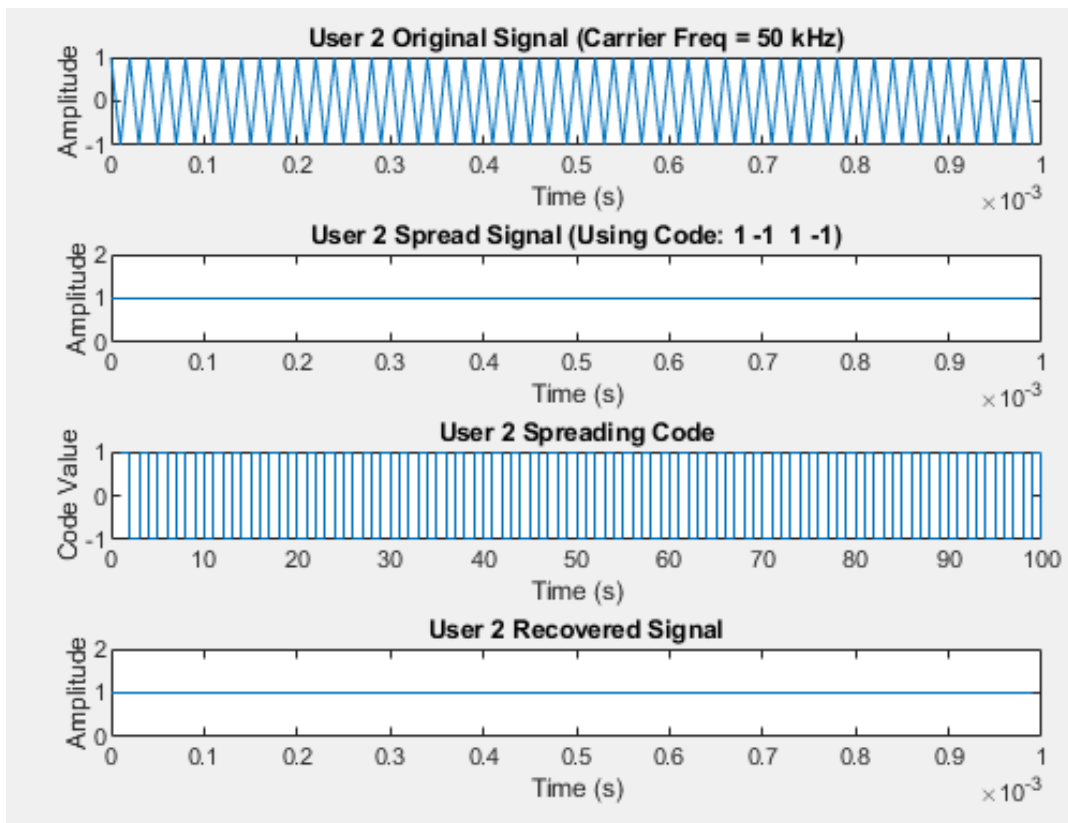
Na temelju korištenja Walsh-Hadamard matrice generirane funkcijom `hadamard(numUsers)`, svaki korisnik u simulaciji CDMA sustava dobio je jedinstveni kod širenja iz ove matrice. Kao što je prikazano na slikama za korisnike, korisniku 1 je dodijeljen kod [1, 1, 1, 1], korisniku 2 kod [1, -1, 1, -1], korisniku 3 kod [1, 1, -1, -1], a korisniku 4 kod [1, -1, -1, 1]. Ovi kodovi omogućuju razlikovanje signala svakog korisnika unutar zajedničkog kanala, minimizirajući interferenciju i omogućujući učinkovitu višekorisničku komunikaciju.



Slika 3.15: Korisnik 1 [izrada autora]

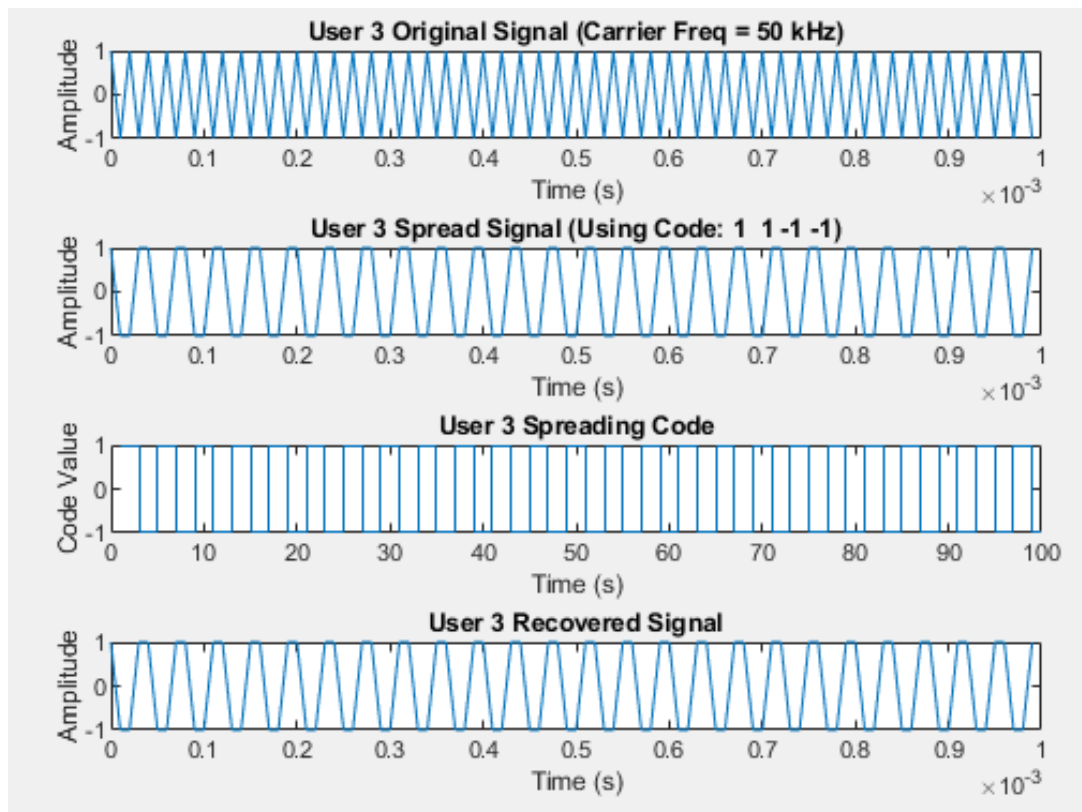
Donja slika prikazuje četiri koraka u obradi CDMA signala za korisnika 1. Gornji graf ilustrira originalni signal korisnika s frekvencijom od 50 kHz. Drugi graf pokazuje kako izgleda signal nakon primjene šifre za širenje '1 1 1 1', koja efektivno širi signal preko šireg spektra kako bi se smanjila interferencija i poboljšala sigurnost signala. Treći graf detaljno prikazuje primijenjeni kod širenja tijekom vremena. Na donjem grafu prikazan je signal nakon što je uspješno oporavljen, demonstrirajući kako CDMA tehnologija omogućava točno rekonstruiranje originalnog signala unatoč prethodnom širenju i prisustvu šuma u kanalu.





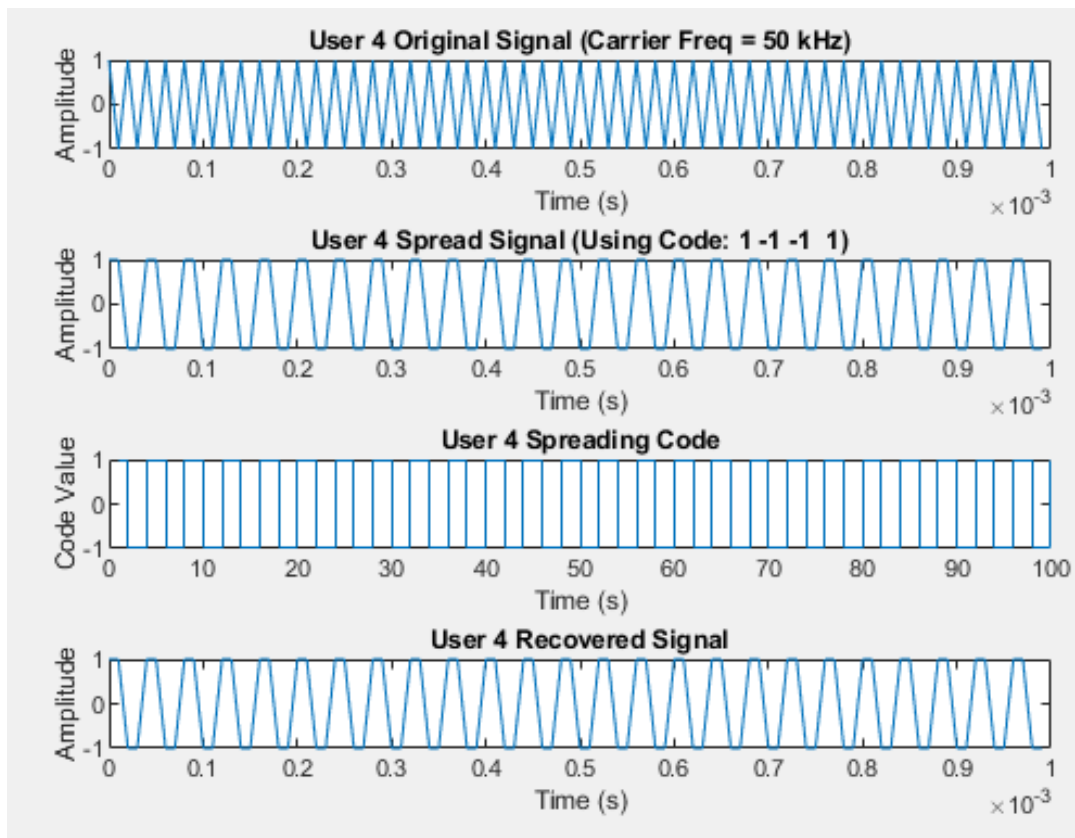
Slika 3.16: Korisnik 2 [izrada autora]

Donja slika prikazuje obradu CDMA signala za korisnika 2. Gornji graf pokazuje izvorni signal s frekvencijom od 50 kHz. Drugi graf ilustrira signal nakon primjene šifre za širenje '1 -1 1 -1', što rezultira proširenjem spektra signala. Treći graf detaljno prikazuje primijenjeni kod širenja. Na donjem grafu prikazan je oporavljeni signal, uspješno rekonstruiran nakon procesa demodulacije, potvrđujući efikasnost CDMA sustava u očuvanju informacija.



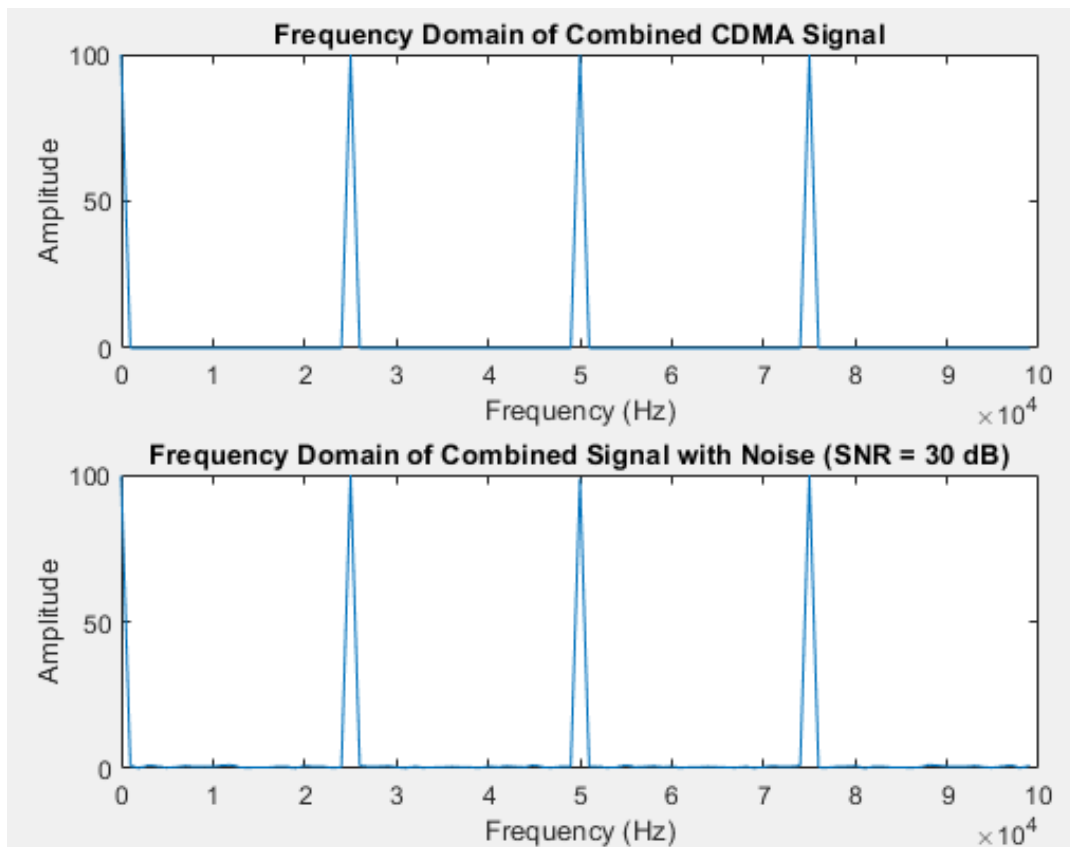
Slika 3.17: Korisnik 3 [izrada autora]

Donja slika prikazuje izvorni signal korisnika 3 kao jasan sinusni val na frekvenciji od 50 kHz. Signal je zatim proširen korištenjem Walsh-Hadamard koda '1 1 -1 -1', što je rezultiralo tipičnim uzorkom širenja vidljivim na srednjem grafu. Oporavljeni signal, prikazan na donjem grafu, vrlo je sličan izvornom signalu, čime je potvrđena visoka učinkovitost CDMA sustava. Ova sposobnost preciznog oporavka signala demonstrira otpornost i pouzdanost sustava u scenarijima s više korisnika.



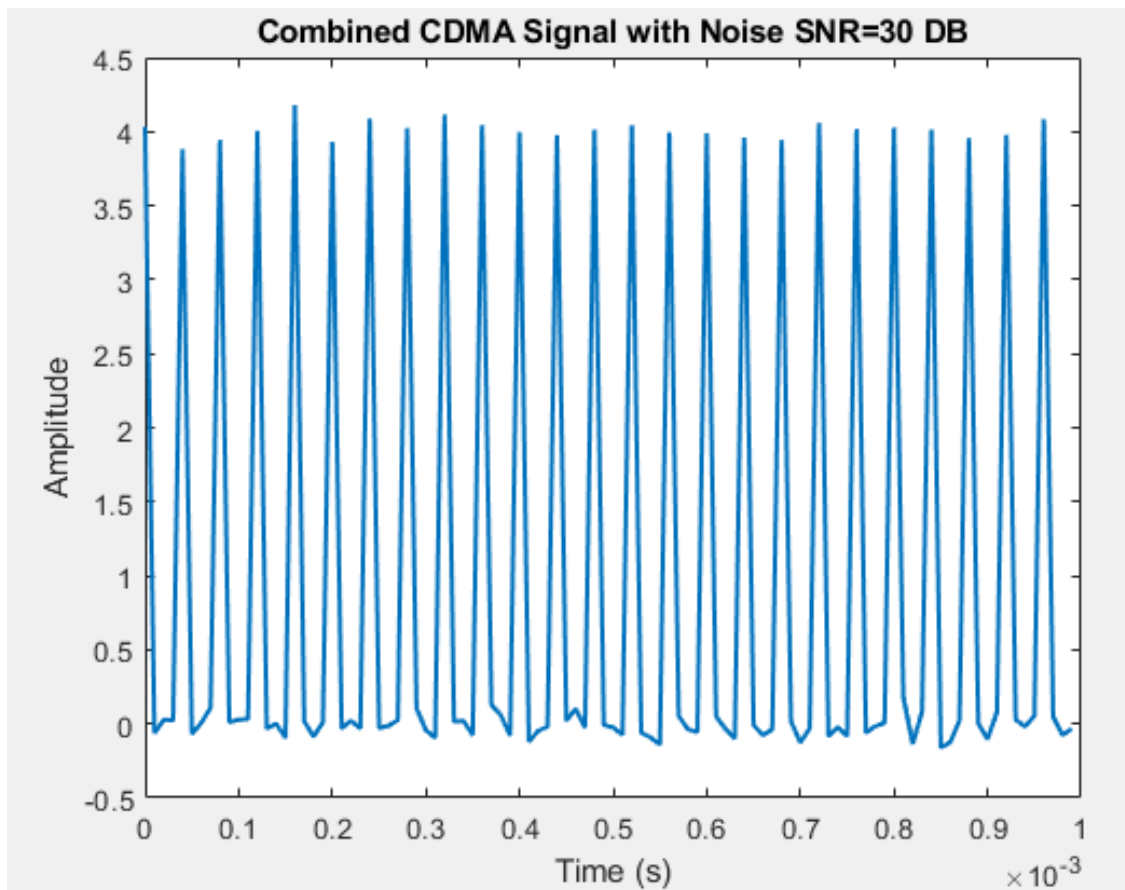
Slika 3.18: Korisnik 4 [izrada autora]

Rezultati za korisnika 4 su u skladu s očekivanjima, slično kao i za ostale korisnike. Na frekvenciji od 50 kHz, izvorni signal je jasno prikazao sinusni oblik. Nakon primjene Walsh-Hadamard koda '1 -1 -1 1', signal je proširen, što je vidljivo na grafu proširenog signala s karakterističnim modulacijskim uzorkom. Oporavljeni signal, prikazan na donjem grafu, vrlo je sličan izvornom signalu, što potvrđuje učinkovitost CDMA sustava u demodulaciji i povratku signala. Ova dosljednost među korisnicima potvrđuje pouzdanost CDMA sustava u očuvanju integriteta signala kroz različite faze obrade.



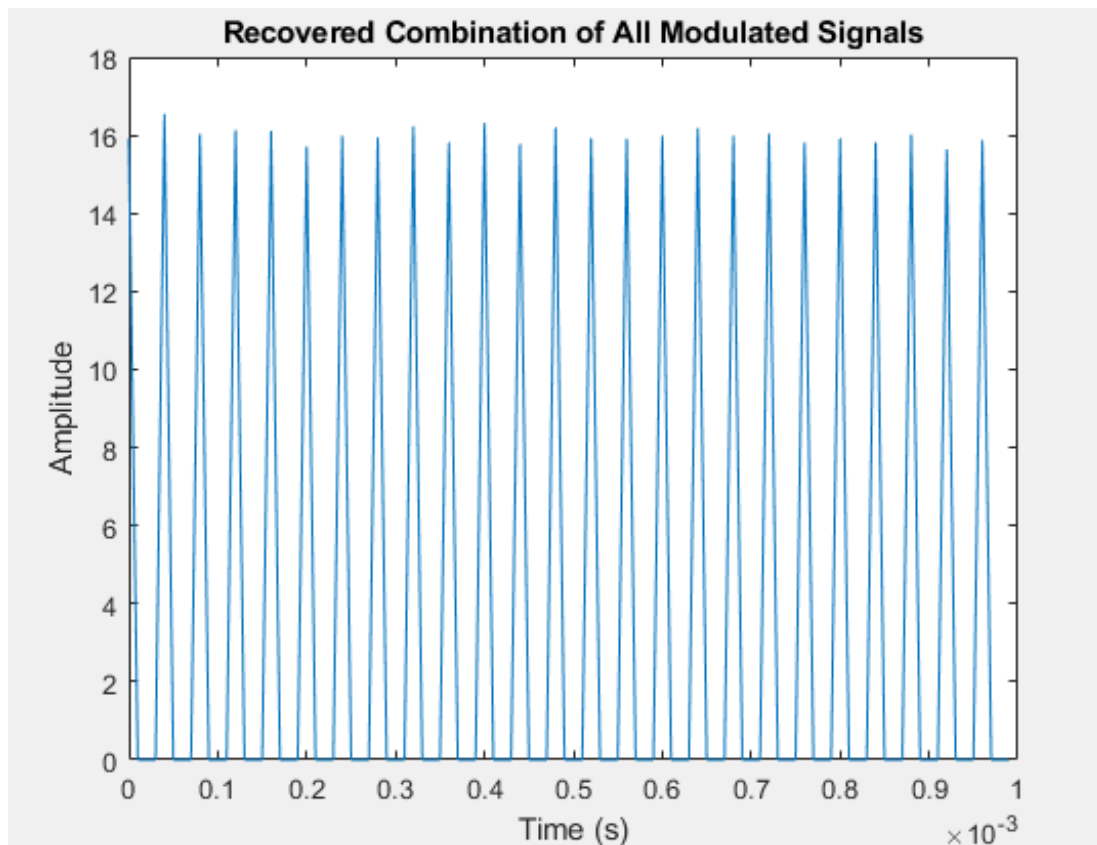
Slika 3.19: Usporedba frekvencijskog spektra za kombinirani CDMA signal prije i nakon izlaganja šumu [izrada autora]

Donja slika prikazuje usporedbu frekvencijskih spektara za kombinirani CDMA signal prije i nakon izlaganja šumu. Gornji graf prikazuje frekvencijski spektar kombiniranog CDMA signala bez prisustva šuma, s distinktnim vrhovima koji predstavljaju odabrane frekvencijske komponente signala svakog korisnika. Donji graf pokazuje isti spektar u uvjetima šuma sa SNR-om od 30 dB, gdje se primjećuje očuvanje frekvencijskih vrhova uprkos prisustvu šuma, što ukazuje na efikasnost CDMA tehnologije u očuvanju frekvencijske integriteta signala unatoč smetnjama.



Slika 3.20: Kombinirani CDMA signal sa šumom od 30 dB [izrada autora]

Na donjoj slici je prikazan kombinirani CDMA signal koji je superponiran s šumom, s omjerom signala i šuma (SNR) od 30 dB. Signal održava visoku amplitudu u usporedbi s šumom, što ukazuje na visoku razinu robustnosti i sposobnost sustava da održi kvalitetu signala unatoč prisutnosti šuma. Vrhovi signala su očuvani, a jasna razlika između signala i šuma olakšava procese demodulacije i dekodiranja u CDMA sustavu. Ova slika ilustrira kako CDMA tehnologija omogućuje pouzdanu transmisiju podataka čak i u uvjetima značajnih smetnji, čime se potvrđuje njena efikasnost u komunikacijskim mrežama.



Slika 3.21: Graf obnovljenih moduliranih signala [izrada autora]

Na donjoj slici vidimo obnovljenu kombinaciju svih moduliranih signala. Ovaj graf ilustrira uspješan proces oporavka više simultano moduliranih signala, gdje svaki vrh predstavlja određeni modulirani signal u kombinaciji. Velika amplituda i oštri vrhovi su indikatori jasne i visoke kvalitete signala koji su bili efikasno demodulirani i obnovljeni nakon prolaska kroz komunikacijski kanal. Ovaj graf demonstrira kako moderni komunikacijski sustavi mogu efikasno rukovati i oporavljati višestruke signale, što je ključno za održavanje kvalitete i integriteta prijenosa podataka u dinamičnim mrežnim okruženjima.

## 4. ZAKLJUČAK

Tijekom istraživanja i simulacija, TDMA, FDMA, i CDMA tehnike su demonstrirale svoje jedinstvene karakteristike i primjene u telekomunikacijskim sustavima. TDMA se ističe svojom efikasnošću u raspodjeli vremenskih intervala među korisnicima, omogućavajući precizno vremensko multiplexiranje bez interferencije. Međutim, ova tehnika može patiti od problema kašnjenja i sinkronizacije, posebno u visokoprometnim mrežama.

FDMA, s druge strane, pruža stalnu pristupnost kanalu kroz dodjelu odvojenih frekvencijskih pojasova, što minimizira rizik od kolizije signala. Iako je jednostavna za implementaciju, FDMA ne omogućava fleksibilnu alokaciju spektra, što može dovesti do neučinkovite upotrebe resursa u varijabilnim prometnim uvjetima.

CDMA je tehnika koja koristi širenje spektra te time omogućuje visoku razinu sigurnosti i otpornost na smetnje. Unatoč složenosti implementacije, CDMA nudi superiornu iskoristivost spektra i robustnost, što je čini izvrsnom za gusto naseljene mreže. Ipak, izazovi poput samointerferencije i složenosti upravljanja snagom su aspekti koji zahtijevaju dodatnu pažnju. Svaka od ovih tehnika ima svoje prednosti koje ih čine prikladnima za određene aplikacije, ali i mane koje mogu ograničiti njihovu upotrebu u specifičnim scenarijima. Odabir prave tehnologije pristupa ovisi o specifičnim zahtjevima mreže, broju korisnika, potrebi za širinom pojasa i toleranciji na šum. Kroz ove simulacije, jasno je da nijedan pristup nije univerzalno najbolji, već svaki nudi jedinstvene kompromise koji moraju biti pažljivo evaluirani pri dizajniranju efikasnih i otpornih komunikacijskih sistema.

## LITERATURA

1. Europska komisija: Priručnik o ulaganjima u širokopojasni pristup internetu, 2024., dostupno na: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/hr/library/broadband-investment-handbook>, pristupljeno: 22.8.2024.
2. Širokopojasni pristup internetu, dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=68073>, pristupljeno: 10.6.2023.
3. Medić, A.: LTE-mobilni širokopojasni pristup, InfoSys d.o.o., 2003.
4. Bežični širokopojasni pristupni sustav, dostupno na: [https://www.ericsson.hr/etk/revija/Br\\_1\\_2\\_2002/wireless.htm](https://www.ericsson.hr/etk/revija/Br_1_2_2002/wireless.htm), pristupljeno: 10.6.2023.
5. The history of the Internet, dostupno na: <https://www.plus.net/broadband/discover/history-of-the-internet/>, pristupljeno: 11.6.2023.
6. History of the internet: a timeline throughout the years, dostupno na: <https://www.uswitch.com/broadband/guides/broadband-history/>, pristupljeno: 11.6.2023.
7. Zašto 5G, dostupno na: <https://www.hakom.hr/hr/zasto-5g/384>, pristupljeno: 12.6.2023.
8. Slučajevi uporabe i tipovi usluga u mreži 5G, dostupno na: <https://www.5g.hr/tehnologija/slucajevi-uporabe-i-tipovi-usluga-u-mrezi-5g/>, pristupljeno: 12.6.2023.
9. Seo, J.; Jin, H. (2017) Stability region of p-persistent CSMA systems. IEEE Commun. Lett. 2017, 21, 652–655.
10. Time-division multiplexing (TDM), dostupno na: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/time-division-multiplexing-TDM>, pristupljeno: 15.6.2023.
11. Souvik, S., Choudhury, R. R., Nelakuditi, S.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Notification, article, 2011.
12. Schäffner, H.: Multiple Access Techniques for Wireless Communication, presentation, 2020.
13. TDMA, FDMA and CDMA, Telecomunicazioni Undergraduate course in Electrical Engineering University of Rome La Sapienza Rome, Italy, lecture 2, 2007.



14. Proakis, J.G., Salehi, M.: Digital Communication, McGraw-Hill, New York, 2008.
15. Maatouk, A.; Assaad, M.; Ephremides, A.: Energy-efficient and throughput optimal CSMA scheme. IEEE ACM Trans. Netw., 2019
16. Baek H., Lim J.: Time mirroring based CSMA/CA for improving the performance of UAV-relay network system. IEEE Syst. J., 2019.
17. FDM, dostupno na: <https://www.mpirical.com/glossary/fdm-frequency-division-multiplexing>, pristupljeno: 18.6.2023.
18. Frequency Division Multiplexing, dostupno na: <https://www.tutorialspoint.com/frequency-division-multiplexing>, pristupljeno: 18.6.2023.
19. Frequency Division Multiplexing: Overview & Applications, dostupno na: <https://study.com/learn/lesson/frequency-division-multiplexing-overview-examples.html>, pristupljeno: 18.6.2023.
20. Explain principle of FDM, <https://www.ques10.com/p/13896/explain-principle-of-fdm/>, pristupljeno: 18.6.2023.
21. What is the full form of CDMA, dostupno na: <https://www.javatpoint.com/cdma-full-form>, pristupljeno: 20.6.2023.
22. CDMA – Technology, dostupno na: [https://www.tutorialspoint.com/cdma/cdma\\_technology.htm](https://www.tutorialspoint.com/cdma/cdma_technology.htm), pristupljeno: 21.6.2023.
23. CDMA (Code-Division Multiple Access), dostupno na: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/CDMA-Code-Division-Multiple-Access>, pristupljeno: 21.6.2023.

## **SAŽETAK**

U radu je dan pregled različitih tehnika multipleksiranja u bežičnim komunikacijskim sustavima, s naglaskom na TDMA, FDMA i CDMA tehnologije. Analizirani su procesi modulacije, širenja i demodulacije signala, te je prikazan njihov utjecaj na kvalitetu i efikasnost komunikacije. Simulirani su različiti scenariji koji demonstriraju kako ove tehnike upravljaju šumom i interferencijom u realnim komunikacijskim kanalima. Rezultati simulacija daju uvid u njihovu primjenu u modernim telekomunikacijskim mrežama.

**Ključne riječi:** multipleksiranje, modulacija, demodulacija, TDMA, FDMA, CDMA, šum

## **ABSTRACT**

This paper provides an overview of various multiplexing techniques in wireless communication systems, focusing on TDMA, FDMA, and CDMA technologies. The processes of modulation, spreading, and demodulation of signals are analyzed, showcasing their impact on the quality and efficiency of communication. Various scenarios have been simulated to demonstrate how these techniques manage noise and interference in real communication channels. The results of the simulations offer insights into their application in modern telecommunication networks.

**Keywords:** multiplexing, modulation, demodulation, TDMA, FDMA, CDMA, noise

## **ŽIVOTOPIS**

Tomislav Martić rođen je 19. prosinca 1993. godine. Osnovnu školu "Vladimir Nazor" završio je u Čepinu, nakon čega upisuje Elektrotehničku i prometnu školu u Osijeku, smjer tehničar za mehatroniku. Studij informatike nastavlja na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija. Tijekom studija bavio se poslovima tehničke podrške te je radio kao Linux system administrator. Danas radi kao softverski inženjer u tvrtki Optiva, gdje se bavi tehnologijama koje su vezane za DevOps područje i planira se usavršavati u tom smjeru u daljnjoj karijeri.