

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Spec. Sci Naida Ćatović

**5G SERVISI BAZIRANI NA MASIVNIM
KOMUNIKACIJAMA MAŠINSKOG TIPA**

MASTER RAD

Podgorica, 2025. god.

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Spec. Sci Naida Ćatović

**5G SERVISI BAZIRANI NA MASIVNIM
KOMUNIKACIJAMA MAŠINSKOG TIPA**

MASTER RAD

Podgorica, 2025. god.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Naida Čatović, Spec. Sci
Datum i mjesto rođenja: 20.09.1997. u Podgorici
Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Elektronika, telekomunikacije i računari, 2019

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv postdiplomskog studija: Fakultet na kojem je rad odbranjen:
Naslov rada: Elektronika, Telekomunikacije i računari
“5G servisi bazirani na masivnim komunikacijama mašinskog tipa”

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 8.10.2025.
Datum sjednice Vijeća Univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 15.12.2025.
Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:
Prof. dr Zoran Veljović
Prof. dr Enis Kočan
Doc. dr Uglješa Urošević

Mentor:

Prof. dr Zoran Veljović

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Zoran Veljović

Prof. dr Enis Kočan

Doc. dr Uglješa Urošević

Komisija za odbranu rada:

Prof. dr Zoran Veljović

Prof. dr Enis Kočan

Prof. dr Uglješa Urošević

Datum odbrane:

20.03.2026.

Ime i prezime autora: Naida Čatović, Spec.Sci

E T I Č K A I Z J A V A

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom:

“5G servisi bazirani na masivnim komunikacijama mašinskog tipa”

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave

Naida Čatović, Spec. Sci

Naida Čatović

U Podgorici, dana 25.12.2025.

PREDGOVOR

Ovaj magistarski rad posvećujem svojoj porodici, koja mi je pružila безусловnu podršku tokom cijelog perioda studiranja. Posebno posvećujem ovaj rad uspomeni na mog preminulog brata Ernada, čiji me savjeti i dalje inspirišu da ustrajem u ostvarivanju svojih ciljeva.

Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr Zoranu Veljoviću, na nesebičnoj pomoći, stručnom vođenju i vrijednim savjetima tokom izrade ovog rada. Njegova podrška i ekspertiza bili su ključni za uspješan završetak ovog istraživanja.

Takođe, zahvaljujem se svim profesorima i kolegama koji su direktno ili indirektno doprinijeli mom akademskom razvoju i uspješnom završetku postdiplomskih studija.

REZIME

Razvoj 5G mreža donio je nove i izuzetno zahtjevne servise, među kojima masivne komunikacije mašinskog tipa (mMTC) imaju ključnu ulogu. Kao perspektivno rješenje nameću se neortogonalne tehnike višestrukog pristupa (NOMA), koje omogućavaju simultani prenos podataka više korisnika. Cilj ovog magistarskog rada je analiza i evaluacija NOMA tehnika u kontekstu mMTC scenarija, sa posebnim fokusom na NOMA sa raspodjelom u domenu snage, kao i njihovo poređenje sa OMA pristupima.

Metodologija istraživanja zasnovana je na kombinaciji teorijske analize i simulacionog modelovanja *downlink* NOMA mMTC sistema. Razvijen je matematički model koji opisuje prenos signala, raspodjelu snage i uticaj međukorisničke interferencije, pri čemu je primijenjena tehnika sukcesivnog dekodiranja. Simulacije su sprovedene za više scenarija, a posebna pažnja posvećena je analizi energetske efikasnosti kroz integraciju tehnika prikupljanja energije iz okoline (*energy harvesting*), koje imaju značajan potencijal u mMTC aplikacijama sa ograničenim energetskim resursima.

Dobijeni rezultati simulacija jasno pokazuju da NOMA sistemi ostvaruju superiorne performanse u odnosu na OMA sisteme, naročito u uslovima masivne konektivnosti. Zabilježena su značajna poboljšanja u spektralnoj efikasnosti i ukupnom informacionom kapacitetu, kao i veća pouzdanost prenosa i smanjeno kašnjenje. Analiza energetske efikasnosti potvrđuje da kombinacija NOMA tehnika i *energy harvesting* mehanizama omogućava efikasnije korišćenje energije i produžen radni vijek uređaja.

Glavni doprinos rada ogleda se u kvantifikaciji prednosti koje NOMA tehnike pružaju u odnosu na konvencionalne OMA pristupe, te u potvrdi da NOMA sa raspodjelom u domenu snage, u kombinaciji sa SIC tehnikom i prikupljanjem energije, predstavlja optimalno rješenje za realizaciju mMTC servisa u okviru 5G mreža.

Ključne riječi: 5G servisi, neortogonalne tehnike višestrukog pristupa, masivne komunikacije mašinskog tipa, spektralna efikasnost, energetska efikasnost

ABSTRACT

The development of 5G networks has brought new and extremely demanding services, among which massive Machine Type Communications (mMTC) play a crucial role. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) techniques emerge as a promising solution, enabling simultaneous data transmission for multiple users. The objective of this master's thesis is to analyze and evaluate NOMA techniques in the context of mMTC scenarios, with particular focus on power domain NOMA, as well as their comparison with OMA approaches.

The research methodology is based on a combination of theoretical analysis and simulation modeling of downlink NOMA mMTC systems. A mathematical model has been developed that describes signal transmission, power allocation, and the impact of inter-user interference, where the Successive Interference Cancellation technique is applied. Simulations were conducted for multiple scenarios, with special attention devoted to energy efficiency analysis through the integration of energy harvesting techniques, which have significant potential in mMTC applications with limited energy resources.

The obtained simulation results clearly demonstrate that NOMA systems achieve superior performance compared to OMA systems, particularly under conditions of massive connectivity. Significant improvements have been recorded in spectral efficiency and overall information capacity, as well as higher transmission reliability and reduced latency. Energy efficiency analysis confirms that the combination of NOMA techniques and energy harvesting mechanisms enables more efficient energy utilization and extended device lifetime.

The main contribution of this work is reflected in the quantification of gains that NOMA techniques provide compared to conventional OMA approaches, and in confirming that power domain NOMA, combined with SIC technique and energy harvesting, represents an optimal solution for the realization of mMTC services within 5G networks.

Keywords: 5G services, non-orthogonal multiple access techniques, massive machine type communications, spectral efficiency, energy efficiency

SADRŽAJ

Lista skraćenica.....	5
1. UVOD	13
2. 5G SERVISI.....	16
2.1. Pregled razvoja servisa kroz različite generacije mobilnih mreža	16
2.2. Zahtjevi koji se postavljaju pred tehnike višestrukog pristupa od strane različitih servisa	20
2.3. Servisi podržani od pete generacije mobilnih mreža	27
3. NEORTOGONALNE TEHNIKE VIŠESTRUKOG PRISTUPA ZA MASIVNE KOMUNIKACIJE MAŠINSKOG TIPA.....	36
3.1. Model NOMA sistema za masivne komunikacije mašinskog tipa	36
3.2. Masivna konektivnost mMTC NOMA sistema.....	37
3.3. Informacioni kapacitet i spektralna efikasnost u mMTC NOMA sistemima	41
3.4. Alokacija snage u mMTC NOMA sistemima.....	42
3.5. Pouzdanost mMTC NOMA sistema	44
3.6. Energetska efikasnost mMTC NOMA sistema.....	46
3.7. Kašnjenje u mMTC NOMA sistemu	49
4. ANALIZA QOS PARAMETARA NOMA SISTEMA KROZ SIMULACIJE.....	52
4.1. Masivna konektivnost.....	53
4.2. Informacioni kapacitet	55
4.3. Spektralna efikasnost	58
4.4. Raspodjela snage.....	60
4.5. Pouzdanost	62
4.6. Energetska efikasnost.....	66
4.7. Kašnjenje.....	68
5. ZAKLJUČAK	71
LITERATURA	73
PRILOZI.....	75

Lista skraćenica

1G	Prva generacija mobilnih mreža
5G	Peta generacija mobilnih mreža
NOMA	Non Orthogonal Multiple Access
mIoT	massive Internet of Things
mMTC	massive Machine Type Communication
OMA	Orthogonal Multiple Access
6G	Šesta generacija mobilnih mreža
sIoT	super Internet stvari
ITU-R	International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector
3GPP	3rd Generation Partnership Project
eMBB	enhanced Mobile Broadband
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communication
QoS	Quality of Service
SIC	Successive Interference Cancellation
RF	Radio Frequency
NMT	Nordic Mobile Telephony
FDMA	Frequency Division Multiple Access
2G	Druga generacija mobilnih mreža
GSM	Global System for Mobile Communications
SMS	Short Message Service
MMS	Multimedia Messaging Service

GPRS	General Packet Radio Service
TDMA	Time Division Multiple Access
3G	Treća generacija mobilnih mreža
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
CDMA	Code Division Multiple Access
MIMO	Multiple Input Multiple Output
4G	Četvrta generacija mobilnih mreža
LTE	Long Term Evolution
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
IP	Internet Protocol
HD	High Definition
GPS	Global Positioning System
IoT	Internet of Things
mMIMO	massive MIMO
NLOS	Non Line-of-Sight
ICI	Inter Carrier Interference
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
QoE	Quality of Experience
M2M	Machine to Machine
SC	Superposition Coding
CSIT	Channel State Information at Transmitter
CSI	Channel State Information
GF	Grant-free

MUI	Multi User Interference
UHD	Ultra High Definition
VR	Virtual Reality
AR	Augmented Reality
UMB	Ultra Mobile Broadband
AI	Artificial Intelligence
D2D	Device to Device
TTI	Transmission Time Interval
SCS	Subcarrier Spacing
MAC	Medium Access Control
BPSK	Binary Phase Shift Keying
MEC	Multi-access Edge Computing
SNR	Signal to Noise Ratio
SINR	Signal to Interference Plus Noise Ratio
OP	Outage Probability
BER	Bit Error Rate
TS	Time Switching
PS	Power Splitting
SWIPT	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
DF	Decode and Forward

1. UVOD

Proces digitalizacije snažno utiče na razvoj mobilnih mreža, koje postaju temelj savremene komunikacije i prenosa informacija. Razvoj mobilnih mreža kroz različite generacije bio je usmjeren na zadovoljavanje raznolikih zahtjeva korisnika. Taj evolutivni put mobilnih komunikacija obilježen je stalnim unapređenjima, kako u broju i vrsti omogućenih servisa, tako i u kvalitetu pruženih usluga koje se ogledaju u povećanju informacionog kapaciteta, energetske i spektralne efikasnosti, pouzdanosti i smanjenju kašnjenja. Napredak mobilnih komunikacija do pete generacije mobilnih mreža (5G) ogledao se u poboljšanjima kvaliteta prenosa govora, povećanju kapaciteta mreže u smislu povećanja broja korisnika i u povećanju brzine prenosa podataka. 5G stvara novo poglavlje u razvoju tehnika za višestruki pristup korisnika mreži. Inovativni doprinos ogleda se u uvođenju novih tehnika višestrukog pristupa koje su nazvane neortogonalne tehnike višestrukog pristupa, odnosno NOMA (*Non Orthogonal Multiple Access*) tehnike, koje omogućavaju simultano povezivanje velikog broja korisnika uz veću energetske i spektralnu efikasnost. Sa druge strane, arhitektura 5G sistema orijentisana je ka podršci širokom portfoliju servisa, od mIoT (*massive Internet of Things*) infrastrukture, kroz implementaciju *smart city* rješenja, do autonomnih automobila i robotskih sistema sa udaljenom kontrolom. ITU-R (*International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector*) identifikuje tri glavna pravca razvoja 5G servisa, a to su poboljšani širokopojasni pristup eMBB (*enhanced Mobile Broadband*), visoka pouzdanost komunikacija malog kašnjenja URLLC (*Ultra-Reliable Low Latency Communication*) i masivne komunikacije mašinskog tipa mMTC (*massive Machine Type Communication*). Ovi raznovrsni servisi zadovoljavaju specifične potrebe različitih aplikacija, pružajući poboljšane performanse u širokom spektru scenarija korišćenja. U tom kontekstu, fokus ovog rada je na istraživanju i analizi tehnika višestrukog pristupa i servisnih zahtjeva koji se postavljaju pred 5G i buduće mobilne mreže, sa posebnim naglaskom na masivne komunikacije mašinskog tipa, [1]-[2].

Nakon ovog Uvoda, u drugom poglavlju rada pažnja je posvećena razvoju servisa kroz različite generacije mobilnih mreža, koji su oblikovali put ka naprednim mobilnim tehnologijama, posebno se osvrćući na 5G. Fokus istraživanja su različite tehnike višestrukog pristupa, OMA (*Orthogonal Multiple Access*) i NOMA tehnike, njihove prednosti i nedostaci u konkretnim primjenama, kao i mogućnost njihove koegzistencije. Analizom ovih tehnika predstavljeni su važni aspekti u

shvatanju potrebe za optimalnom raspodjelom ograničenih radiofrekvencijskih resursa i povećanjem kapaciteta mobilnih mreža. OMA tehnike su korišćene u mobilnim mrežama prije 5G i zasnovane su na principu razdvajanja korisnika kroz frekvencijski, vremenski ili kodni domen. Međutim, tokom razvoja četvrte generacije (4G) mobilnih mreža, identifikovani su novi izazovi koji zahtijevaju inovativne pristupe. Odgovor na te izazove je koncept neortogonalnog multipleksiranja u domenu snage, kao osnove za razvoj moderne radio-pristupne mreže. Ovaj koncept nudi potencijalno rješenje koje omogućava efikasniji spektralni iskorak u prilagođavanju dinamičnim zahtjevima korisnika u raznim aspektima. Unaprjeđenje ovih tehnika postavlja temelje za ispunjenje servisnih zahtjeva 5G i budućih mobilnih mreža, tako obezbjeđujući bolje korisničko iskustvo, visoku propusnost i nisko kašnjenje u raznolikim scenarijima korišćenja.

Već u sljedećem poglavlju fokus je stavljen na neortogonalne tehnike višestrukog pristupa sa raspodjelom u domenu snage i na njihovu primjenu u masivnim komunikacijama mašinskog tipa. Kroz ovo poglavlje, cilj je pružiti sveobuhvatno razumijevanje uticaja NOMA tehnika na performanse 5G mreža sa specifičnim naglaskom na mMTC. Analizirani su QoS (*Quality of Service*) parametri jednog takvog sistema uključujući kašnjenje, spektralnu i energetske efikasnost, kapacitet mreže u smislu broja korisnika koji može biti opslužen, teorijski informacioni kapacitet, pouzdanost sistema uz sprovođenje detaljne komparacije sa OMA tehnikama. Analizom modela *downlink* NOMA mMTC sistema biće ilustrovane ključne karakteristike NOMA tehnika, pružen uvid u njihove prednosti za masivne komunikacije i identifikovani specifični scenariji u kojima ove tehnike postižu najbolje performanse. Cilj jeste razumijevanje kako NOMA sistem efikasno može zadovoljiti 5G servisne zahtjeve u odnosu na tehnike prethodnih generacija. Analiziraće se kapacitet NOMA sistema za masivne komunikacije mašinskog tipa, posebno fokusirajući se na broj korisnika koji sistem može opslužiti u jednom resursnom bloku. Uvođenjem tehnike sukcesivnog dekodiranja SIC (*Successive Interference Cancellation*), koja omogućava efikasno upravljanje interferencijom, biće pokazano kako NOMA sistem pruža simultani prenos podataka za više korisnika, čime se značajno povećava kapacitet sistema, ali se stvaraju i određeni izazovi. Takođe, biće demonstrirana poboljšanja koja NOMA sistemi donose u kontekstu pouzdanosti, informacionog kapaciteta i spektralne efikasnosti u mMTC scenariju. Pored toga, jedan od ključnih zahtjeva uređaja u mMTC scenariju je energetska efikasnost, koja postaje presudna u uslovima ograničenih resursa i potrebe za dugotrajnim autonomnim radom uređaja. Ovaj rad fokusira se na energetske efikasnost u kontekstu mMTC NOMA sistema, istražujući

rješenja koja se temelje na RF (*Radio Frequency*) uređajima za prikupljanje energije iz okoline, [3]-[4].

U posljednjem poglavlju su dati rezultati simulacija koje su izvedene kako bi se detaljno ispitale performanse NOMA sistema i njihova poboljšanja u odnosu na OMA sisteme. Cilj simulacija je da se procijeni uticaj najvažnijih parametara na performanse komunikacionih sistema i na koji način zadovoljavaju 5G servisne zahtjeve, uključujući:

- **Masivnu konektivnost**, gdje je analizirano kako povećanje broja korisnika utiče na ukupni informacioni kapacitet mMTC NOMA sistema i performanse pojedinačnih korisnika;
- **Informacioni kapacitet**, gdje je ispitivan uticaj različitih nivoa predajne snage na informacioni kapacitet u NOMA i OMA sistemima;
- **Alokaciju snage**, gdje su analizirane različite strategije alokacije snage korisnicima, kako bi se utvrdilo koje metode pružaju optimalne performanse;
- **Spektralnu efikasnost**, gdje je utvrđen stepen efikasnosti korišćenja dostupnog spektra za prenos podataka u NOMA i OMA sistemima;
- **BER (*Bit Error Rate*)**, gdje je analizirana učestanost grešaka pri prenosu bita, što je ključni pokazatelj pouzdanosti sistema;
- **Energetsku efikasnost**, pri čemu je proučavana efikasnost korišćenja energije u prenosu podataka, što je posebno važno za uređaje sa ograničenim resursima;
- **Kašnjenje**, gdje je razmatrano vrijeme potrebno za prenos podataka između korisnika, što je ključno za aplikacije koje zahtijevaju realno-vremenske performanse.

Analizom ovih parametara mogu se bolje razumjeti prednosti i nedostaci NOMA tehnika u odnosu na OMA sisteme, što će pomoći u optimizaciji i dizajnu naprednih bežičnih mreža. Cilj je da se identifikuju scenariji u kojima NOMA pruža značajne prednosti u odnosu na OMA, kao i da se razumiju uslovi pod kojima se mogu dodatno povećati performanse oba sistema i time zadovoljiti većina 5G servisnih zahtjeva. Na kraju, rezultati simulacija pružaju vrijedne zaključke u pogledu mogućnosti poboljšanja kapaciteta, efikasnosti i pouzdanosti budućih komunikacionih tehnologija. Očekuje se da će ove simulacije doprinijeti razvoju strategija za optimalnu alokaciju resursa, poboljšanje korisničkog iskustva i zadovoljavanje rastućih potreba za brzim i pouzdanim bežičnim komunikacijama.

2. 5G SERVISI

2.1. Pregled razvoja servisa kroz različite generacije mobilnih mreža

Ubrzani razvoj tehnologije u posljednjih nekoliko godina doveo je do promjena u ponašanju krajnjih korisnika, što je uticalo na definisanje novih servisnih zahtjeva koji se postavljaju pred mobilne mreže, kako u pogledu pouzdanosti, tako i u pogledu informacionog kapaciteta i kašnjenja, a na koje treba da odgovori telekomunikaciona industrija. Svaka generacija mobilnih mreža svojom pojavom donosi nove mogućnosti za korisničke zahtjeve u datom periodu i određeni napredak u odnosu na prethodne generacije u pogledu ponude i kvaliteta servisa.

U Tabeli 2.1 je dat pregled razvoja mobilnih mreža u pogledu mogućnosti pružanja servisa za datu generaciju i osnovnih parametara koji opisuju QoS, [2]. Podaci u tabeli zasnovani su na ITU-R preporukama i specifikacijama 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) standarda. Prvenstveno se tretira informacioni kapacitet. U ovom slučaju riječ je o teorijskom informacionom kapacitetu koji predstavlja maksimalnu količinu informacija koja se može prenijeti kroz komunikacioni kanal u datom vremenskom periodu. U poređenju sa informacionim kapacitetom data je brzina prenosa podataka, koja predstavlja količinu podataka koja se može prenijeti u realnim uslovima kroz komunikacioni kanal u jedinici vremena. Brzina prenosa je ograničena uslovima na kanalu kao što su šum, interferencija i gustina saobraćaja. Dalje se tretira pouzdanost kao sposobnost komunikacionog sistema da obezbijedi stabilan i ispravan prenos podataka sa minimalnim gubicima i greškama u prenosu, kao i kašnjenje koje se odnosi na prenosno kašnjenje i predstavlja vrijeme koje je potrebno da se podaci fizički prenesu od pošiljaoca do primaoca kroz komunikacioni kanal. Pored toga, svaku generaciju mobilnih komunikacionih mreža karakteriše i određena tehnika višestrukog pristupa korisnika, prilagođena zahtjevima koji se postavljaju pred mrežu, što je takođe prikazano u navedenoj Tabeli.

Tabela 2.1. Pregled karakteristika mobilnih mreža kroz generacije

	1G	2G	3G	4G	5G
Tehnika višestrukog pristupa	<i>FDMA</i>	<i>TDMA</i>	<i>CDMA</i>	<i>OFDMA</i>	<i>NOMA</i>
Informacioni kapacitet (teorijski)	2,4 kb/s*	64 kb/s	42 Mb/s	1 Gb/s	20 Gb/s
Brzina prenosa podataka (u realnim uslovima)	2,4 kb/s*	9,6-14,4 kb/s	384 kb/s - 7,2 Mb/s	10 - 100 Mb/s	100 Mb/s - 10 Gb/s
Širina kanala	25 kHz	200 kHz	5 MHz	20 MHz	do 400 MHz
Pouzdanost	Niska* (60-70%)	Srednja (80-90%)	Visoka (95-98%)	veoma visoka (99-99,9%)	Ultra visoka (99,999%)
Kašnjenje	>1000 ms*	300-800 ms	100-500 ms	30-50 ms	<1 ms
Ponuda Servisa	Prenos analognog govora	SMS, MMS, GPRS, jednostavne igrice	Pristup internet mreži, <i>email</i> , <i>streaming</i>	HD video, <i>gaming</i> , <i>cloud</i> servisi	mIoT, pametni gradovi, autonomna vozila, AR/VR

*Za 1G (analogni sistem), navedene vrijednosti za informacioni kapacitet, brzinu prenosa i kašnjenje odnose se na kontrolni kanal, jer 1G koristi analogni prenos govora za komunikaciju.

Mobilne komunikacione mreže prve generacije omogućile su korisnicima upotrebu prvih mobilnih telefona za analogni prenos govora u okviru jednog administrativnog područja. Među standardima ove generacije ističe se NMT (*Nordic Mobile Telephony*). NMT funkcioniše koristeći analogne radio signale u frekvencijskom opsegu između 450MHz i 900MHz, što je obezbijedilo analognu govornu komunikaciju, a za višestruki pristup korišćena je FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) tehnika. U analognom prenosu, širina frekvencijskog kanala direktno određuje kvalitet prijema signala. U NMT standardu, svaki kanal ima širinu od 25kHz. Brzina prenosa podataka preko kontrolnog kanala je izuzetno niska i dostiže samo 2,4kb/s, dok sistem raspolaže sa 180 kanala kojima se pristupa na ekskluzivnoj osnovi. Ključna prednost standarda prve generacije leži u jednostavnosti mrežnih elemenata, dok su glavni nedostaci posljedica analogne prirode sistema.

Druga generacija mobilnih mreža najčešće je reprezentovana kroz GSM (*Global System for Mobile Communications*) standard. GSM se ističe značajnim unapređenjem kvaliteta govora, kapaciteta i pouzdanosti poziva, uz digitalni način prenosa informacija. Sistem koristi opsege na frekvencijama od 900MHz i 1800MHz, sa brzinom prenosa podataka između 9,6-14,4kb/s i informacionim kapacitetom oko 64kb/s, dok je kašnjenje drastično smanjeno u odnosu na prethodnu generaciju. Među servisima koje donosi 2G tehnologija nalaze se SMS (*Short Message Service*) za slanje tekstualnih poruka, MMS (*Multimedia Messaging Service*) za multimedijalne poruke i GPRS (*General Packet Radio Service*) koji omogućava internet konekciju primjenom paketske komutacije. Arhitektura mreže omogućava da više korisnika koristi frekvencijske kanale dodijeljene putem FDMA pristupa, zahvaljujući implementaciji TDMA (*Time Division Multiple Access*) vremenskog multipleksiranja. Zapravo, radi se o kombinovanoj FDMA/TDMA tehnici za višekorisnički pristup. Primarna ograničenja 2G mreža ogledaju se u niskoj brzini prenosa podataka i dizajnu arhitekture fokusiranom na digitalni govorni prenos.

Treća generacija mobilnih mreža (3G) nastala je kao odgovor na zahtjeve za većim kapacitetom, bržim prenosom podataka i komunikacijom kroz raznovrsne tipove poruka na pametnim uređajima. Kao vodeći standard ističe se UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), koji u osnovnoj verziji obezbjeđuje brzine od 384kb/s do 2Mb/s po korisniku, dok napredne varijante postižu i bolje performanse. Frekvencijski opseg opredijeljen za 3G sisteme je između 1900MHz i 2200MHz, informacioni kapacitet dostiže do 42Mb/s, uz dodatno smanjeno kašnjenje. CDMA (*Code Division Multiple Access*) tehnika omogućava višestruki pristup mreži. Usluge dostupne preko 3G platforme uključuju *streaming* servise, integrisanu podršku za govor, podatke, slike i video sadržaj ograničene rezolucije, spajanje mobilnih i fiksnih servisa za multimedijalnu razmjenu (u okviru dostupnih kapaciteta), korišćenje aplikacija na pametnim uređajima i globalni *roaming* sa povećanom stabilnošću. Visoki inicijalni troškovi za korišćenje frekvencijskih opsega i nedovoljna energetska efikasnost predstavljali su ključne izazove pri uvođenju standarda treće generacije.

Internet servisi su izazvali veliku zainteresovanost među krajnjim korisnicima tokom razvoja mreža druge i treće generacije što je dovelo do povećanih servisnih zahtjeva koji se prije svega

ogledaju u zahtjevima za povećanjem kapaciteta mreže. To je pokrenulo razvoj četvrte generacije mobilnih mreža. Odgovor na te zahtjeve 4G je dala primjenom inovativnih tehnologija u radio pristupnoj mreži, kao što su MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) tehnologije koje koriste više antena za predaju i prijem, uz bolje korišćenje radio resursa, manje kašnjenje i veće brzine prenosa podataka. LTE (*Long Term Evolution*) je postao globalni 4G standard. LTE koristi raznovrsne globalno harmonizovane frekvencijske opsege: od opsega digitalne dividende (800MHz) dobijenih oslobađanjem opsega prelaskom sa analogne na digitalnu TV difuziju, opsege namijenjene prvobitno 2G standardima (900MHz, 1800MHz), 3G opsege (2100MHz) i opsege na 2600MHz, omogućavajući optimizaciju propagacionih karakteristika signala prema lokaciji korisnika i povećanje informacionog kapaciteta sistema. 4G mreže obezbjeđuju korisnicima brzine prenosa podataka do 1Gb/s, uz značajno smanjenje kašnjenja. Zasnivaju se na primjeni OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) metode za višestruki pristup mreži. Ortogonalni odnos između podnosilaca čini ključnu karakteristiku ove tehnike, što direktno doprinosi povećanju informacionog kapaciteta i spektralne efikasnosti. Dodatno unapređenje ostvareno ovakvim pristupom korisnika ogleda se u rezistenciji na uskopojasnu interferenciju, što je naročito važno u urbanim područjima sa intenzivnim saobraćajem i velikim brojem korisnika. Novi servisi koje 4G isporučuje krajnjim korisnicima su HD (*High Definition*) streaming, interaktivne korisničke usluge sa kontinuiranim prenosom podataka poput GPS (*Global Positioning System*) navigacije, globalni *roaming*, IP protokol za prenos govora, video zapisa i poruka. Glavni izazov u implementaciji standarda četvrte generacije bile su visoke početne cijene frekvencijskih opsega, [5]. Osim toga, važno je napomenuti da ove mreže nisu projektovane, a samim tim ni optimizovane, za IoT servise.

Iz svega prethodno navedenog proizilazi, da se u opisanom razdoblju razvoja mobilnih mreža, težilo da krajnji korisnik bude u centru komunikacije i da brzine prenosa podataka budu što veće. Daljom evolucijom mobilnih mreža fokus je usmjeren na ponudu servisa za raznolike krajnje korisnike. Mobilna mreža pete generacije nudi širok spektar servisa koji se odnose na mIoT, pametne gradove, autonomna vozila, daljinsku robotiku i mnoge druge koji će biti opisani u nastavku rada. Glavni zahtjevi ovih servisa uključuju povećanje brzine prenosa podataka čak i pri visokoj mobilnosti, povećanje kapaciteta mreže, smanjenje kašnjenja i uštedu energije. To je omogućeno, između ostalog, novim tehnikama višestrukog pristupa koje koriste 5G mreže.

Zahvaljujući NOMA tehnikama višestrukog pristupa 5G zadovoljava postavljene zahtjeve omogućavanjem masivne konektivnosti uz bolju spektralnu i energetska efikasnost uz niže kašnjenje. Povećanje brzina prenosa podataka postiže se korišćenjem opsega viših frekvencija, uključujući milimetarske talase (opsege na 26GHz, a potencijalno i na 40GHz i 66GHz). Više frekvencije omogućavaju veći kapacitet prenosa informacija u odnosu na niže, ali su istovremeno osjetljivije na interferenciju i imaju znatno veće propagaciono slabljenje. Pored navedenog, za implementaciju 5G mreža značajan je i spektar ispod 6GHz (700MHz, 800MHz, 900MHz, 1800MHz, 2100MHz, 2600MHz, 3600MHz) koji omogućava dobru pokrivenost. Glavne karakteristike 5G mreža mogu se sažeti u sljedećem, [4]:

- Bolja pokrivenost i veće brzine prenosa podataka, do 10Gb/s;
- Brzina prenosa podataka u slučaju mobilnosti korisnika oko 1Gb/s;
- Omogućavanje servisa u slučaju mobilnosti krajnjih korisnika i do 500km/h;
- Veća spektralna efikasnost u odnosu na 4G;
- Veća energetska efikasnost;
- Povećana pouzdanost usluge od 99,999 %;
- Ukupno vrijeme kašnjenja od 1ms;
- Sposobnost opsluživanja velikog broja korisnika – masivna konektivnost;
- Mogućnost raspodjele podataka prilikom slanja i primanja kroz dva različita komunikaciona kanala, odnosno dvije različite pristupne mreže;
- Primjena masivne MIMO (mMIMO - *massive* MIMO) tehnologije koja uključuje prostorno multipleksiranje radio signala putem većeg broja prijemnih i predajnih antena čime se postiže veći kapacitet mreže.

2.2. Zahtjevi koji se postavljaju pred tehnike višestrukog pristupa od strane različitih servisa

Kako raznovrsnost ponude servisa raste kroz razvoj novih generacija mobilnih mreža, tako se povećava broj krajnjih korisnika koji žele pristupiti mreži, pa tako raste i potreba za sistemima većeg kapaciteta. Iz toga proizilazi novi izazov koji se postavlja pred mobilnim radio sistemima, a to je raspodjela raspoloživih resursa koje je potrebno iskoristiti na najbolji mogući način zbog činjenice da je to ograničeni prirodni resurs. Kroz generacije mobilnih mreža, korišćene su različite

tehnike višestrukog pristupa, kako bi se postigao što bolji kvalitet servisa prema što većem broju korisnika. Tehnike koje su korišćene do 5G mreža su nazvane ortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa jer su koncipirane tako da ne dolazi do interferencije između korisnika koja je posljedica samog postupka multipleksiranja. Razvoj mobilnih mreža počeo je sa jednostavnim frekvencijskim višestrukim pristupom (FDMA), zatim su uvedene naprednije tehnike vremenskog višestrukog pristupa (TDMA) i kodnog višestrukog pristupa (CDMA), a dolaskom 4G mreža uveden je ortogonalni frekvencijski višestruki pristup (OFDMA). 5G uvodi novi princip multipleksiranja zasnovan na neortogonalnosti i novu tehniku nazvanu NOMA. U daljem tekstu biće detaljnije analizirane pomenute tehnike uz jasno istaknute njihove ključne prednosti i nedostatke.

2.2.1. Ortogonalne tehnike višestrukog pristupa

FDMA omogućava istovremeni pristup više korisnika dodjeljivanjem različitih frekvencijskih kanala, što je pogodno za prenos analognog govora. To uzrokuje smanjenje spektralne efikasnosti i unaprijed ograničava broj podržanih korisnika. Glavni problem u radio sistemima koji koriste FDMA tehniku je preslušavanje usljed međukanalne interferencije. TDMA omogućava višestruki pristup dodjeljivanjem vremenskih intervala odnosno slotova korisnicima na istom frekvencijskom kanalu. Efikasnije koristi spektralni prostor u poređenju sa FDMA i pogodan je za digitalne govorne i servise podataka, ali broj podržanih korisnika je i dalje ograničen zbog osnovnog principa multipleksiranja. Nasuprot ovim tehnikama, CDMA omogućava višestruki pristup korišćenjem jedinstvenih kodova za svakog korisnika na istom frekvencijskom spektru. Pruža veću spektralnu efikasnost i veći kapacitet, a pored toga je otporan na uskopojasnu interferenciju. Međutim, zbog visoke složenosti zahtijeva napredne algoritme za dekodiranje i preciznu sinhronizaciju, naročito sa povećanjem broja korisnika. OFDMA omogućava višestruki pristup dodjeljivanjem ortogonalnih frekvencijskih podnosilaca korisnicima. Pogodan je za visoke brzine prenosa podataka, multimedijalne servise i aplikacije koje zahtijevaju nisko kašnjenje. Ipak, zbog složenosti zahtijeva napredne tehnike upravljanja resursima i efikasne algoritme za sinhronizaciju i dekodiranje. OFDMA tehnike omogućavaju povećanje pokrivenosti signalom, bolju spektralnu efikasnost zbog mogućnosti preklapanja opsega podnosioca, veću otpornost na frekvencijski selektivni fading koja se ostvaruje podjelom kanala na više uskopojasnih potkanala sa ravnom

frekvencijskom karakteristikom i bolje parametre u NLOS (*Non Line-of-Sight*) uslovima koji se često susreću u urbanim sredinama. Glavni nedostatak OFDMA sistema je osjetljivost na širenje signala u frekvencijskom domenu i fazni šum. To narušava ortogonalnost među podnosiocima i stvara ICI (*Inter Carrier Interference*) interferenciju. Ovo su glavni faktori koji ograničavaju povećanje brzine prenosa podataka i smanjuju širinu OFDM podkanala. Sa druge strane, OFDMA sistemi suočavaju se sa problemom povišenog PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) parametra. Naime, signal sadrži dijelove sa ekstremno visokim vrijednostima trenutne snage i naglim promjenama amplitude. Takve osobine signala vode ka saturaciji analogno-digitalnih konvertorskih sklopova pri formiranju podnosilačkih komponenti, dok u transmissionim pojačavačima izazivaju nelinearno ponašanje koje generiše intermodulacione distorzijske efekte.

Glavna ograničenja prethodno opisanih ortogonalnih tehnika proizilaze iz ograničenih ortogonalnih resursa. OMA sistemi uglavnom mogu istovremeno da opslužuju nekoliko stotina korisnika po baznoj stanici. Naime, 2G i 3G mreže nemaju mogućnosti za ispunjenje postavljenih zahtjeva, dok 4G mobilni sistemi s obzirom na svoju infrastrukturu, mobilnost i implementirane sigurnosne mehanizme imaju određene mogućnosti. To se naročito odnosi na napredne LTE sisteme koji imaju znatno veće kapacitete i fleksibilnije upravljanje raspoloživim radio resursima. Uprkos tome, ni 4G mreže ne mogu u potpunosti odgovoriti na sve zahtjeve imajući u vidu rast broja uređaja i njihove servisne zahtjeve. Stalno povećanje broja uređaja po ćeliji, sa proporcionalno manjim intenzitetom saobraćaja, predstavlja jedan od izazova u M2M (*Machine to Machine*) komunikacijama. M2M scenariji pokazuju da saobraćaj može biti stohastičke prirode, generisan slučajnim promjenama stanja sistema ili periodičan, generisan u određenim vremenskim intervalima. Ovakav tip saobraćaja zahtijeva uslugu u realnom vremenu i uglavnom zauzima *uplink* resurse. Primijetan je uticaj povećanja broja M2M uređaja koji se odražava na performanse i QoS OFDMA sistema. U slučaju prenosa govora i video sadržaja ovaj uticaj je manje izražen, dok se kod prenosa podataka degradacija dešava u pogledu kašnjenja koji predstavlja veoma važan parametar za 5G mreže. Još jedan izazov predstavlja koegzistencija M2M saobraćaja sa trenutnim korisničkim saobraćajem. Obzirom na sve navedeno, predložen je novi koncept razdvajanja korisnika kako bi se ispunili postavljeni servisni zahtjevi. Ovaj novi koncept se zasniva na neortogonalnosti između podnosilaca čime se prevazilaze ograničenja vezana za ortogonalne

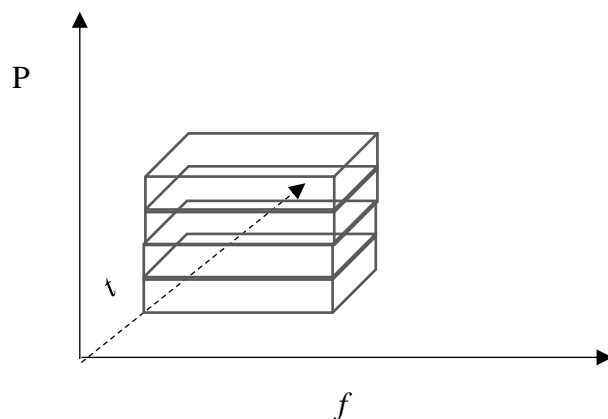
resurse, zbog čega se i tehnike višestrukog pristupa nazivaju neortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa NOMA, [1].

2.2.2. Neortogonalne tehnike višestrukog pristupa

Primarni cilj 5G mreže je pružiti jednako korisničko iskustvo QoE (*Quality of Experience*) svim korisnicima bez obzira na njihovu lokaciju. Postoji mnogo scenarija gdje to ne može biti ostvareno pomoću ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa. Jedan primjer takvih scenarija je širokopolasni pristup u gusto naseljenim područjima. Problem nastaje kada veliki broj ljudi pokušava u isto vrijeme da pristupi mobilnoj mreži što uzrokuje zagušenje i smanjenje QoS. Drugi primjer su područja sa slabom pokrivenošću kao što su ruralna područja gdje treba osigurati stabilnu komunikaciju. Takođe, potrebno je omogućiti pristup servisima nezavisno od brzine kretanja. Servisi zahtijevaju da veliki broj uređaja bude povezan na mrežu uz veću pokrivenost, slanje podataka većom brzinom uz minimalno kašnjenje i minimalnu potrošnju energije, [5]. Glavni servisni zahtjevi koji su postavljeni pred petu generaciju mobilnih mreža se mogu sažeti u sljedeće:

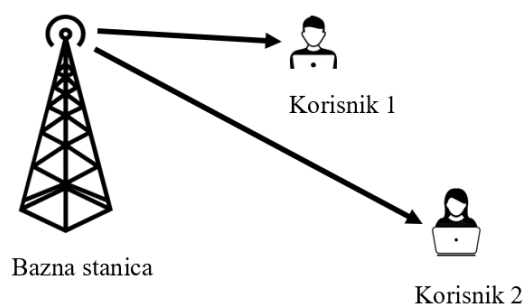
- Maksimalna brzina prenosa podataka od 10 do 20 Gb/s;
- Prosječne brzine prenosa podataka 1Gb/s;
- Gustina saobraćaja (informacioni kapacitet po površini) 10 Mb/s/m²;
- Kašnjenje do 1 ms;
- Podržana mobilnost korisnika do 500km/h;
- Gustina povezanosti do 10⁶ uređaja po km²;
- Spektralna efikasnost tri puta veća od 4G;
- Energetska efikasnost sto puta veća od 4G.

Za ispunjenje navedenih servisnih zahtjeva 5G koristi NOMA tehnike. Neortogonalne tehnike višestrukog pristupa omogućavaju istovremeni prenos podataka korišćenjem istih vremenskih, frekvencijskih ili kodnih resursa pomoću multipleksiranja u domenu snage. Na taj način se ostvaruje bolja spektralna efikasnost sistema i pri tome je moguće opslužiti neuporedivo veći broj korisnika u odnosu na sisteme sa ortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa. Na Slici 2.1 prikazan je navedeni koncept razdvajanja korisnika kod neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa, pri čemu P predstavlja predajnu snagu, f frekvencijski spektar, a t vremenski interval.



Slika 2.1. Koncept razdvajanja korisnika kod neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa

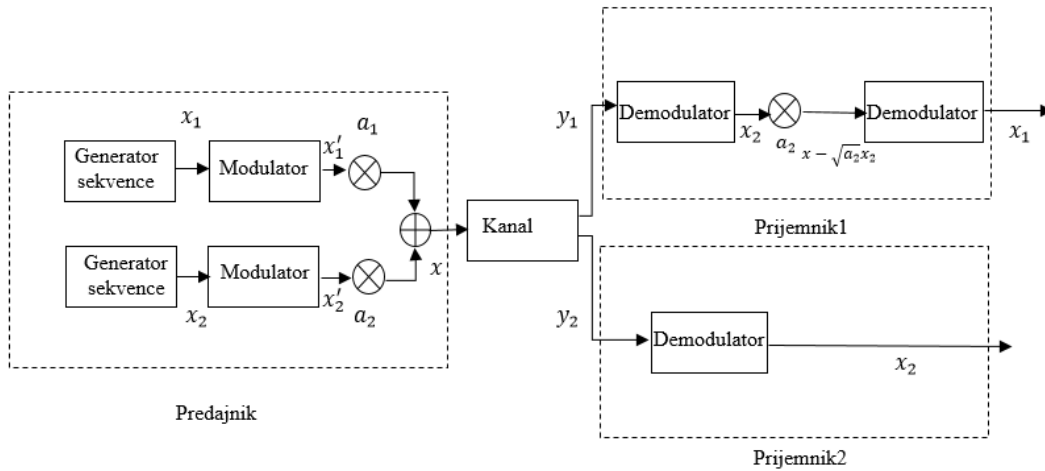
Multipleksiranje u domenu snage kod NOMA sistema održava balans između spektralne efikasnosti i postizanja odgovarajućih informacionih kapaciteta između korisnika, da bi se ostvario zahtijevani QoS. Simultani prenos podataka se ostvaruje tehnikom superpozicijskog kodiranja SC (*Superposition Coding*) signala na strani predaje, dok se razdvajanje signala na strani prijema obavlja pomoću tehnike sukcesivnog poništavanja interferencije koja vrši suzbijanje interferencije na prijemu. Na Slici 2.2 je dat primjer *downlink* NOMA sistema na kojem će biti pokazan koncept razdvajanja korisnika.



Slika 2.2. Downlink NOMA sistem sa dva korisnika

Prikazan je *downlink* NOMA sistem sa dva korisnika, pri čemu bazna stanica poznaje stanje na kanalu oba korisnika, odnosno dat je CSIT (*Channel State Information at Transmitter*) scenario. Pretpostavka je da korisnik 1 koji je bliži baznoj stanici ima bolje karakteristike kanala CSI (*Channel State Information*) u odnosu na korisnika 2 koji je udaljeniji od bazne stanice. Ova dva

korisnika koriste istovremeno isti blok vremensko-frekvencijskih resursa. Na Slici 2.3 dat je princip funkcionisanja ovakvog sistema od predajnika do prijemnika u scenariju sa Slike 2.2.



Slika 2.3. Princip funkcionisanja downlink NOMA sistema sa dva korisnika

U predajniku se obavlja generisanje podataka za prenos za oba korisnika, x_1 i x_2 . Zatim se obavlja modulacija generisanog digitalnog signala i dobijaju se modulirani signali x'_1 i x'_2 . Poslije modulacije se obavlja raspodjela snage pomoću koeficijenata snage a_1 i a_2 koji se biraju različitim metodama. Nakon toga se obavlja superpozicija signala odnosno signali se sabiraju i propuštaju kroz komunikacioni kanal do korisnika. Superpozicijski signal koji se šalje kroz kanal je dat izrazom (2.1), pri čemu je P predajna snaga. Komunikacioni kanal je opisan impulsnim odzivima kanala h_1 i h_2 , [6].

$$x = \sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1h_1 + \sqrt{a_2}x_2h_2) \quad (2.1)$$

Raspodjela snage se može obaviti na više načina. Jednostavniji način raspodjele snage je fiksna raspodjela koeficijenata snage koja ne zahtijeva kompleksna izračunavanja. Kod fiksne raspodjele snage dodjeljivanje koeficijenata snage korisnicima se vrši na osnovu CSI korisnika. Viši nivo snage se dodjeljuje korisniku sa lošijim CSI, dok se niži nivo snage dodjeljuje korisniku sa boljim CSI. Ovim se postiže da korisnici imaju približno iste vrijednosti informacionih kapaciteta. Dinamična raspodjela snage je drugi način koji pokazuje bolje performanse NOMA sistema u odnosu na fiksnu raspodjelu snage. Kod ove metode, raspodjela snage se dinamički mijenja u zavisnosti od trenutnog CSI korisnika. Postoji nekoliko načina za dinamičnu raspodjelu koeficijenata snage u skladu sa zahtjevima sistema koji se žele postići: povećanje ukupnog

informacionog kapaciteta korisnika, energetske efikasnosti sistema, pouzdanosti prenošenih podataka ili kombinovanjem različitih ciljeva. U ovom slučaju je iskorišćena fiksna raspodjela snage, odnosno korisniku 2 sa lošijim CSI je dodijeljen viši nivo snage.

Na prijemnoj strani, korisnik kome je dodijeljen viši nivo snage odnosno korisnik 2 direktno dekodira svoj signal x_2 iz primljenog superponiranog signala y_2 koji je dat izrazom (2.2), gdje n_2 predstavlja odbirak šuma, tretirajući ostale signale kao interferenciju odnosno demoduliše svoj signal i izdvaja ga.

$$y_2 = xh_2 + n_2 \quad (2.2)$$

SIC procedura se primjenjuje na strani korisnika kome je dodijeljen niži nivo snage, odnosno na strani korisnika 1. To podrazumijeva da se prvo detektuju signali korisnika kojima je dodijeljen viši nivo snage iz primljenog signala y_1 , koji je dat izrazom (2.3), gdje predstavlja n_1 komponentu šuma, demodulišu, zatim remodulišu i sukcesivno izdoje iz preostalog signala multipleksiranjem signala sa odgovarajućim koeficijentima snage.

$$y_1 = xh_1 + n_1 \quad (2.3)$$

Na kraju se dobijeni signal dekodira i dobije signal x_1 korisnika 1. Prilikom izvođenja SIC tehnike u datom primjeru se smatra da se ta procedura obavlja bez greške. Međutim, u realnosti je to teško omogućiti jer se dešava da dio komponente signala korisnika koji ima bolji CSI ostane u primljenom signalu. To utiče na informacioni kapacitet korisnika sa boljim CSI, što je veća komponenta koja je zaostala manji je informacioni kapacitet.

Glavne prednosti NOMA sistema u odnosu na OMA mogu se sažeti u sljedeće:

- Veća spektralna efikasnost, budući da može da opslužuje više korisnika korišćenjem istog bloka resursa zbog raspodjele snage čime se postiže bolja spektralna efikasnost u odnosu na OMA sisteme, a samim tim se poboljšava i propusnost sistema. Kod OMA sistema više korisnika koristi isti raspoloživi opseg i samim tim je propusnost ograničena brojem korisnika;
- Masivna konektivnost je druga značajna prednost, s obzirom da broj krajnjih korisnika koji se mogu povezati na mrežu nije ograničen brojem raspoloživih ortogonalnih resursa kao kod OMA sistema. NOMA sistem ima mogućnosti da sve korisnike simultano opslužuje koristeći manje resursa pomoću superpozicije signala;

- Veće brzine prenosa podataka NOMA sistem omogućava tako što raspodjelom snage pravi kompromis između fernosti korisnika, u smislu da svi korisnici bez obzira na svoju lokaciju imaju sličnu brzinu prenosa podataka i propusnosti. Ukoliko je usvojen odgovarajući način raspodjele snage, korisnici imaju veću brzinu podataka uz održavanje propusnosti sistema i na ivicama ćelije;
- Manje kašnjenje u odnosu na OMA sisteme koji zavise od zahtjeva za odobrenje pristupa odnosno *scheduling*. Korisnik koji koristi *uplink* mora da pošalje *scheduling* zahtjev baznoj stanici, zatim bazna stanica šalje signal korisniku *downlink* kanalom. Ovaj proces odobrenja pristupa povećava kašnjenje. Međutim, sa povećanjem broja korisnika procedura odobravanja pristupa postaje još složenija. Nasuprot tome, šeme bez odobrenja pristupa GF (*Grant-free*) mogu se realizovati u NOMA sistemima na *uplink* kanalima otkrivanjem aktivnih korisnika, dekodiranjem njihovih podataka i na taj način se može smanjiti kašnjenje. Pored toga, smanjenju kašnjenja doprinosi i to što se korisnici istovremeno opslužuju.

Glavni nedostatak NOMA sistema je što su osetljivi na interferenciju između korisnika MUI (*Multi User Interference*) prilikom dodjeljivanja resursa, zbog neortogonalnosti između podnosilaca i opsluživanja velikog broja korisnika pomoću istog resursnog bloka i postojanja određene vjerovatnoće greške prilikom izvođenja SIC procedure. Pored toga, svaki korisnik mora da dekodira informacije svih drugih korisnika što zahtijeva složene prijemne sklopove.

2.3. Servisi podržani od pete generacije mobilnih mreža

5G mreža omogućava samostalnu komunikaciju između raznolikih korisnika pružajući im raznovrsne servise, posebno u kontekstu mIoT. Mobilna mreža pete generacije prema ITU-R nudi tri fundamentalna tipa servisa, [7] - [8]:

- Poboļjšani širokopojasni pristup (eMBB) omogućava brži i pouzdaniji prenos podataka. To je ključno za aplikacije koje zahtijevaju velike brzine prenosa podataka, kao što su UHD (*Ultra High Definition*) video *streaming*, virtualna stvarnost VR (*Virtual Reality*), proširena stvarnost AR (*Augmented Reality*) i slične aplikacije;

- Visoka pouzdanost komunikacija malog kašnjenja (URLLC) su servisi koji pružaju visoku pouzdanost i minimalno kašnjenje u komunikaciji. To je ključno za aplikacije gdje je minimalno kašnjenje od suštinskog značaja kao što su telemedicina, autonomna vožnja ili industrijska automatizacija;
- Masivne komunikacije mašinskog tipa (mMTC) su servisi usmjereni na masivnu konektivnost između uređaja u okviru IoT. To omogućava efikasnu komunikaciju između velikog broja uređaja čime se podržavaju aplikacije kao što su pametni gradovi, praćenje ili upravljanje resursima.

Svaki od pomenutih servisa postavlja specifične zahtjeve pred mrežnu arhitekturu, pa će u nastavku biti istraženi njihovi tehnički aspekti i implementacioni izazovi. Analiza će obuhvatiti ključne parametre i metrike koje definišu kvalitet ovih servisa u 5G okruženju. U Tabeli 2.2 sumirani su zahtjevi za svaki tip 5G servisa na osnovu različitih QoS parametara.

Tabela 2.2. Zahtjevi po različitim tipovima 5G servisa

	<i>eMBB</i>	<i>URLLC</i>	<i>mMTC</i>
Brzina prenosa podataka	1-10 Gb/s za <i>downlink</i> , 0,5-1 Gb/s za <i>uplink</i>	Niska	160b/s
Spektralna efikasnost	30 b/s/Hz za <i>downlink</i> , 15 b/s/Hz <i>uplink</i>	Niska	Niska
Kašnjenje	10-20 ms	0,5 ms za <i>uplink</i> , 0,5 ms za <i>downlink</i>	<10 ms za <i>uplink</i>
Konektivnost	Srednja	Niska	10^6 po km^2 *
Mobilnost	500km/h	Visoka	Niska
Energetska efikasnost	Visoka	Niska	Veoma visoka
Pouzdanost	Visoka	99.999%	Visoka

*Odnosi se na gustinu IoT uređaja u urbanim sredinama.

2.3.1. Servisni zahtjevi tipa poboljšani širokopojasni pristup

Poboljšani širokopojasni pristup je unaprijeđeni širokopojasni pristup u odnosu na mreže četvrte generacije. Ovaj tip servisa namijenjen je za pristup medijskim sadržajima, podacima i raznim uslugama koje uključuju prenos sadržaja veoma visokog kvaliteta. Sa korisničke strane ove usluge zahtijevaju velike brzine prenosa podataka od 20Gb/s za *downlink* i 10Gb/s za *uplink* i resurse smještene na *cloud*-u zbog kompleksnih obrada podataka. Postoje dva tipa scenarija koje obuhvataju eMBB servisi. Prvi karakteriše velika gustina uređaja i izuzetno visoka brzina prenosa podataka uz malu mobilnost uređaja, dok je drugi scenario pokrivenost širokog područja gdje su gustina uređaja i brzina prenosa podataka niži, ali mobilnost je veća i iznosi i do 500km/h.

Poboljšanje usluge širokopojasnog pristupa u 5G mreži može se postići na dva načina. Jedan je naprednim višeantenskim sistemima odnosno mMIMO tehnikom koja omogućava oblikovanje dijagrama zračenja i bolje iskorišćenje frekvencijskog opsega, a to rezultira većom pokrivenosti mreže i poboljšanom spektralnom efikasnosti. Zahtijevana spektralna efikasnost za eMBB tip servisa je 30b/s/Hz za *downlink*, dok je za *uplink* 15b/s/Hz, što znači da je potreban spektar od 667MHz da bi se postigle željene brzine prenosa podataka. Drugi način je korišćenje novih frekvencijskih opsega čime se dodatno proširuju frekvencijski resursi, a time povećava brzina prenosa podataka. U opsegu milimetarskih talasa se posebno vidi prilika za značajnim povećanjem brzina prenosa podataka. Što se tiče kašnjenja, postoje zahtjevi za dva tipa kašnjenja. Jedan tip je kontrolno kašnjenje koje se odnosi na vrijeme koje je potrebno da uređaj pređe iz neaktivnog stanja u aktivno stanje i treba da iznosi do 10ms. Drugi tip je korisničko kašnjenje koje se odnosi na vrijeme potrebno da informacija stigne do korisnika kada je uređaj u aktivnom stanju i treba da iznosi do 4ms.

NOMA sistemi ovom tipu servisa nude bolju spektralnu efikasnost i poboljšanje fernosti između korisnika u pogledu brzine prenosa podataka, ujedno i opsluživanje mnogo većeg broja korisnika istovremeno uz pružanje zahtijevanog QoS uz pomoć D2D (*Device to Device*) komunikacija. Za to su potrebne nove strategije za bolje upravljanje raspoloživim resursima i suzbijanje intereferencije između korisnika.

2.3.2. Servisni zahtjevi tipa visoka pouzdanost komunikacija malog kašnjenja

Visoka pouzdanost komunikacija malog kašnjenja je drugi tip 5G servisa, a obuhvata nove scenarije koji imaju visoke zahtjeve za pouzdanošću i kašnjenjem. Pod time se podrazumijeva kašnjenje manje od 1ms i pouzdanost od 99,999%. Nisko kašnjenje se može postići zbog fleksibilnije strukture frejma u NR (*New Radio*) tehnologijama. Naime, moguće je skratiti vrijeme prenosa TTI (*Transmission Time Interval*) smanjenjem vremena trajanja simbola što znači da se razmak između podnosioca SCS (*Subcarrier Spacing*) povećava ili smanjenjem broja prenošenih simbola tokom TTI. Pored ovoga, kašnjenje se može smanjiti fleksibilnijim šemama za pristup kanalu koje nude NOMA sistemi. Što se tiče primjene, ovaj tip usluge odnosi se većinom na usluge u području sigurnosti i zdravstva. To podrazumijeva uređaje koji očekuju visoku pouzdanost, neprekidnu razmjenu podataka i komunikaciju u realnom vremenu. Pod tim uređajima ubrajaju se autonomna vozila, napredna elektroenergetska mreža, upravljanje saobraćajem u realnom vremenu, uređaji koji vode komunikaciju za vrijeme hitnih slučajeva i nesreća, daljinsku medicinsku hirurgiju, te industrijska komunikacija odnosno bežično upravljanje mašinama u pogonima proizvodnje, [10].

URLLC aplikacijama NOMA sistemi nude smanjenje kašnjenja GF tehnikama za pristup kanalu i povećanje broja korisnika na *downlink*-u kao i mogućnost smanjenja kolizije na *uplink*-u upotrebom odgovarajućih MAC (*Medium Access Control*) protokola.

2.3.3. Servisni zahtjevi tipa masivne komunikacije mašinskog tipa

Treći tip servisa su masivne komunikacije mašinskog tipa koje zahtijevaju veliki broj povezanih uređaja, do milion uređaja po km^2 . Ovi uređaji povremeno šalju male količine podataka relativno malom brzinom od 160b/s. Bitne karakteristike koje treba da imaju sami uređaji su prihvatljiva cijena i izuzetno visoka energetska efikasnost. Razlog tome je što su ovi uređaji dizajnirani da rade autonomno tokom dugog vremenskog perioda. Baterija uređaja bi trebala da traje do 10 godina, što se postiže vrlo ograničenim saobraćajem podataka. Svaki uređaj šalje 200 do 500 bita dnevno na *uplink* i *downlink* kanalima, respektivno, pri čemu kapacitet baterije iznosi 5Wh. Zahtjevi za kašnjenjem kod mMTC servisa nisu striktni i iznose manje od 10ms na *uplink* kanalima. Ovo

kašnjenje obuhvata vrijeme potrebno da uređaj pređe iz neaktivnog u aktivno stanje i uspješno prenese paket od 160 bita na aplikativnom nivou.

NOMA sistemi su posebno važni za mMTC aplikacije. GF tehnika u NOMA sistemima omogućava masivnu povezanost uređajima uz smanjeno kašnjenje, što predstavlja jedan od ključnih zahtjeva ovog tipa servisa. Dodatno, mogućnost skladištenja podataka na *cloud*-u i naprednije upravljanje podacima doprinose smanjenju kašnjenja. Primjer su MEC (*Multi-access Edge Computing*) tehnologije koje pružaju bolju mogućnost obrade podataka, čime se dodatno smanjuju troškovi i postižu bolje performanse. Pored toga, NOMA sistemi nude veću energetska efikasnost i manju vjerovatnoću otkaza sistema u odnosu na OMA sisteme, o čemu će biti više riječi u nastavku rada, [11].

Mreže pete generacije ne donose samo raznovrsne servise koji odgovaraju potrebama različitih aplikacija, već iniciraju transformacije u brojnim sektorima društva. Ovo predstavlja ključni momenat u evoluciji mobilnih komunikacija i kreira osnovu za buduće inovacije u domenu povezanih uređaja. Naredna faza u razvoju mobilnih sistema nakon 5G je šesta generacija mobilnih mreža (6G), koja se razvija paralelno sa implementacijom pete generacije. Predviđa se da će 6G obuhvatiti tri primarna aspekta: mobilnu ultra širokopojasnu mrežu UMB (*Ultra Mobile Broadband*) sa još većim brzinama prenosa podataka, super Internet stvari koji će povezati masivniji broj uređaja uz sofisticiraniju međusobnu komunikaciju i vještačku inteligenciju AI (*Artificial Intelligence*) sa tehnikama mašinskog učenja, [9]. Sveobuhvatno posmatrano, 5G mreža predstavlja prekretnicu u evoluciji mobilnih komunikacija, dok 6G nagovještava dodatne inovacije. Zajedno, ove mreže će definisati budućnost povezanih uređaja, redefinišući način na koji komuniciramo i interagujemo sa tehnologijom.

2.3.4. Primjena masivnih komunikacija mašinskog tipa

Arhitektura za masivne komunikacije mašinskog tipa predstavlja složen sistem koji obuhvata tri osnovna domena sa specifičnim funkcionalnim elementima. To su M2M, mrežni i aplikacioni domen. M2M domen čini veliki broj IoT uređaja ekipiranih izvorom energije ili sakupljačem energije, radio predajnicima i antenama za međusobnu komunikaciju uz prisustvo senzora i aktuatora za interakciju sa fizičkim okruženjem. Ovi uređaji su povezani direktno ili putem M2M

gateway-a na različite pristupne mreže radi slanja i prijema podataka. Mrežni domen igra ključnu ulogu u obezbjeđivanju pouzdanih i efikasnih kanala za prenos podataka preko raznovrsnih pristupnih mreža i IP jezgra mreže. U okviru ovog domena nalaze se *data* centri koji služe kao osnovna infrastruktura za obradu i skladištenje podataka, *backend* serveri koji služe kao zaštitni sloj za različite servise, kao i *cloud* baze podataka za čuvanje i obradu velikih količina podataka. Aplikacioni domen prikazuje interakciju između krajnjih korisnika i aplikacija koje koriste podatke prikupljene od IoT uređaja. U ovom domenu razvijaju se i izvršavaju aplikacije koje omogućavaju korisnicima da iskoriste informacije sa IoT uređaja za različite svrhe, dok krajnji korisnici komuniciraju sa aplikacijama kako bi pristupili informacijama i obavili radnje na osnovu ovih podataka. Navedena arhitektura omogućava efikasno prikupljanje, obradu i prenos podataka prikupljenih od mnogobrojnih IoT uređaja, što je od suštinskog značaja za različite primjene, [12].

Neki od primjera aplikacija mMTC komunikacija su pametni grad, pametna kuća, pametna okolina, pametno zdravstvo, pametna zgrada, pametni saobraćaj, pametna poljoprivreda i industrijski IoT. Masivne komunikacije mašinskog tipa omogućavaju bolju i efikasniju realizaciju pametnog grada, iako su zahtjevi veliki u pogledu kašnjenja, pouzdanosti i brzina prenosa podataka. Primjeri aplikacija vezanih za pametne gradove su, [13]:

- “Održi čiste ulice” koja upotrebom senzora u kantama za smeće omogućava slanje informacije komunalnim službama kada se kanta treba isprazniti. Ova aplikacija može smanjiti broj nepotrebnih vožnji komunalnih vozila i time troškove svesti na minimum;
- “Nalaženje parking mjesta” je aplikacija koja pomoću senzora postavljenim na gradske ulice šalje informaciju o slobodnim parking mjestima u našoj blizini;
- “Efektivnije osvjjetljenje ulica” je aplikacija vezana za sistem rasvjete koja omogućava regulisanje svjetala gradske rasvjete u zavisnosti od potrebe i vremenskih prilika čime bi gradovi uštedjeli do 30 % energije.

Pod konceptom pametna kuća podrazumijeva se komunikacioni sistem u kojem su razni električni uređaji kao što su frižideri, robotski usisavači, portafoni ili osvjjetljenje povezani i mogu se kontrolisati iz centralnog izvora pomoću pametnih uređaja. Pored toga, u sigurnosne svrhe se mogu koristiti i kamere sa video zapisima visokog kvaliteta u realnom vremenu. 5G mreža konceptu pametna kuća pomoću mMTC komunikacija donosi povećanje brzine prenosa podataka,

smanjenje kašnjenja i povećanje energetske efikasnosti. Neke od aplikacija vezane za pametne kuće su:

- “Efikasno zagrijavanje doma” koja upotrebom termostata sa ugrađenim senzorom, praćenjem vremenske prognoze u realnom vremenu i aktivnosti sprovedene u kući može uštedjeti do 30 % energije na mjesečnom nivou;
- “Budite sigurni da je rerna ugašena” je aplikacija koja omogućava trenutno uključivanje ili isključivanje svih uređaja uključenih na elektroprenosnu mrežu, sa bilo kojeg mjesta;
- “Održi biljke” koja upotrebom senzora u blizini biljaka prati rast biljaka i savjetuje korisnika o održavanju.

Pametne zgrade teže povećanju energetske efikasnosti i unaprjeđenju kvaliteta života stanovnika. Ove zgrade primenjuju različita tehnološka rješenja kao što su automatsko osvjjetljenje, kontrola grijanja, praćenje potrošnje resursa poput vode i električne energije, daljinsko upravljanje pametnim uređajima uz prilagodljivost prema korisničkim potrebama i detekcija nepravilnosti radi bolje bezbijednosti. Primjena mMTC u pametnim zgradama omogućava korisnicima veću kontrolu i efikasnost upravljanja različitim komponentama zgrade. Vlasnicima zgrada omogućava bolju kontrolu troškova i resursa. Ovo zahtijeva upotrebu raznovrsnih senzora za praćenje parametara kao što su pokret, osvjjetljenje, temperatura i protok vode u različitim scenarijima. Iako obim saobraćaja može biti nizak jer zavisi od broja korisnika u zgradi, korisnici zahtijevaju nisko kašnjenje prilikom korišćenja pametnih uređaja.

Masivne komunikacije mašinskog tipa igraju ključnu ulogu u transformaciji poljoprivrede u pametnu i efikasnu industriju. Korišćenjem senzora i GPS tehnologije, poljoprivrednici mogu precizno pratiti lokaciju stoke, optimizovati navodnjavanje, upravljati pristupom resursima i efikasno kontrolisati potrošnju električne energije na farmama. Primjena mMTC komunikacija u kontekstu pametne poljoprivrede omogućava proizvođačima brži i pouzdaniji način prikupljanja i prenosa podataka. Takođe, omogućava širu integraciju različitih senzora što uključuje stalno nadgledanje performansi opreme i primjenu robotskog vizuelnog prepoznavanja koje autonomno obezbjeđuje visok kvalitet proizvoda.

Tehnologija pametnih senzora predstavlja ključno rješenje za industrijski IoT, nudeći širok spektar inovacija za optimizaciju industrijskih operacija u smislu pametnijeg, sigurnijeg, ekonomičnijeg i

energetski efikasnijeg rada. Masivne komunikacije mašinskog tipa otvaraju nove mogućnosti za industriju, pružajući efikasnu automatizaciju opreme, prediktivno održavanje, unaprijeđenu sigurnost, praćenje procesa, pametno pakovanje, optimizaciju otpreme i logistike, kao i efikasno upravljanje električnom energijom. Neki od primjera aplikacija vezane za automatizaciju industrije su:

- “Upravljanje i popravka” aplikacija koja se odnosi na senzorske tehnologije, koje su smještene u industrijskoj opremi. Te tehnologije imaju zadatak obavještanja krajnjeg korisnika da je došlo do kvara u određenom dijelu industrijske opreme ili da su neki dijelovi te iste opreme dotrajali;
- “Sigurnost na prvom mjestu” je aplikacija koja obavještava nadležno osoblje putem mejla ili SMS porukom na pametni telefon u slučaju kada se aparat za gašenje ne nalazi na svom mjestu, ukoliko je blokiran ili ako je pritisak aparata prenizak;
- “Upravljanje zalihama” je aplikacija koja upotrebom kamera postavljenim u trgovinama korisnika obavještava da li posjeduje ono što želi ili ne, dok vlasnik trgovine ima uvid u skladište i proizvode dostupne kupcima.

Aplikacije za pametno praćenje okoline omogućavaju bolje razumijevanje i praćenje prirodnih pojava i katastrofa. mMTC komunikacije nude energetski efikasne opcije za detekciju različitih događaja u prirodi uključujući šumske požare, zemljotrese i zagađenje vazduha. Brza reakcija je ključna u takvim situacijama, a IoT uređaji igraju ključnu ulogu u ovom procesu. Osim toga, aplikacije pametnog praćenja okoline takođe se koriste za praćenje divljih životinja i drugih manje kritičnih pojava. Energetska efikasnost je od suštinskog značaja za IoT uređaje, posebno u ruralnim područjima gdje bi ove aplikacije bile najkorisnije.

mMTC komunikacije su ključne za ostvarivanje koncepta pametnog saobraćaja, posebno u kontekstu autonomne vožnje. Ova tehnologija omogućava komunikaciju između vozila i povezivanje sa pametnim sistemima unutar vozila. Autonomna vožnja se razvija već neko vrijeme i ima za cilj potpunu automatizaciju vožnje bez potrebe za ljudskim vozačem. Ključni elementi ovog razvoja uključuju testiranje sistema za autonomnu vožnju, kontinuirano unaprijeđivanje i prilagođavanje sistema na neočekivane situacije i uslove na putu. Za postizanje ovih ciljeva, vještačka inteligencija i mašinsko učenje igraju ključnu ulogu. mMTC omogućava povezivanje svih uređaja sa minimalnim kašnjenjem, velikom brzinom prenosa podataka i visokim kapacitetom,

što je od suštinskog značaja za aplikacije u okviru pametnog saobraćaja. Osim toga, ključni aspekt predstavlja izgradnja infrastrukture pametnih gradova i ulica. Međusobna komunikacija između vozila, razmjena informacija, povezivanje sa infrastrukturom i drugim uređajima u okolini su ključne usluge za autonomnu vožnju. 5G mreža omogućava ovakav napredak zahvaljujući poboljšanju spektra, brzine prenosa podataka i mrežne strukture. Ovaj razvoj ima za cilj stvaranje sigurnijih i efikasnijih putnih sistema, te smanjenje rizika u saobraćaju.

5G mreža pruža značajne mogućnosti za unaprjeđenje preventivne i nadzorne prakse u zdravstvu kroz integraciju pametnih uređaja dizajniranih za praćenje zdravstvenog stanja pacijenata. Ovi uređaji omogućavaju aktivno ili pasivno prikupljanje relevantnih zdravstvenih podataka, što otvara vrata personalizovanom nadzoru i njezi, smanjujući potrebu za čestim posjetama bolnicama i ukupne zdravstvene troškove. Integracija mMTC sa pametnim zdravstvom obezbjeđuje brži i pouzdaniji prenos podataka, poboljšavajući tako vrijeme odziva zdravstvenih sistema i kvalitet usluge koju pružaju. Ova brza i pouzdana komunikacija omogućava razvoj sofisticiranih uređaja, uključujući one koji se mogu ugraditi u ljudsko tijelo, kao što su mikroskopske kamere koje pružaju osnovu za udaljene dijagnoze i druge kompleksne prakse telemedicinskog zdravstva. U oblasti robotske hirurgije, mMTC omogućava minimalno kašnjenje i pouzdanu komunikaciju na velike udaljenosti, otvarajući put za obavljanje hirurških intervencija bilo gdje u svijetu. Aplikacije vezane uz pametno zdravstvo su:

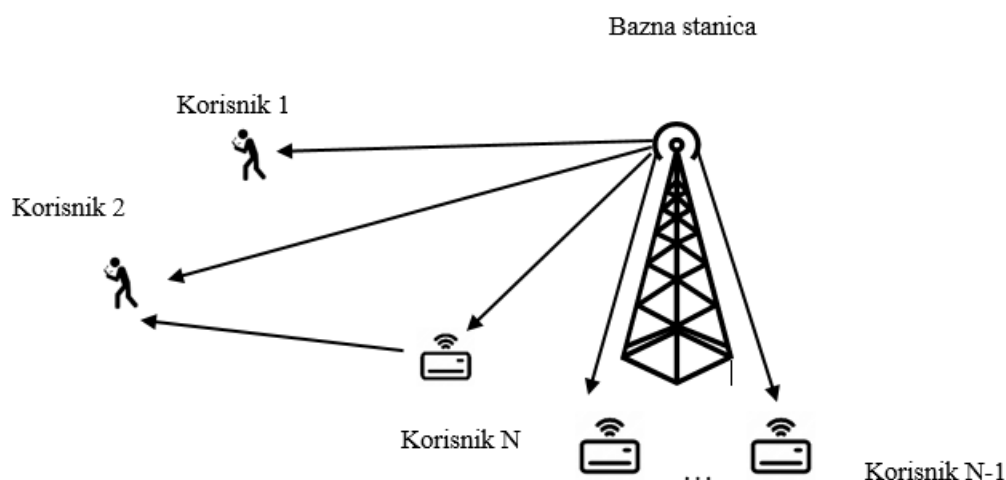
- “Provjeri bebu” aplikacija koja omogućava pregled informacija o djetetu u realnom vremenu na pametnom telefonu praćenjem disanje djeteta, temperature i položaj tijela kao i aktivnosti;
- “Podsjetnik o uzimanju lijekova” je aplikacija koja bežičnim čipom postavljenim na pakovanje lijeka obavještava korisnika slanjem SMS poruke o redovnom uzimanju terapije.

3. NEORTOGONALNE TEHNIKE VIŠESTRUKOG PRISTUPA ZA MASIVNE KOMUNIKACIJE MAŠINSKOG TIPA

3.1. Model NOMA sistema za masivne komunikacije mašinskog tipa

U ovom dijelu rada detaljno su opisani specifični mMTC servisni zahtjevi koji se postavljaju pred NOMA tehnike višestrukog pristupa. Sistemi pete generacije definišu stroge kriterijume za omogućavanje masivne konektivnosti uređaja, dok istovremeno pouzdanost sistema, minimalno kašnjenje, optimalno korišćenje energetske i spektralne resursa čine primarne izazove. Shodno tome, u nastavku je data analiza sistema baziranog na NOMA konceptu kao potencijalni odgovor na te izazove.

Za bolje razumijevanje osnovnih principa funkcionisanja NOMA sistema za mMTC servise, na Slici 3.1 je dat konkretan primjer *downlink* mMTC NOMA komunikacije. Ovaj primjer će poslužiti i kao osnova za dublje razmatranje neortogonalnih tehnika sa multipleksiranjem u domenu snage. U prilog tome slijedi detaljno objašnjenje ovakvog sistema zajedno sa analizom važnih QoS parametara kao što su masivna konektivnost, informacijski kapacitet, spektralna efikasnost, energetska efikasnost, pouzdanost i kašnjenje.



Slika 3.1. Scenario mMTC NOMA sistema

Na slici 3.1 dat je sistem sa N korisnika kojima bazna stanica šalje signale, pri čemu NOMA omogućava masivno povezivanje uređaja koristeći neortogonalne resurse. Analizom datog modela biće pokazane prednosti koje NOMA tehnike nude u ispunjavanju sevisnih zahtjeva mMTC servisa u odnosu na OMA sisteme. Pri tome će biti identifikovani specifični scenariji u kojima su NOMA tehnike posebno korisne i pružaju najbolje performanse.

3.2. Masivna konektivnost mMTC NOMA sistema

NOMA sistemi omogućavaju simultani prenos podataka za mnogo veći broj korisnika u okviru jednog resursnog bloka, što je ključna prednost u odnosu na OMA sisteme. OMA sistemi ograničavaju broj korisnika prema broju raspoloživih kanala, a kako broj korisnika koji pristupaju mreži raste, njihovi zahtjevi za prenos se odbacuju dok neki od korisnika ne završi prenos i oslobodi kanal. U NOMA sistemu različiti korisnici mogu koristiti isti resursni blok u isto vrijeme. Jedan od izazova sa kojim se NOMA suočava je interferencija između korisnika koji dijele isti resursni blok. Da bi se ovo rješilo, primjenjuje se SIC tehnika koja omogućava uređajima da dekodiraju i uklone interferenciju korisnika, jedan po jedan, počevši od korisnika sa najboljim uslovima na kanalu, [13]. U nastavku rada, detaljno će biti pokazano koliko korisnika NOMA sistem može opslužiti u jednom resursnom bloku, kao i to kako povećanje broja korisnika utiče na performanse sistema i kvalitet isporučenih usluga. Takođe se analizira kako SIC tehnika doprinosi efikasnom upravljanju interferencijom i podržava NOMA sistem u masivnoj konektivnosti.

Pretpostavimo mrežu sa N korisnika u *downlink* NOMA sistemu, kao što je prikazano na Slici 3.1. Raspored ovih korisnika, njihovih pozicija i udaljenosti od bazne stanice ključni je faktori u efikasnom korišćenju NOMA tehnike za komunikaciju između uređaja i alokaciju resursa za svakog pojedinačnog korisnika. Važno je napomenuti da bazna stanica u ovom scenariju ima informacije o stanju kanala svakog korisnika, odnosno da se radi o CSIT scenariju. Radi lakše analize, inicijalno se pretpostavlja da CSIT zavisi od rastojanja korisnika od bazne stanice, pa korisnik koji je najudaljeniji ima najlošiji CSI, dok najbliži korisnici baznoj stanici imaju najbolji CSI, što u praksi najčešće i nije slučaj. Ova pretpostavka će biti korišćena za prilagođavanje parametara sistema kako bi se postigle najbolje performanse uzimajući u obzir varijaciju CSIT-a korisnika. Osim toga, M-arni digitalni signali koji se šalju korisnicima generišu se u osnovnom

opsegu učestanosti i sastoji se od N slučajnih binarnih simbola uniformne raspodjele. U ovakvom scenariju, analiza će se fokusirati na to kako se korisnici mogu servisirati koristeći NOMA tehniku, kako će se izvršiti alokacija resursa korisnicima, kako će se koristiti CSIT informacije za poboljšanje performansi, te kako će se M-arni signali distribuirati korisnicima u skladu sa njihovim CSIT i udaljenostima.

U ovoj analizi koristi se model kanala sa *Rayleigh*-evim frekvencijski neselektivnim fedingom, koji je pogodan za urbana okruženja gdje ne postoji direktna vidljivost između predajnika i prijemnika. *Rayleigh*-ev feding nastaje zbog *multipath* propagacije, gdje signal refleksijom od zgrada, vozila i drugih prepreka dolazi do prijemnika. Ovi višestruki signali pristižu sa različitim fazama i amplitudama, što rezultira slučajnim varijacijama u anvelopi primljenog signala. *Rayleigh*-eva raspodjela dobro modeluje amplitudu primljenog signala u takvim uslovima, što je čini standardnim modelom za analizu performansi bežičnih komunikacionih sistema u urbanom okruženju. Pri tome korisnici su raspoređeni tako da prvi korisnik ima najbolji CSI, dok N -ti korisnik ima najlošiji CSI. Na osnovu navedenog, važi relacija 3.1, pri čemu h_N opisuje stanje na kanalu N -tog korisnika, odnosno predstavlja koeficijent kanala N -tog korisnika koji opisuje kako signal slabi na putu od predajnika do njega. Ovaj koeficijent zavisi od udaljenosti korisnika, *multipath* fedinga i ostalih propagacionih karakteristika kanala. Kvadrat amplitude ovih koeficijenata, $|h_N|^2$, predstavlja dobitak kanala koji pokazuje koliko je signal pojačan ili oslabljen tokom prenosa., obzirom da efekat *multipath* fedinga može biti konstruktivan ili destruktivan.

$$|h_1|^2 > |h_2|^2 > \dots > |h_N|^2 \quad (3.1)$$

U odnosu na CSI se, na osnovu relacije 3.1, raspodjeljuju koeficijenti snage tako da se korisniku sa najlošijim karakteristikama kanala, u ovom slučaju je to N -ti korisnik, dodjeljuje najveći koeficijent snage a_N , a korisniku sa najboljim karakteristikama na kanalu se dodjeuje najmanji koeficijent snage a_1 . U datom primjeru je to korisnik 1. Za koeficijente snage važi relacija 3.2:

$$a_1 < a_2 < \dots < a_N, \quad (3.2)$$

pri čemu važe relacije (3.3) i (3.4):

$$a_1 < a_2 + \dots + a_N \quad (3.3)$$

$$a_{N-1} < a_N \quad (3.4)$$

Na strani predaje se obavlja superpozicijsko kodiranje. Superponirani signal x dat je izrazom 3.5:

$$x = P(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2 + \dots + \sqrt{a_N}x_N) \quad (3.5)$$

Ovaj signal se sastoji od multipleksiranih signala svih N korisnika i takav se šalje do korisnika predajnom snagom P . Na strani prijema, u skladu sa principom na osnovu kojeg funkcioniše NOMA sistem, korisnik koji ima najlošije uslove na kanalu (N -ti korisnik) koristi direktno dekodiranje za svoj signal, dok svi ostali korisnici zbog MUI moraju primijeniti SIC proceduru. U ovom primjeru se pretpostavlja da je SIC procedura savršena, odnosno da se obavlja bez greške prilikom razdvajanja signala. Primljeni signal i -tog korisnika y_i , pod pretpostavkom da se radi o kanalu sa *Rayleigh*-evim fadingom, dat je izrazom 3.6, pri čemu n_i predstavlja bijeli *Gauss*-ov šum koji je *Gauss*-ova slučajna promjenjiva sa srednjom vrijednošću 0 i varijansom σ^2 .

$$y_i = P(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2 + \dots + \sqrt{a_N}x_N)h_i + n_i \quad (3.6)$$

U datom primjeru, SIC procedura će se primijeniti $N-1$ puta. To znači da se dodavanjem korisnika u sistemu povećava kompleksnost sistema, pa samim tim i kašnjenje. Pored toga javlja se greška prilikom SIC tehnike koja se mora uzeti u obzir u realnim scenarijima. S obzirom na to da korisnik N obavlja direktno dekodiranje signala, tretirajući signale ostalih korisnika kao interferenciju, informacioni kapaciteti korisnika N i $N-1$ postaju:

$$R_N = \log_2\left(1 + \frac{a_N P |h_N|^2}{(a_1 |h_1|^2 + \dots + a_{N-1} |h_{N-1}|^2) P + \sigma^2}\right) \quad (3.7)$$

$$R_{N-1} = \log_2\left(1 + \frac{a_{N-1} P |h_{N-1}|^2}{(a_1 |h_1|^2 + \dots + a_{N-2} |h_{N-2}|^2) P + \sigma^2}\right), \quad (3.8)$$

odnosno za i -tog korisnika u opštem slučaju važi relacija 3.9:

$$R_i = \log_2\left(1 + \frac{a_i P |h_i|^2}{\sum_{j=1}^{i-1} a_j |h_j|^2 P + \sigma^2}\right) \quad (3.9)$$

Problem koji se uočava je povećanje intereferencije sa povećanjem broja korisnika koji se multipleksiraju u jednom resursnom bloku. Pored ovoga, mora se odabrati i pravilan način raspodjele snage korisnicima. Sistem sa N korisnika treba da zadovolji, pored uslova 3.3 i 3.4, i sljedeći uslov:

$$a_1 + a_2 + \dots + a_N = 1 \quad (3.10)$$

Dakle, potrebno je izabrati koeficijente snage tako da se zadovolje sva tri pomenuta uslova za N korisnika. U ovom primjeru je primijenjena fiksna raspodjela snage, tako da je korisniku N dodijeljen koeficijent snage $a_N = \frac{3}{4}$, pa na osnovu toga koeficijenti ostalih korisnika su:

$$a_{N-1} = \frac{3}{4}(1 - (a_1 + a_2 + \dots + a_{N-2})) \quad (3.11)$$

$$a_1 = \frac{3}{4}(1 - (a_2 + \dots + a_N)) \quad (3.12)$$

Iz prethodnog se može zaključiti da povećanje broja korisnika u NOMA sistemu donosi sa sobom određene prednosti i izazove. Kao što je ranije pomenuto, NOMA sistemi imaju kapacitet da opsluže mnogo veći broj korisnika u odnosu na OMA sisteme, budući da dozvoljavaju simultani prenos podataka više korisnika u jednom resursnom bloku. Ovo omogućava bolju iskorišćenost radiofrekvencijskih resursa i smanjuje nivo interferencije između korisnika, što pozitivno utiče na performanse sistema. Međutim, kako se broj korisnika povećava, smanjuje se snaga koja se može dodijeliti svakom pojedinačnom korisniku. Ovo može rezultirati smanjenjem brzine prenosa podataka, posebno za one korisnike sa lošijim CSI. Na ovaj način dolazimo do tačke u kojoj više korisnika može biti opsluženo, ali uz određeno smanjenje informacionog kapaciteta za svakog pojedinačnog korisnika. Možemo tu tačku posmatrati kao prag koji označava najveći broj korisnika koji NOMA sistem može podržati, a da se performanse ne degradiraju ispod zadovoljavajućeg nivoa. Takođe, raspodjela snage igra važnu ulogu. Fiksna raspodjela snage postaje neefikasna sa povećanjem broja korisnika, jer ne uzima u obzir promjenjive uslove kanala i različite zahtjeve korisnika. To znači da je dinamična raspodjela snage ključna za optimizaciju performansi NOMA sistema u situacijama sa velikim brojem korisnika.

Na osnovu izloženog može se zaključiti da NOMA sistemi donose znatne prednosti u pogledu opsluživanja većeg broja korisnika u odnosu na OMA sisteme, ali upravljanje parametrima kao što su snaga i raspodjela resursa postaje sve značajnije kako se broj korisnika povećava. Jedno od mogućih rješenja za opsluživanje većeg broja korisnika u NOMA sistemu jeste korišćenje hibridnog NOMA pristupa. Ovo podrazumijeva kombinaciju NOMA i OMA tehnologija, gdje se korisnici grupišu na odgovarajući način uzimajući u obzir različite faktore, uključujući kvalitet CSIT-a, stanje na kanalu i zahtjeve korisnika. Odabir načina uparivanja korisnika za ortogonalne

resurse u hibridnom NOMA sistemu ima veliki uticaj na performanse. To predstavlja još jedan važan aspekt koji zahtijeva pažljivo razmatranje pri projektovanju ovakvih mreža.

3.3. Informacioni kapacitet i spektralna efikasnost u mMTC NOMA sistemima

Kao što je prethodno rečeno, NOMA sistem predstavlja naprednu tehniku multipleksiranja, koja se izdvaja po svojoj sposobnosti da pruži znatno veći informacioni kapacitet u poređenju sa OMA tehnikama. Kod OMA sistema je ograničen broj korisnika koji mogu biti istovremeno aktivni, što smanjuje ukupni informacioni kapacitet mreže u uslovima gustog saobraćaja. Osnovna karakteristika NOMA tehnika, koje omogućavaju simultani prenos podataka više korisnika, ogleda se u korišćenju istih resursnih blokova. To znači da se signali različitih korisnika preklapaju na istim resursima, ali se mogu razdvojiti i dekodirati korišćenjem posebne tehnike dekodiranja na strani prijemnika. Ovaj inovativni pristup omogućava veću propusnost po korisniku u uslovima velikog broja korisnika.

Relacija za informacioni kapacitet za i -tog korisnika u sistemu sa Slike 3.1 je data izrazom 3.9. Sa druge strane se posmatra OFDMA sistem sa N korisnika, kao primjer OMA sistema. Signal x koji šalje bazna stanica i -tom korisniku snagom P dat je izrazom:

$$x = P x_i \quad (3.13)$$

Na strani prijema, i -ti korisnik prima sljedeći signal:

$$y_i = P x_i h_i + n_i \quad (3.14)$$

OFDMA opslužuje korisnike u istom vremenskom intervalu ali im dodjeljuje različite frekvencijske opsege. Ukoliko je w ukupan frekvencijski opseg onda je informacioni kapacitet za i -tog korisnika dat izrazom 3.15:

$$R_i = \sum_{i=1}^N \frac{w}{i} \log_2 \left(1 + \frac{P |h_i|^2}{\sigma^2} \right) \quad (3.15)$$

Poređenje izraza 3.9 i 3.15 pokazuje značajnu razliku između OMA i NOMA sistema u kontekstu MUI. Zahvaljujući ortogonalnoj prirodi alokacije, OMA sistemi nemaju problema sa

međukorisičkom interferencijom, odnosno svakom korisniku se dodeljuje nezavisan resurs koji ne interferira sa resursima drugih korisnika. Ovo svojstvo daje OMA sistemu prednost u uslovima nižih vrijednosti SNR (*Signal to Noise Ratio*). Nasuprot tome, pri povećanju SINR vrijednosti, NOMA omogućava da korisnici istovremeno prenose signale preko istog resursa kroz tehniku superpozicije, pri čemu prijemnici koriste napredne metode dekodiranja za separaciju signala. Ovakav pristup omogućava precizno izdvajanje signala pojedinačnih korisnika, što direktno doprinosi poboljšanju spektralne efikasnosti sistema. Osim toga, važno je napomenuti da NOMA u jednom frekvencijskom opsegu može opslužiti svih N korisnika, dok bi OFDMA sistem zahtijevao N frekvencijskih opsega kako bi obavio prenos signala svih korisnika. Ovo znatno poboljšava spektralnu efikasnost sistema, što je glavna prednost NOMA u uslovima većeg broja korisnika i zahtjeva za većim informacionim kapacitetom u bežičnim mrežama. Može se konstatovati da razlika između OMA i NOMA sistema leži u pristupima upravljanju resursima i razdvajanju signala korisnika. OMA nudi bolje performanse u uslovima niskog SNR-a, dok NOMA postaje sve efikasniji kako SNR raste, pružajući veći informacioni kapacitet uz maksimalnu spektralnu efikasnost, [14].

3.4. Alokacija snage u mMTC NOMA sistemima

Sistem dinamičke alokacije snage omogućava optimalno raspoređivanje resursa kroz kontinuirano prilagođavanje na osnovu trenutnih parametara kanala. Sprovedena analiza treba da pokaže kako se koeficijenti snage mogu prilagoditi sa ciljem optimizacije informacionog kapaciteta korisnika. Konkretno, primijenice se matematički modeli u cilju poboljšanja pokrivenosti i obezbjeđenja adekvatnog informacionog kapaciteta. Postoji nekoliko načina da se dinamički raspodijele koeficijenti snage korisnicima u zavisnosti od cilja koji želi da se postigne. U ovom slučaju je to približno isti informacioni kapacitet za sve korisnike.

Izvođenje koeficijenata snage korisnika pokazaće se na primjeru sa Slike 3.1, za korisnika 1 i korisnika 2, sa ciljem da se pokaže osnovni princip funkcionisanja NOMA sistema, a to je fernost između korisnika, odnosno želja da oba korisnika imaju približne vrijednosti informacionih kapaciteta. Korisniku 2 se daje prioritet, što znači da će se koeficijenti računati tako da se prvo postigne odgovarajući informacioni kapacitet korisnika sa lošijim CSI. Kada se to ostvari, sva

preostala snaga se dodjeljuje korisniku 1 sa boljim CSI. Neka je ciljni informacijski kapacitet korisnika 2 označen sa r . Ono što treba da se postigne je dato izrazom 3.16, pri čemu P_1 i P_2 predstavljaju snage korisnika 1 i 2 respektivno, h_2 stanje na kanalu korisnika 2, a n_2 šum na kanalu korisnika 2:

$$r = R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{P_2 |h_2|^2}{P_1 |h_2|^2 + n_2} \right) \quad (3.16)$$

Da bi se izračunao koeficijent snage korisnika 2 potrebno je prvo da se pomnože obje strane sa 2^r . Nakon toga dobija se izraz 3.17:

$$\frac{P a_2 |h_2|^2}{P a_1 |h_2|^2 + n_2} = 2^r - 1 \quad (3.17)$$

Ukoliko se označi $2^r - 1$ sa ε , a koeficijent a_1 se izračuna prema formuli 3.10, dobija se koeficijent a_2 dat izrazom 3.18:

$$a_2 = \frac{(1+\varepsilon)P|h_2|^2}{\varepsilon(P|h_2|^2+n_2)} \quad (3.18)$$

S obzirom da dodjeljivanje kompletne raspoložive predajne snage korisniku 2 ($a_2 = 1$) nije optimalno, izraz 3.18 mora biti ograničen. Ako bi se kompletna raspoloživa snaga dodijelila korisniku 2, došlo bi do nekoliko negativnih efekata. Prvo, degradacija performansi korisnika sa boljim CSI. Korisnik 1 ne bi imao dovoljno snage za prenos svojih podataka, što bi rezultiralo smanjenjem njegovog informacijskog kapaciteta. Drugo, neefektivno korišćenje predajne snage. Dodatna snaga dodijeljena korisniku 2 ne bi donijela proporcionalno poboljšanje njegovog informacijskog kapaciteta zbog logaritamske prirode *Shannon*-ove krive. Pri visokim nivoima SNR-a, dodatno povećanje snage donosi sve manje povećanje kapaciteta. Na kraju, narušavanje principa pravednosti između korisnika. NOMA sistem primenjuje princip pravednosti (*fairness*) u alokaciji resursa, izbegavajući scenario optimizacije performansi odabranih korisnika na štetu ostalih. Iz tog razloga, u izrazu 3.19 koristi se funkcija koja uzima minimalnu vrijednost između 1 i rezultata izraza 3.18. Na taj način, koeficijent a_2 ne može preći vrijednost 1, čime se osigurava balans između performansi oba korisnika, tako da je konačna vrijednost koeficijenta snage korisnika 2 data izrazom 3.19:

$$a_2 = \min \left(1, \frac{(1+\varepsilon)P|h_2|^2}{\varepsilon(P|h_2|^2+n_2)} \right) \quad (3.19)$$

Ono što se zaključuje iz izraza 3.19 je da se dodjeljivanjem više snage korisniku 2, koji ima lošiji CSI, degradiraju performanse korisnika 1, pri čemu se ne može postići ciljni informacijski kapacitet korisnika 2. U tom slučaju se više snage dodjeljuje korisniku 1 radi poboljšanja njegovih performansi bez značajnijeg uticaja na performanse korisnika 2. Osim toga, zaključci ukazuju na to da dinamična alokacija snage u NOMA sistemima donosi povećanje ukupnog informacijskog kapaciteta u odnosu na fiksnu alokaciju snage. Ovaj pristup obezbjeđuje fleksibilnost u prilagođavanju snage prema individualnim potrebama korisnika, čime se unaprijeđuju performanse sistema u smislu pokrivenosti, informacijskog kapaciteta i spektralne efikasnosti.

3.5. Pouzdanost mMTC NOMA sistema

U cilju analize i ocjene pouzdanosti NOMA sistema, važno je koristiti odgovarajuće mjere ovih performansi. U ovom kontekstu, mjere vjerovatnoće otkaza - OP (*Outage Probability*) i vjerovatnoće greške po bitu BER (*Bit Error Rate*) igraju centralnu ulogu. OP predstavlja fundamentalnu metriku koja kvantifikuje ispunjenje servisnih standarda. Ona omogućava procjenu vjerovatnoće da sistem neće dostići minimalni zahtjevani prag kvaliteta ili da će doći do privremenog gubitka servisa tokom posmatranog vremenskog intervala. Ovaj pokazatelj pruža realnu sliku pouzdanosti NOMA sistema u promenljivim operativnim uslovima. Paralelno, stopa BER predstavlja esencijalnu metriku za evaluaciju preciznosti prenosa. BER kvantifikuje vjerovatnoću pogrešne detekcije pojedinih bita, čime direktno reflektuje kvalitet propagacije signala kanalom. Važno je naglasiti da varijabilnost vjerovatnoće otkaza zavisi od različitih faktora, uključujući nivo predajne snage, brzinu prenosa podataka, vremenske uslove i druge parametre. Ova analiza je od suštinskog značaja za optimizaciju NOMA sistema i unapređenje prenosa podataka.

Polazi se od sistema sa slike 3.1, pri čemu se fokusira na korisnike 1 i 2. Za ovaj specifičan scenario pretpostavimo da je kanal modelovan *Rayleigh*-evim fadingom, pri čemu se razmatra najekstremniji slučaj kada se kanal mijenja za svaki preneseni bit. Na strani predaje obavlja se superpozicija signala, a korisnicima se dodjeljuju koeficijenti na osnovu fiksne raspodjele snage, uz uslov da je $a_1 < a_2$. Superponirani signal se zatim šalje korisnicima prema izrazu 3.5. Korisnik 2 obavlja direktno dekodiranje svog signala, dok korisnik 1 mora izvršiti SIC proceduru kako bi

izdvojio svoj signal. Izraz 3.6 opisuje situaciju kada je SIC procedura savršena, odnosno kada nema dijela signala korisnika 2 u izdvojenom signalu korisnika 1. Međutim, u realnim scenarijima nesavršenost SIC procedure može dovesti do grešaka, a to utiče na BER. Pod nesavršenom SIC procedurom podrazumijeva se da je dio signala korisnika 2 ostao u izdvojenom signalu korisnika 1. Izraz 3.20 opisuje primljeni signal korisnika 1, uzimajući u obzir frakciju ϵ komponente signala korisnika 2 zbog greške prilikom SIC procedure, [15]:

$$y_1 = \sqrt{\epsilon} P \sqrt{a_1} x_1 h_1 + P \sqrt{a_2} x_2 h_1 + n_1 \quad (3.20)$$

Sa ovako primljenim signalom, informacijski kapacitet korisnika 2 izračunava se prema izrazu 3.21:

$$R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{a_2 P |h_2|^2}{\epsilon a_1 |h_1|^2 P + \sigma^2} \right) \quad (3.21)$$

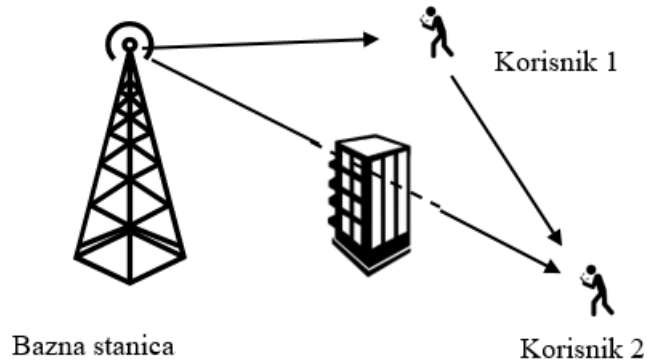
Poređenjem ovog izraza sa izrazom 3.8 zaključuje se da informacijski kapacitet raste u slučaju savršene SIC procedure. Ovo implicira da nesavršenost SIC-a negativno utiče na informacijski kapacitet kod korisnika sa boljim CSI. Za razmatranje OP i BER-a uključuje se analiza uticaja predajne snage. Zaključuje se da su OP i BER inverzno proporcionalni predajnoj snazi. Osim toga, važno je napomenuti da su karakteristike kanala korisnika ključni faktor koji doprinosi povećanju BER-a. Naime, kako se CSI korisnika poboljšava, signali koje prima postaju višeg nivoa, ali uz manje snage dodijeljene od strane bazne stanice. Kako se CSI pogoršava, snaga signala se smanjuje, što može rezultirati nižim SNR-om, smanjujući pouzdanost prenosa podataka. Osim CSI, važan faktor je i dodijeljeni koeficijent snage korisnicima. Ako korisniku sa boljim CSI nije dodijeljena dovoljna snaga, to može dodatno uticati na kvalitet prenosa podataka i povećati BER. Sa druge strane, korisniku sa lošijim CSI može biti dodijeljena veća snaga kako bi izvršio SIC proceduru i dekodirao signal, čime se smanjuje BER kod korisnika sa lošijim CSI, ali iz izraza 3.21 se zaključuje da se u tom slučaju smanjuje informacijski kapacitet korisnika sa boljim CSI. Ovakvi izazovi sa BER-om se javljaju posebno pri nižim vrijednostima SNR-a, gdje je pouzdan prenos podataka često kompromitovan. Smanjenje grešaka pri SIC proceduri može zahtijevati dodatne resurse i sofisticirane tehnike obrade signala kako bi se poboljšala pouzdanost sistema u takvim uslovima, [16].

3.6. Energetska efikasnost mMTC NOMA sistema

Još jedan bitan zahtjev koji se postavlja pred mMTC uređaje je energetska efikasnost. Rješenje za ovaj zahtjev se pronalazi u RF uređajima koji sakupljaju energiju iz elektromagnetnih signala koji su prisutni oko nas zbog konstantnog prenosa podataka od strane različitih sistema. Postoje dvije vrste protokola za sakupljanje snage. To su TS (*Time Switching*) i PS (*Power Splitting*). TS protokol se odnosi na uređaje koji rade u određenim vremenskim slotovima. Tokom prvog dijela jednog vremenskog slota, uređaj sakuplja elektromagnetnu energiju iz svog okruženja, dok u drugom dijelu tu sakupljenu energiju koristi za prenos podataka. PS protokol odnosi se na uređaje koji dijele primljenu snagu na sakupljanje energije iz okoline i dekodiranje informacija. Ovaj metod se još naziva i SWIPT (*Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*), [17].

Integracija SWIPT tehnologije sa kooperativnim NOMA sistemima donosi značajno poboljšanje energetske efikasnosti u mMTC okruženjima. Koncept kooperativnosti proističe iz inherentne karakteristike NOMA sistema da tokom SIC procesa, korisnik sa slabijim signalom prvo dekodira informacije korisnika sa višim nivoom signala kako bi izdvojio sopstveni signal. Ova procedura može se iskoristiti za asistiranje korisnicima sa lošijim kanalskim uslovima. Ključna prednost ovakvog pristupa leži u uspostavljanju dualnog komunikacionog puta ka korisniku u nepovoljnim kanalskim uslovima. Ako direktni link postane nedostupan, postoji alternativni put preko kooperativnog releja. Ovim se postiže redukcija vjerovatnoće prekida bez potrebe za dodatnim antenskim elementima, efektivno kreirajući virtuelno proširenje pokrivenosti. Na Slici 3.2 dat je primjer jednostavnog kooperativnog SWIPT NOMA sistema sa dva korisnika, pri čemu se korisnik koji ima bolji CSI ponaša kao DF (*Decode and Forward*) relej.

U prvom slučaju pretpostavimo da nema prepreke i da korisnik 2 može neometano primiti svoj signal, pri čemu se prenos obavlja u dva vremenska slota. Prvi slot se naziva direktni slot, a drugi slot se naziv relejni slot. U direktnom slotu bazna stanica šalje signale korisnicima 1 i 2. Korisnik 1 SIC procedurom dekodira signal korisnika 2, a zatim dekodira svoj signal. Zatim korisnik 2 dekodira svoj signal. Na kraju ovog slota informacioni kapacitet korisnika 1 i 2 su dati izrazima 3.22 i 3.23, respektivno.



Slika 3.2. Kooperativni SWIPT NOMA sistem

$$R_1 = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{a_1 P |h_1|^2}{\sigma^2} \right) \quad (3.22)$$

$$R_2 = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{a_2 P |h_2|^2}{a_1 |h_2|^2 P + \sigma^2} \right) \quad (3.23)$$

U relejnom slotu, korisnik 1 ima signal korisnika 2 i prosljeđuje ga korisniku 2. Informacioni kapacitet drugog korisnika, nakon relejnog slotu, je dat relacijom 3.24 pri čemu h_{12} predstavlja stanje na kanalu između korisnika 1 i 2:

$$R_2 = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P |h_{12}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (3.24)$$

Poređenjem izraza 3.23 i 3.24 se uočava da je informacioni kapacitet korisnika 2 nakon relejnog slotu veći od informacionog kapaciteta nakon direktnog slotu zato što nema interferencije od drugih transmisija. Iz izraza 3.24 zapažamo da nema koeficijenta snage jer je cijela snaga dodijeljena korisniku 2. Na kraju ova dva slotu korisnik 2 ima dvije kopije istog signala primljenih iz dva različita kanala. Nakon ovoga je potrebno iskoristiti neku od diversity tehnika kako bi signal bio uspješno dekodiran.

Drugi slučaj je kada bazna stanica prenosi signale do oba korisnika, pri čemu zbog prepreke korisnik 2 ne može primiti signal. Korisnik 1 ima bolji CSI pa je na osnovu toga više snage dodijeljeno drugom korisniku. S obzirom da se prvo mora dekodirati signal drugog korisnika, prvi korisnik ima kopiju signala drugog korisnika koju može iskoristiti da pomogne drugom korisniku

da dekodira svoj signal oponašajući DF relej. Ono što predstavlja problem u takvoj situaciji jeste snaga korisnika 1, jer mora prvo dekodirati signal drugog korisnika, zatim svoj signal, a zatim proslijediti signal drugog korisnika. Rješenje jeste upotreba SWIPT protokola na način da se cijeli prenos odvija u dva vremenska slota. U prvom slotu korisnik 1 dobija signal od bazne stanice koji je dat izrazom 3.25:

$$x = \sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2) \quad (3.25)$$

Nakon toga primjenjuje PS protokol, dio snage primljenog signala čuva iz primljenog signala dat izrazom 3.26, dok dio koristi za dekodiranje iz takvog signala datog izrazom 3.27. Pri tome φ predstavlja dio sakupljene energije, $1 - \varphi$ energiju preostalu za dekodiranje informacija, a n_{ps1} termalni šum u RF kolu sa nultom srednjom vrijednosti i varijansom σ^2 . Termalni šum ili *Johnson-ov* šum je električni šum koji nastaje usljed termalnog kretanja elektrona u provodnicima bez ikakvih spoljašnjih uticaja. Ovaj tip šuma je prisutan u svim elektronskim komponentama i ne može se u potpunosti eliminisati. U RF kolima za prikupljanje energije, termalni šum ima nultu srednju vrijednost i varijansu σ^2 , što znači da predstavlja *Gauss-ov* bijeli šum koji može degradirati kvalitet primljenog signala. Prisustvo termalnog šuma u PS protokolu je posebno važno jer direktno utiče na efikasnost prikupljanja energije, i izbor optimalnog faktora podjele snage φ . U drugom vremenskom slotu se koristi sačuvana energija za prosljeđivanje dekodirane informacije drugom korisniku.

$$y_1 = \sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2)h_1 + n_1 \quad (3.26)$$

$$y_{ps1} = \sqrt{1 - \varphi}y_1 + n_{ps1} \quad (3.27)$$

Nakon SIC procedure, informacioni kapacitet korisnika 1 je dat izrazom 3.28:

$$R_1 = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(1-\varphi)a_1P|h_1|^2}{\sigma^2} \right) \quad (3.28)$$

Snaga koja je sakupljena je data relacijom 3.29, pri čemu γ predstavlja efikasnost RF kola:

$$P_{ps} = \gamma\varphi|h_1|^2P \quad (3.29)$$

U drugom slotu, korisnik 1 prosljeđuje dekodirane informacije drugom korisniku snagom P_{ps} . Korisnik 2 prima signal dat izrazom 3.30, gdje h_{12} predstavlja kanal između korisnika:

$$y_2 = \sqrt{P_{ps}} x_1 h_{12} + n_2 \quad (3.30)$$

Na osnovu toga, informacijski kapacitet drugog korisnika je dat izrazom 3.31:

$$R_2 = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{ps} |h_{12}|^2}{\sigma^2} \right) \quad (3.31)$$

Pretpostavimo da su korisnicima dodijeljene snage i postavljen ciljani informacijski kapacitet od 1 b/s/Hz. U ovakvoj situaciji korisnik 1 ima konstantan informacijski kapacitet, dok drugi korisnik postiže bolji informacijski kapacitet sa povećanjem predajne snage. Informacijski kapacitet prvog korisnika je konstantan, zbog uloge DF releja, iako se povećava predajna snaga. Sa povećanjem predajne snage se postiže veći informacijski kapacitet drugog korisnika jer ima više snage za prosljeđivanje informacija drugom korisniku. Međutim, ono što se zaključuje kod prvog korisnika jeste da njegov informacijski kapacitet ne pada ispod ciljnog, tako da njegove performanse nisu narušene. Na ovaj način se ostvaruje bolja energetska efikasnost sistema, a pri tome se postiže bolji informacijski kapacitet korisnika koji ima lošiji CSI.

3.7. Kašnjenje u mMTC NOMA sistemu

Razmatranje efikasnih metoda za smanjenje kašnjenja u NOMA sistemima sa N korisnika je veoma važno za poboljšanje performansi uređaja za mMTC aplikacije. Posebno kada se koriste MAC (*Media Access Control*) protokoli bez prava slanja i GF tehnike. GF pristup pokazuje posebnu vrijednost u scenarijima sa nižom gustinom saobraćaja, omogućavajući efikasan prenos uz redukciju kašnjenja. NOMA sistemi koriste GF tehnike kako bi omogućili simultano servisiranje velikog broja uređaja kroz autonomni prenos bez prethodne autorizacije. Eliminacija procedura dodjele resursa smanjuje kašnjenje i istovremeno poboljšava efikasnost iskorišćenja dostupnih resursa. Treba istaći da GF metode nisu direktno primjenjive u OMA arhitekturama usljed ortogonalne prirode raspoređivanja ograničenih resursa. Ortogonalnost u OMA sistemima ograničava mogućnost simultanog prenosa od strane više korisnika u istom vremenskom slotu, što bi moglo rezultirati kolizijama, [18].

Ukupno kašnjenje u tradicionalnom *Grant-Based* (GB) pristupu može se izraziti kao zbir nekoliko komponenti: to su kašnjenje zahtjeva za pristup, kašnjenje čekanja na odobrenje, vrijeme prenosa podataka i vrijeme obrade na prijemnoj strani, što je dato izrazom 3.32:

$$D_{ukupno_GB} = D_{zahtjev} + D_{odobrenje} + D_{prenos} + D_{obrada} \quad (3.32)$$

U *Grant-Free* NOMA pristupu eliminišu se faze zahtjeva i odobrenja pristupa, što direktno smanjuje ukupno kašnjenje. Umjesto toga, koristi se kratka preambula koja omogućava detekciju aktivnih uređaja i procjenu kanala. Ukupno kašnjenje u GF pristupu postaje izraz 3.33:

$$D_{ukupno_GF} = D_{preambula} + D_{prenos} + D_{obrada} \quad (3.33)$$

$D_{preambula}$ je vrijeme potrebno za prenos preambule, koje je znatno kraće od kombinovanog vremena zahtjeva i odobrenja u GB pristupu. Teorijski, smanjenje kašnjenja može se kvantifikovati kao:

$$\Delta D = D_{ukupno_GB} - D_{ukupno_GF} = D_{zahtjev} + D_{odobrenje} - D_{preambula} \quad (3.34)$$

U kontekstu masivnih mašinskih komunikacija, vrijeme potrebno za razmjenu zahtjeva i odobrenja iznosi 10-20 ms, dok se preambula realizuje za 1-2 ms. Eliminacijom *grant* signalizacije kroz GF NOMA pristup postiže se smanjenje kašnjenja reda 80-90%, čime postaje izuzetno podesna za servise sa rigoroznim zahtjevima za minimalno kašnjenje. U kontekstu *uplink* GF NOMA prenosa sa N aktivnih korisnika i M raspoloživih resursa, vjerovatnoća kolizije predstavlja kritičan parameter koji utiče na efikasnost sistema. Ova vjerovatnoća može se aproksimirati pomoću modela slučajnog pristupa 3.35:

$$P_k \approx 1 - \left(1 - \frac{1}{M}\right)^{(N-1)} \quad (3.35)$$

Kada je broj aktivnih korisnika N znatno manji od broja raspoloživih resursa M , vjerovatnoća kolizije je minimalna, što predstavlja idealan operativni režim za GF NOMA sisteme. Međutim, u slučaju da dođe do kolizije, potrebna je retransmisija podataka, što uvodi dodatno kašnjenje. Efektivno kašnjenje sistema koje uzima u obzir mogućnost retransmisija može se izraziti pomoću relacije 3.36, gdje $R_{prosjek}$ predstavlja prosječan broj retransmisija. Iz ovog izraza je vidljivo da

održavanje niske vjerovatnoće kolizije kroz odgovarajuću raspodjelu resursa direktno utiče na smanjenje efektivnog kašnjenja.

$$D_{efektivno} = D_{ukupno_GF} \cdot (1 + P_k \cdot R_{prosjek}) \quad (3.36)$$

Raspodjela resursa za IoT uređaje može biti slučajna ili unaprijed definisana. Kada IoT uređaj nema podatke za prenos, ostaje u pasivnom stanju ili "sleep" modu kako bi uštedio energiju. Kada se generišu podaci za slanje, uređaj se aktivira, sinhronizuje podatke koristeći referentne signale i obavlja prenos kratke preambule prije samog GF prenosa podataka. Preambula ima višestruku funkciju u NOMA sistemima. Služi za detekciju aktivnih korisnika, odnosno bazna stanica detektuje koje je uređaje potrebno dekodirati, procjenu kanala jer omogućava procjenu stanja kanala za svaki aktivni uređaj i smanjuje vjerovatnoću kolizija kroz korišćenje ortogonalne ili pseudo-ortogonalne sekvence.

Dinamika aktivnosti uređaja može se modelovati kroz stopu dolazaka paketa λ , koja predstavlja prosječan broj paketa po vremenskoj jedinici za uređaj. Vjerovatnoća da je uređaj aktivan u datom vremenskom slotu iznosi $p = \lambda T_{slot}$, gdje je T_{slot} trajanje vremenskog slota. Za scenario sa ukupno N uređaja u sistemu, očekivan broj aktivnih uređaja u proizvoljnom vremenskom slotu može se izraziti pomoću 3.37:

$$N_{aktivni} = N p = N \lambda T_{slot} \quad (3.37)$$

Ovaj model pokazuje da se u sistemima sa sporadičnim saobraćajem, karakterističnim za mMTC aplikacije, broj istovremeno aktivnih uređaja može održavati na nivou koji je znatno manji od ukupnog broja uređaja u sistemu. To omogućava efikasnu raspodjelu ograničenih resursa i održavanje niske vjerovatnoće kolizije. Kombinacija GF pristupa i NOMA tehnike omogućava IoT uređajima da šalju podatke isključivo kada to zaista treba, čime se optimizuje upotreba resursa i znatno smanjuje ukupno vrijeme odziva sistema. Ova sinergetska kombinacija čini NOMA sisteme efikasnim rješenjem za mMTC komunikacije, posebno u odnosu na istovremene zahtjeve za smanjenjem kašnjenja, energetsom efikasnošću i podrškom za veliki broj sporadično aktivnih uređaja.

4. ANALIZA QoS PARAMETARA NOMA SISTEMA KROZ SIMULACIJE

U ovom poglavlju biće predstavljene simulacije koje su izvedene korišćenjem *Python* programskog jezika u razvojnom okruženju *Visual Studio Code*. Cilj simulacija je ispitivanje performansi NOMA sistema i njihovo poređenje sa OMA sistemima putem parametara koji su prethodno analizirani. Analizirani parametri uključuju informacijski kapacitet, kašnjenje, spektralnu efikasnost, pouzdanost sistema, energetska efikasnost i alokaciju snage. Simulacije su izvedene pod sljedećim uslovima:

- Pretpostavlja se da je u pitanju urbano okruženje, pa se na osnovu toga koristi tipična vrijednost *path loss* eksponenta 4. Ovo znači da snaga signala opada proporcionalno sa četvrtim stepenom udaljenosti između predajnika i prijemnika;
- Korišćen je model kanala sa *Rayleigh*-evim frekvencijski neselektivnim fadingom, pogodan za urbana okruženja gdje ne postoji direktna vidljivost između predajnika i prijemnika;
- Koeficijenti *Rayleigh*-og fadinga su generisani za sve korisnike sa kompleksnom *Gauss*-ovom raspodjelom sa nultom srednjom vrijednosti i varijansom 1, skalirani sa faktorom $d^{-\eta}$, gdje je d udaljenost korisnika, a η eksponent propagacionog gubitka;
- Dobitak kanala se izračunava kao kvadrat apsolutne vrijednosti koeficijentata fadinga za svakog korisnika;
- Generisani su slučajni binarni podaci za korisnike;
- Širina frekvencijskog opsega je postavljena na 1GHz. Ovaj široki opseg omogućava veće brzine prenosa podataka;
- Generisani su uzorci kompleksnog *Gauss*-ovog bijelog šuma za sve korisnike sa nultom srednjom vrijednosti i varijansom jednakom snazi šuma $\sigma^2 = n_0$;
- Snaga šuma se izračunava na osnovu širine opsega i iznosi -174 dBm. Ovo je važan parametar jer utiče na SNR, koji dalje utiče na pouzdanost komunikacije i broj korisnika koji mogu istovremeno prenositi informacije u jednom kanalu;
- Primjenjuje se BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) modulacija;

- Izvršena je ekvalizacija signala za korisnike dijeljenjem primljenog signala sa procijenjenim koeficijentom kanala;
- Primjenjuje se SIC tehnika;
- Korišćene su *Monte Carlo* simulacije koje su izvedene sa 10 000 realizacija kanala kako bi se obezbijedila statistička pouzdanost rezultata. Više realizacija omogućava preciznije procjene performansi sistema u različitim scenarijima.

Prilikom simulacija, pri svakoj iteraciji, nasumično se određuju udaljenosti korisnika, koji su zatim sortirani po udaljenosti od predajnika. Za svaku udaljenost, generisani su koeficijenti fadinga sa *Rayleigh*-om distribucijom, pri čemu se dobitak kanala za svakog korisnika računa kao kvadrat apsolutne vrijednosti koeficijenta fadinga. Sljedeći korak u simulaciji je alokacija snage svakom korisniku i računanje kapaciteta kanala u smislu broja korisnika koji mogu biti opsluživani. Kapacitet za OMA sistem računa se dijeljenjem resursa između korisnika, gdje svaki korisnik dobija svoj resurs. Kapacitet za NOMA sistem računa se uzimajući u obzir interferenciju između korisnika. U NOMA sistemima, korisnici dijele isti resurs, ali koriste različite koeficijente snage signala i tehnike dekodiranja za razdvajanje signala. Na kraju, dobijeni rezultati se uprosječavaju preko svih iteracija *Monte Carlo* simulacija. Ovakav pristup omogućava detaljnu analizu performansi komunikacionih sistema u različitim scenarijima i sa različitim parametrima, što je ključno za dizajn i optimizaciju modernih bežičnih mreža.

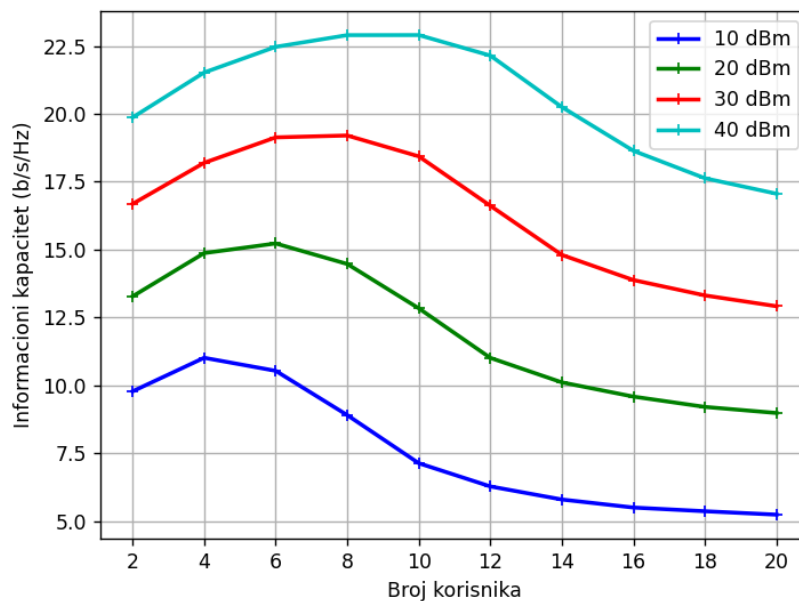
4.1. Masivna konektivnost

Simulacija izvedena u nastavku ispituje performanse NOMA sistema sa različitim predajnim snagama u zavisnosti od broja korisnika u sistemu. Parametri simulacije su sljedeći:

- Niz koji predstavlja različiti broj korisnika koji su povezani na baznu stanicu od 2 do 20, sa korakom 2;
- Svi korisnici su nasumično raspoređeni na udaljenostima između 200 i 1500m od bazne stanice;
- Niz različitih predajnih snaga koje se testiraju (10, 20, 30, 40dBm) koje se konvertuju u linearnu skalu;

- Primijenjena je fiksna alokacija snage prema formuli gdje se svakom korisniku dodjeljuje $3/4$ preostale snage, počevši od korisnika sa najlošijim CSI;
- Izračunava se teorijski informacioni kapacitet kanala koristeći *Shannon*-ovu formulu.

Cilj ove simulacije je da se odredi koliki je maksimalni broj podržanih korisnika u NOMA sistemu, pri čemu maksimalan broj podržanih korisnika predstavlja onaj broj korisnika koji se može opsluživati dok informacioni kapacitet još uvijek raste ili je na vrhuncu, prije nego što počne da opada. Na Slici 4.1 su prikazani rezultati simulacija informacionog kapaciteta u odnosu na broj korisnika za različite predajne snage.



Slika 4.1. Zavisnost informacionog kapaciteta u odnosu na broj korisnika

Simulacija pokazuje kako se informacioni kapacitet mijenja sa brojem korisnika za različite nivoe predajne snage. Može se uočiti da sa povećanjem broja korisnika dolazi do inicijalnog porasta informacionog kapaciteta, nakon čega slijedi period opadanja i stabilizacije. U ovoj simulaciji je predajna snaga postepeno povećavana. Kada se koristi 10dBm predajne snage, informacioni kapacitet opada nakon 4 korisnika, za 20dBm nakon 6 korisnika, za 30dBm nakon 8 korisnika, dok sa 40dBm predajne snage opadanje počinje nakon 10 korisnika. Dakle, povećanje broja korisnika bez degradacije performansi zahtijeva povećanje predajne snage.

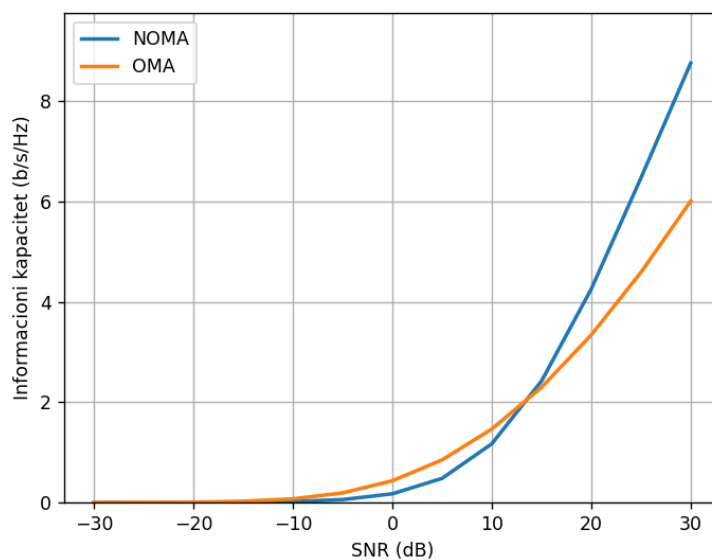
Zaključak simulacije je da se broj korisnika koji se mogu istovremeno multipleksirati ne može beskonačno povećavati zbog usložnjavanja SIC procesa, kašnjenja, kompleksnije alokacije snage i smanjenja informacionog kapaciteta. Za opsluživanje većeg broja korisnika, bez degradacije performansi, potrebno je povećati predajnu snagu ili koristiti hibridne NOMA tehnike koje kombinuju principe OMA i NOMA pristupa.

4.2. Informacioni kapacitet

Sljedeće simulacije su izvedene sa ciljem analize informacionog kapaciteta NOMA sistema u različitim uslovima. Prva simulacija ima za cilj da uporedi performanse NOMA i OMA sistema u zavisnosti od SNR-a, dok druga simulacija ispituje uticaj nivoa greške tokom izvršavanja SIC procedure na informacioni kapacitet korisnika. Parametri prve simulacije su sljedeće:

- Mreža sa tri korisnika koji su povezani na baznu stanicu sa različite udaljenosti od 20, 10 i 5m;
- Opseg SNR vrednosti od -114dB do -53dB sa korakom od 5dB. Ove vrijednosti su konvertovane iz dB u linearnu skalu;
- Za oba sistema (NOMA i OMA) izračunat je ukupni informacioni kapacitet svih korisnika koristeći *Shannon*-ovu formulu;
- Frekvencijski spektar kod OMA principa je podijeljen na tri jednaka dijela (faktor 1/3), pri čemu svaki korisnik dobija ekskluzivan frekvencijski opseg;
- Kod NOMA principa svi korisnici dijele isti frekvencijski spektar, a razdvajanje signala se obavlja na osnovu različitih nivoa snage, pri čemu se kod prijemnika primjenjuje SIC procedura (implicitno u formuli);
- Koristi se fiksna alokacija snage, pri čemu su koeficijenti pojedinačnih korisnika $a_1 = 0,75$, $a_2 = 0,1825$, $a_3 = 0,0675$.

Kod NOMA sistema informacioni kapacitet za svakog korisnika je izračunat uzimajući u obzir interferenciju drugih korisnika. Zatim je izračunata suma informacionih kapaciteta svih korisnika. Suma informacionog kapaciteta za NOMA i OMA sisteme je prikazana na Slici 4.2 u zavisnosti od SNR-a. Grafik prikazuje kako se kapaciteti mijenjaju sa porastom SNR-a.



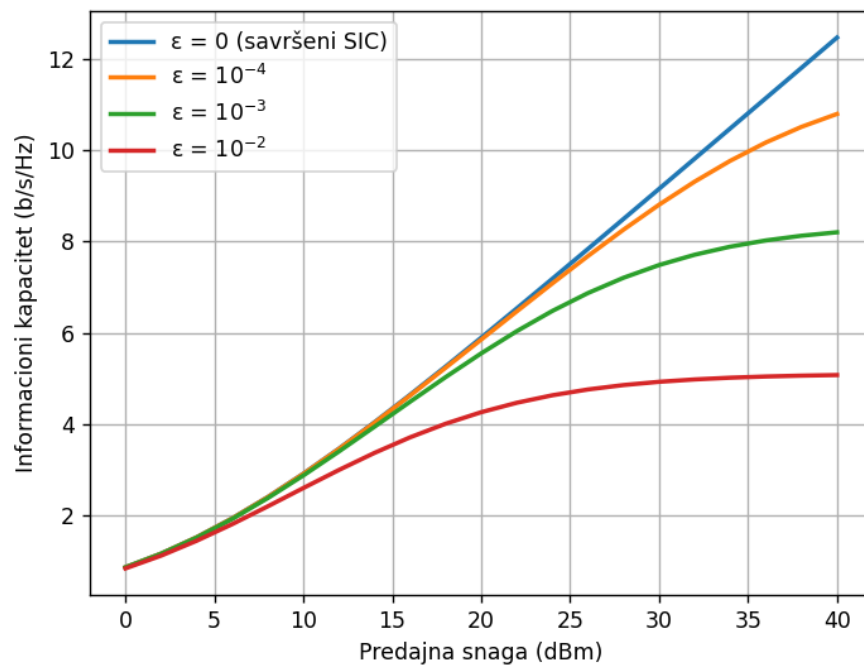
Slika 4.2. Zavisnost informacionog kapaciteta u odnosu na SNR kod NOMA i OMA sistema

Ovaj grafik ilustruje ključne prednosti i nedostatke NOMA i OMA sistema u različitim scenarijima SNR-a. Pokazuje se da OMA sistem ima prednost u oblasti niskih SNR vrijednosti, što je posljedica toga što korisnici nemaju međusobnu interferenciju jer im se dodjeljuju ortogonalni resursi. Kod NOMA sistema, interferencija nastala usljed istovremenog korišćenja istih resursa smanjuje performanse pri niskom SNR-u. Međutim, pri visokim vrijednostima SNR-a, NOMA sistem nadmašuje OMA zahvaljujući boljoj spektralnoj efikasnosti i optimalnijoj iskorišćenosti raspoloživih resursa.

Pored toga, mora se uzeti u obzir i to da na informacioni kapacitet utiče nivo greške prilikom izvršavanja SIC procedure. Cilj sljedeće simulacije je da se ispita kako nivo greške prilikom SIC tehnike utiče na informacioni kapacitet za korisnika sa boljim CSI u komunikacionom sistemu sa dva korisnika koji koriste istu baznu stanicu. Konkretno, cilj je da se analizira kako se informacioni kapacitet mijenja sa različitim nivoima greške SIC-a i predajne snage. Parametri ove simulacije su sljedeći:

- Mreža sa dva korisnika koji su povezani na baznu stanicu sa različite udaljenosti od 1000 i 500m;
- Opseg predajne snage od 0 do 40dBm sa korakom od 2dBm;

- Za svaki nivo predajne snage i svaku vrijednost greške SIC-a, izračunava se informacijski kapacitet korisnika 2 sa boljim CSI koristeći *Shannon*-ovu formulu;
- Greška SIC-a direktno utiče na rezidualni nivo interferencije od korisnika sa lošijim CSI, što se reflektuje u formuli za SNR;
- Koristi se fiksna alokacija snage pri čemu su koeficijenti pojedinačnih korisnika $a_1 = 0,75$, $a_2 = 0,25$;
- Različiti nivoi grešaka SIC procesa 0 , 10^{-4} , 10^{-3} i 10^{-2} . Savršeni SIC nema grešku odnosno vrijednost greške je 0 , dok veće vrijednosti predstavljaju veće greške u izvršavanju SIC procedure.



Slika 4.3. Zavisnost informacionog kapaciteta od predajne snage usljed različitog nivoa greške tokom izvršavanja SIC procedure

Grafik sa Slike 4.3 prikazuje zavisnost informacionog kapaciteta korisnika od predajne snage za različite nivoe grešaka prilikom izvršavanja SIC procedure, omogućavajući vizuelnu analizu kako ove dvije promjenljive utiču na performanse sistema. Plava linija pokazuje najveći postignuti informacijski kapacitet u poređenju sa ostalim linijama. To znači da kada SIC nema grešku, odnosno $\epsilon=0$ interferencija između korisnika se efikasno uklanja, omogućavajući maksimalni

informacioni kapacitet korisnicima. Kako predajna snaga raste, informacioni kapacitet takođe raste, ali pri većim nivoima predajne snage dolazi do zasićenja zbog efekta poboljšanja signala u odnosu na šum. Narandžasta, zelena i crvena linija predstavljaju veće nivoe greške SIC-a. Sa povećanjem vrijednosti ε , informacioni kapacitet opada jer greške tokom SIC-a dovode do veće rezidualne interferencije koja degradira performanse korisnika sa boljim CSI. Kod manjih predajnih snaga, razlike između različitih ε nisu toliko izražene. Međutim, kako predajna snaga raste, efekat nesavršenosti SIC-a postaje sve očigledniji, posebno pri većim vrijednostima ε . Na primjer, za $\varepsilon = 10^{-2}$ (crvena linija), informacioni kapacitet je najniži jer su greške u SIC procesu najveće, što dovodi do značajnog smanjenja korisnika koji mogu biti opsluženi zbog prisutne interferencije.

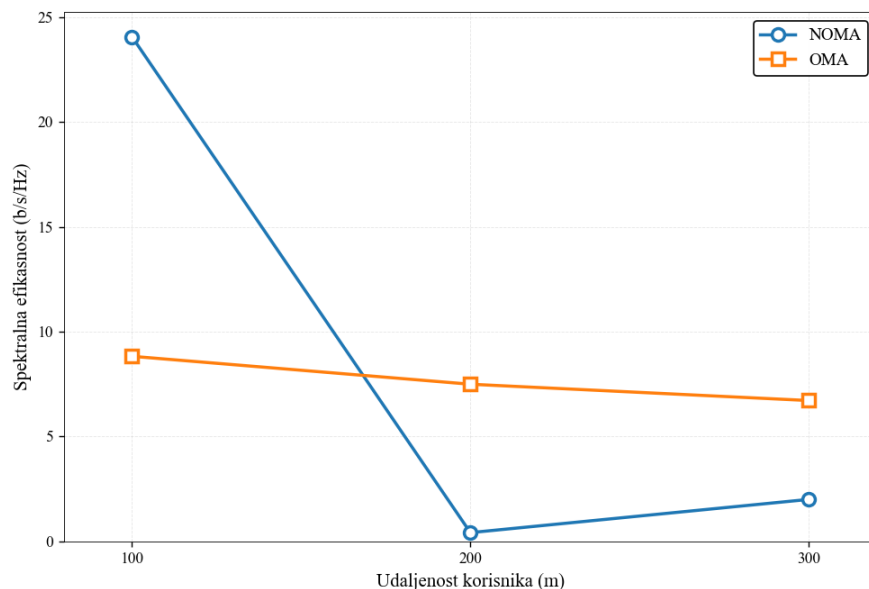
Na osnovu sprovedenih simulacija, može se zaključiti da NOMA sistem pokazuje bolje performanse u uslovima visokog SNR-a u poređenju sa OMA sistemom, zahvaljujući efikasnijoj iskorišćenosti spektralnih resursa. Međutim, performanse NOMA sistema znatno zavise od tačnosti izvršavanja SIC procedure, pri čemu čak i male greške tokom SIC-a mogu dovesti do evidentnog smanjenja informacionog kapaciteta, posebno pri visokim nivoima predajne snage.

4.3. Spektralna efikasnost

Sprovedena simulacija ima za cilj da uporedi spektralnu efikasnost OMA i NOMA sistema za različite udaljenosti korisnika od bazne stanice. Parametri simulacije su sljedeći:

- Mreža sa tri korisnika koji su povezani na baznu stanicu sa različite udaljenosti od 100, 200 i 300m;
- Trajanje jednog vremenskog slota 1ms;
- Predajna snaga 30dBm i konvertovana u linearnu skalu;
- Frekvencijski spektar kod OMA principa je podijeljen na tri jednaka dijela, pri čemu svaki korisnik koristi 1/3 ukupne širine opsega bez međusobne interferencije;
- Kod NOMA principa svi korisnici simultano koriste punu širinu spektra;
- Koristi se fiksna alokacija snage pri čemu su koeficijenti pojedinačnih korisnika $a_1 = 0,75$, $a_2 = 0,1875$, $a_3 = 0,0625$.

Spektralna efikasnost je izračunata kao odnos informacionog kapaciteta i širine frekvencijskog opsega, čime se kvantifikuje efikasnost iskorišćenosti spektra. U cilju komparativne analize, spektralna efikasnost OMA i NOMA sistema analizirana je u funkciji udaljenosti korisnika od bazne stanice. Rezultati prikazani na Slici 4.4 ilustruju kako prostorna distribucija korisnika utiče na spektralnu efikasnost oba sistema.



Slika 4.4. Zavisnost spektralne efikasnosti od udaljenosti korisnika kod NOMA i OMA sistema

Spektralna efikasnost za OMA sisteme pokazuje kako svaki korisnik efikasno koristi dodijeljeni frekvencijski opseg. Kako se udaljenost korisnika povećava, spektralna efikasnost opada zbog smanjenja snage signala i izraženijeg uticaja *multipath* fedinga. NOMA sistem ostvaruje bolju ukupnu spektralnu efikasnost zahvaljujući mogućnosti simultanog prenosa podataka više korisnika na istom frekvencijskom spektru uz primjenu SIC ptehnike za upravljanje interferencijom. Međutim, rezultati pokazuju izraženi *trade off* između korisnika. Korisnik sa najboljim CSI koji se nalazi na udaljenosti 100m postiže spektralnu efikasnost skoro 24b/s/Hz u poređenju sa OMA na oko 9b/s/Hz. Nasuprot tome, udaljeniji korisnici imaju nižu spektralnu efikasnost u odnosu na OMA što je posljedica rezidualne interferencije od korisnika sa boljim CSI. Uprkos tome, ukupna spektralna efikasnost kod NOMA sistema je evidentno bolja nego kod OMA sistema.

U zaključku simulacije, rezultati potvrđuju da NOMA sistem nudi bolju spektralnu efikasnost u poređenju sa OMA sistemom skoro za 13%. Simultano korišćenje spektralnih resursa od strane više korisnika omogućava NOMA sistemu da postigne značajno bolje performanse, čime se potvrđuje njegov potencijal kao ključne tehnologije za buduće bežične mreže sa visokim zahtjevima u pogledu spektralne efikasnosti.

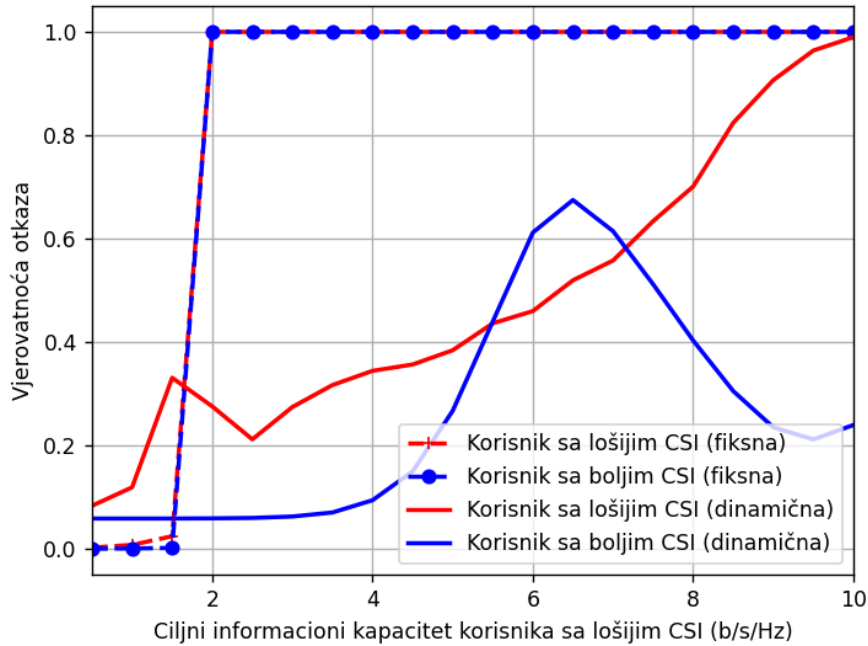
4.4. Raspodjela snage

Naredna simulacija je izvedena kako bi se analizirale performanse NOMA sistema u uslovima različitih principa alokacije snage. Analiziraće se uticaj fiksne i dinamične alokacije snage na vjerovatnoću otkaza sistema za korisnike sa boljim i lošijim karakteristikama kanala. Cilj ove simulacije je da demonstrira prednosti dinamične alokacije snage u NOMA sistemima u poređenju sa fiksnom alokacijom snage, posebno u kontekstu različitih karakteristika kanala korisnika. Parametri simulacije su sljedeći:

- Mreža sa dva korisnika koji su povezani na baznu stanicu sa različite udaljenosti od 1000 i 500m;
- Maksimalna predajna snaga bazne stanice 30dBm;
- Vrijednosti ciljnog informacionog kapaciteta korisnika sa lošijim CSI je u opsegu od 0,5 do 10b/s/Hz sa korakom od 0,5 b/s/Hz;
- Za svakog korisnika izračunat je SNR uzimajući u obzir interferenciju od drugog korisnika i šum na kanalu;
- Koeficijenti fiksne alokacije snage 0,75 za korisnika sa lošijim CSI i 0,25 za korisnika sa boljim CSI;
- Koeficijenti dinamične alokacije snage prilagođavaju se u skladu sa karakteristikama kanala i ciljnim informacionim kapacitetom korisnika sa lošijim CSI za svaku iteraciju. Koeficijent za korisnika sa lošijim CSI izračunava se prema formuli koja obezbjeđuje da korisnik dostigne svoj ciljni informacioni kapacitet kada je to moguće, dok se preostala snaga dodjeljuje korisniku sa boljim CSI. Kada ciljni kapacitet premašuje mogućnosti kanala, cijela snaga se dodjeljuje korisniku sa boljim CSI;

- Vjerovatnoća otkaza se računa kao udio simulacija u kojima ostvareni informacijski kapacitet korisnika nije zadovoljio postavljenu ciljnu vrijednost. Za korisnika sa lošijim CSI, otkaz nastaje kada njegov kapacitet padne ispod ciljne vrijednosti. Za korisnika sa boljim CSI, otkaz nastaje kada njegov kapacitet ili kapacitet koji postiže prilikom dekodiranja signala korisnika sa lošijim CSI (uz primjenu SIC) padne ispod ciljne vrijednosti.

Rezultati su prikazani na Slici 4.5. Grafik prikazuje kako se vjerovatnoće otkaza za oba korisnika mijenjaju sa promjenom vrijednosti ciljnog informacionog kapaciteta, za fiksnu i dinamičnu alokaciju snage.



4.5. Vjerovatnoća otkaza u odnosu na povećanje ciljanog informacionog kapaciteta korisnika sa lošijim CSI

U slučaju primjene dinamične alokacije snage, vjerovatnoća otkaza korisnika sa boljim CSI prvo raste, dostiže svoju maksimalnu vrijednost, a zatim počinje da opada. Kada je ciljni informacijski kapacitet u opsegu od 0 do 6,5 b/s/Hz, korisniku sa lošijim CSI se dodjeljuje više snage čime se degradiraju performanse korisnika sa boljim CSI. Međutim, iznad 6,5 b/s/Hz, bilo koja vrijednost koeficijenta snage neće zadovoljiti ciljni informacijski kapacitet korisnika sa lošijim CSI. U tom

slučaju, pravilno je favorizovati korisnika sa boljim CSI umjesto da trošimo svu snagu na korisnika sa lošijim CSI. Ovo dovodi do smanjenja vjerovatnoće otkaza korisnika sa boljim CSI, bez uticaja na performanse korisnika sa lošijim CSI. Dodatno, dinamična alokacija snage dovodi do boljeg ukupnog informacionog kapaciteta u poređenju sa fiksnom alokacijom snage, jer bolje raspoređuje dostupnu snagu korisnicima u zavisnosti od njihovih potreba i trenutnih uslova.

Sa druge strane, fiksna alokacija snage karakteriše se monotonim rastom vjerovatnoće otkaza sa povećanjem ciljnog informacionog kapaciteta. Grafik pokazuje da su vjerovatnoće otkaza za korisnike sa boljim i lošijim CSI gotovo identične kroz cijeli opseg ciljnih vrijednosti. Ova sličnost u performansama proizilazi iz činjenice da fiksna alokacija ne prilagođava raspodjelu snage promjenama u zahtjevima korisnika ili uslovima kanala. Sa povećanjem ciljnog informacionog kapaciteta, sistem se približava granicama svojih mogućnosti, što dovodi do kontinuiranog rasta vjerovatnoće otkaza za oba korisnika. Ovakvo ponašanje ukazuje na ograničenja fiksnog pristupa u optimizaciji resursa.

Može se zaključiti da dinamična alokacija snage omogućava bolje balansiranje između korisnika, garantovanjem bolje pouzdanosti za korisnika sa boljim CSI bez značajnog degradiranja performansi korisnika sa lošijim CSI. Pored toga, dinamične alokacije snage omogućava postizanje pravednosti između korisnika odnosno *fairness* u pogledu raspodjele snage i povećanje ukupnog informacionog kapaciteta. Ovi rezultati pokazuju da je dinamična alokacija snage efikasnija u održavanju visokih performansi mreže u poređenju sa fiksnom alokacijom snage.

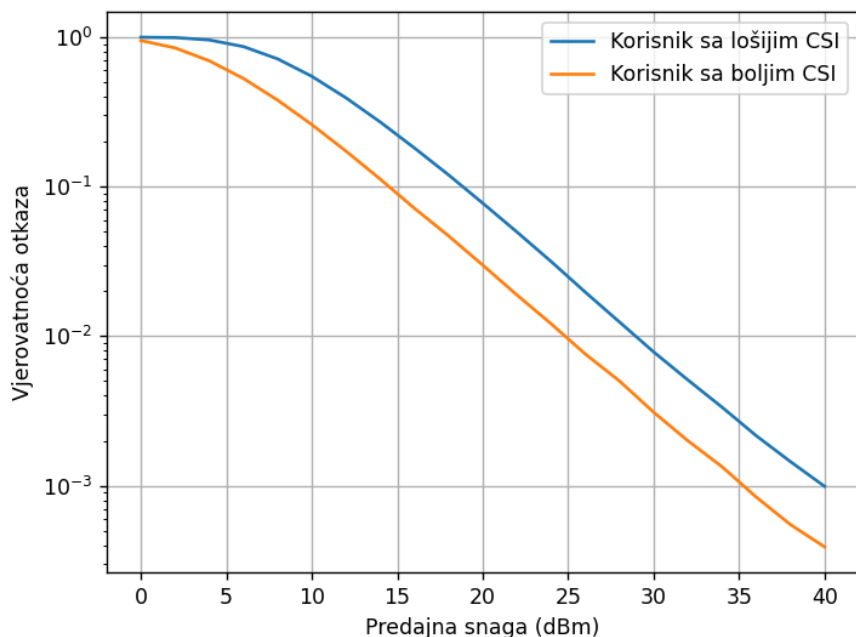
4.5. Pouzdanost

U cilju sveobuhvatne evaluacije performansi NOMA sistema, sprovedene su dvije komplementarne simulacije koje analiziraju ključne metrike kvaliteta usluge. Prva simulacija fokusira se na vjerovatnoću otkaza, dok druga ispituje BER, čime se obezbjeđuje kompletan uvid u pouzdanost i efikasnost NOMA pristupa. Parametri simulacije su sljedeći:

- Mreža sa dva korisnika koji su povezani na baznu stanicu sa različite udaljenosti od 1000 i 500m;

- Koeficijent fiksne alokacije snage 0,75 dodijeljen je korisniku sa lošijim CSI, dok je 0,25 dodijeljen korisniku sa boljim CSI;
- Opseg predajne snage definisan je od 0 do 40dBm sa korakom od 2dBm i konvertovan u linearnu skalu;
- Definisani su ciljne vrijednosti informacionih kapaciteta od 1b/s/Hz za korisnika sa lošijim CSI i 2b/s/Hz za korisnika sa boljim CSI zbog računanja vjerovatnoće otkaza;
- Vjerovatnoća otkaza računa se kao udio simulacija u kojima ostvareni informacioni kapacitet nije dostigao postavljenu ciljnu vrijednost. Za korisnika sa lošijim CSI, otkaz nastaje kada njegov informacioni kapacitet padne ispod 1 b/s/Hz. Za korisnika sa boljim CSI, otkaz nastaje kada njegov informacioni kapacitet padne ispod 2 b/s/Hz ili kada ne može uspješno dekodirati signal korisnika sa lošijim CSI;
- Za korisnika sa lošijim CSI izračunat je SINR (*Signal to Interference Plus Noise Ratio*) uzimajući u obzir interferenciju od korisnika sa boljim CSI i šum. Za korisnika sa boljim CSI izračunata su dva SINR-a: jedan za dekodiranje signala korisnika sa lošijim CSI (uz interferenciju od sopstvenog signala) i drugi za dekodiranje sopstvenog signala (uz pretpostavku potpunog uklanjanja interferencije SIC procedurom);
- BER za svakog korisnika izračunat je kao prosječan broj pogrešno dekodiranih bitova u odnosu na ukupan broj poslanih bitova kroz sve iteracije;
- Izračunate su teorijske vrijednosti BER-a na osnovu prosječnih SNR vrijednosti za oba korisnika, uzimajući u obzir karakteristike BPSK modulacije i *Rayleigh* fedinga. Za korisnika sa lošijim CSI koristi se formula koja uzima u obzir interferenciju od korisnika sa boljim CSI. Za korisnika sa boljim CSI formula uzima u obzir propagaciju greške prilikom SIC dekodiranja i sopstveni šum.

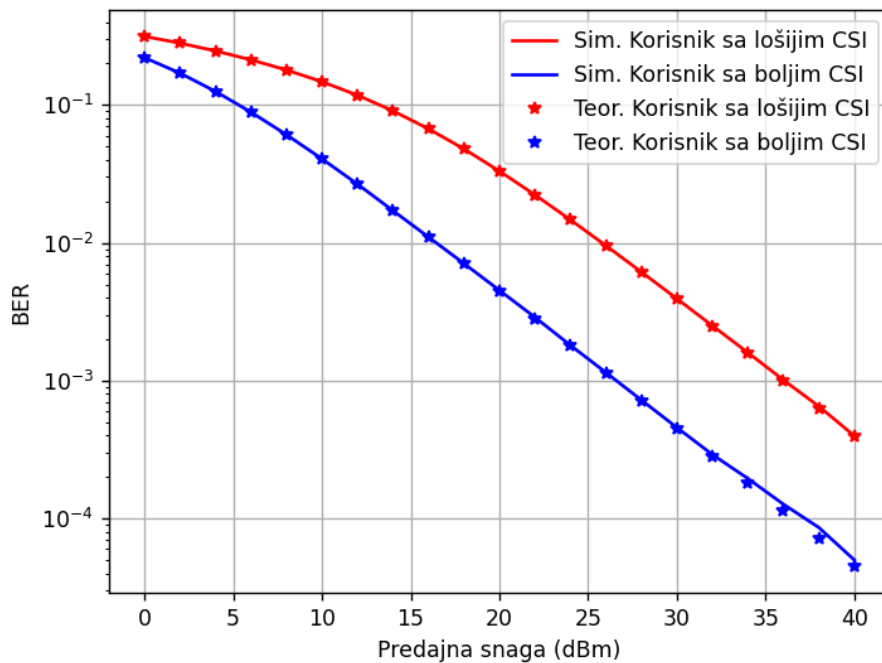
Rezultati simulacije dati na Slici 4.6 demonstriraju kako različiti nivoi predajne snage utiču na performanse oba razmatrana korisnika u NOMA sistemu, sa fokusom na vjerovatnoću otkaza korisnika.



4.6. Vjerovatnoća otkaza u odnosu na predajnu snagu za NOMA i OMA sisteme

Vjerovatnoća otkaza korisnika sa lošijim CSI se smanjuje sa povećanjem predajne snage, što znači da veća predajna snaga omogućava korisniku sa lošijim CSI da postigne ciljni informacijski kapacitet. Vjerovatnoća otkaza korisnika sa boljim CSI također se smanjuje sa povećanjem predajne snage, ali je dodatno pogoršana interferencijom od strane korisnika sa lošijim CSI.

Druga simulacija ima za cilj je da procijeni BER za korisnike, koristeći BPSK modulaciju, kao i da se uporede rezultati sa teorijskim vrijednostima. Izračunate su teorijske vrijednosti BER-a na osnovu SNR-a. BER za oba korisnika je prikazan na Slici 4.7 u zavisnosti od predajne snage. Prikazane su simulirane i teorijske vrijednosti BER-a za poređenje.



4.7. Zavisnost BER-a u odnosu na predajnu snagu korisnika

Pokazana komparativna analiza vjerovatnoće otkaza i BER-a pokazuje da povećanje predajne snage konzistentno poboljšava performanse NOMA sistema. Teorijske vrijednosti BER-a se poklapaju sa simuliranim vrijednostima, što potvrđuje ispravnost modela i pristupa. BER za oba korisnika opada sa povećanjem predajne snage, što je očekivano jer veća predajna snaga omogućava bolji kvalitet signala. Korisnik sa lošijim CSI ima veći BER u poređenju sa korisnikom sa boljim CSI zbog veće udaljenosti i slabijeg signala.

Ovi rezultati pružaju važan doprinos razumijevanju faktora koji determinišu pouzdanost NOMA komunikacionih sistema. Povećanje predajne snage značajno poboljšava performanse NOMA sistema kroz smanjenje vjerovatnoće otkaza i BER-a za oba korisnika. Korisnik sa lošijim CSI, uprkos većem BER-u, može postići zadovoljavajuće performanse uz odgovarajuću predajnu snagu. Ključni izazov ostaje upravljanje interferencijom kod korisnika sa boljim CSI, što ukazuje na potrebu za pažljivim balansom između povećanja predajne snage i implementacije tehnika za suzbijanja interferencije. Sve navedeno ukazuje da NOMA sistem može efikasno opsluživati korisnike sa različitim kvalitetom kanala, što je važna prednost u odnosu na OMA pristupe.

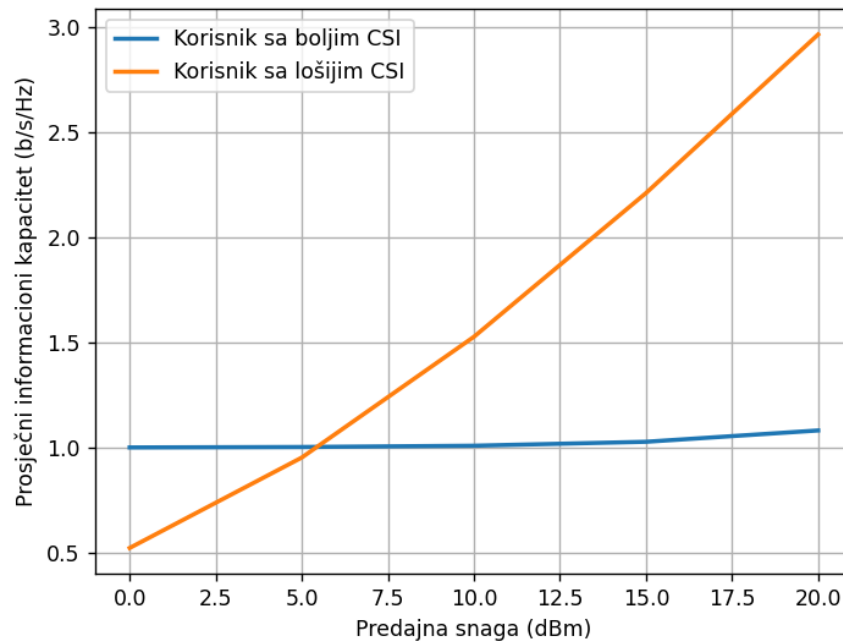
4.6. Energetska efikasnost

Sljedeća simulacija ispituje performanse NOMA sistema u kojem je implementirana SWIPT tehnologija. U ovom scenariju, korisnik sa boljim CSI ima dvostruku ulogu: sakuplja energiju iz primljenog signala bazne stanice i djeluje kao kooperativni relej za prosljeđivanje signala korisniku sa lošijim CSI. Cilj je da se analizira kako se informacijski kapacitet oba korisnika mijenja u funkciji predajne snage, pri čemu se posebna pažnja posvećuje procesu prikupljanja energije i njegovom uticaju na ukupne performanse sistema. Parametri simulacije su sljedeći:

- Mreža sa dva korisnika koji su povezani na baznu stanicu;
- Korisnik sa boljim CSI je na udaljenosti od 10m od bazne stanice, dok je korisnik sa lošijim CSI na udaljenosti od 10m od korisnika sa boljim CSI (ukupno 20m od bazne stanice preko releja);
- Definisan je opseg predajne snage od 0 do 20dBm sa korakom od 5dBm;
- Koeficijenti fiksne alokacije snage su 0,8 za korisnika sa lošijim CSI i 0,2 za korisnika sa boljim CSI;
- Ciljni informacijski kapacitet je postavljen na 1b/s/Hz za oba korisnika;
- Korisnik sa boljim CSI koristi PS protokol gdje dijeli primljenu snagu na dva dijela, jedan dio koristi za prikupljanje energije, a preostali dio za dekodiranje informacija. Ovaj faktor podjele se dinamički prilagođava u zavisnosti od stanja kanala i nivoa predajne snage;
- Snaga koju korisnik sa boljim CSI prikuplja izračunava se uzimajući u obzir predajnu snagu bazne stanice, dobitak kanala između bazne stanice i korisnika sa boljim CSI, koeficijent alokacije snage i efikasnost prikupljanja energije;
- Prenos se odvija u dvije faze. U prvoj fazi, bazna stanica šalje superponirani signal ka oba korisnika. Korisnik sa boljim CSI dekodira signale oba korisnika uz simultano prikupljanje energije iz primljenog signala. Dok u drugoj fazi koristi prikupljenu energiju da reemituje signal prema korisniku sa lošijim CSI, djelujući kao kooperativni relej;
- Za korisnika sa boljim CSI, informacijski kapacitet se izračunava na osnovu SINR-a pri čemu se uzima faktor od 0,5 zbog dvofaznog prenosa. Za korisnika sa lošijim CSI, informacijski kapacitet se izračunava na osnovu odnosa SNR koji koristi prikupljenu snagu od korisnika sa boljim CSI;

- Za korisnika sa boljim CSI, otkaz nastaje ako njegov informacijski kapacitet ili kapacitet za dekodiranje signala korisnika sa lošijim CSI padne ispod ciljane vrijednosti od 1b/s/Hz. Za korisnika sa lošijim CSI, otkaz nastaje ako njegov informacijski kapacitet preko *relay* linka padne ispod iste ciljane vrijednosti;
- Efikasnost prikupljanja energije postavljena na 70%, što znači da korisnik sa boljim CSI može iskoristiti 70% prikupljene RF energije;
- Konstanta postavljena na 10^{-6} kako bi se osigurala nenegativnost rezultata i izbjegle numeričke nestabilnosti.

Na Slici 4.8 dati su rezultati simulacije. Prikazan je prosječni dostignuti informacijski kapacitet za oba korisnika u zavisnosti od predajne snage.



Slika 4.8. Zavisnost informacionog kapaciteta od predajne snage kod SWIPT NOMA sistema

Grafik pokazuje da se informacijski kapacitet korisnika sa boljim CSI kreće oko 1b/s/Hz, dok se informacijski kapacitet korisnika sa lošijim CSI povećava sa povećanjem predajne snage. Ovo zasićenje korisnika sa boljim CSI je rezultat sakupljanja energije. Kada korisnik sa boljim CSI dostigne ciljni informacijski kapacitet korisnika sa lošijim CSI, sva preostala snaga se sakuplja. Čak i ako se poveća predajna snaga, postignuti informacijski kapacitet korisnika sa boljim CSI je

i dalje ograničen zbog procesa sakupljanja energije. Pozitivna strana ovog procesa je da ciljni informacioni kapacitet korisnika sa boljim CSI od 1b/s/Hz nije narušen. Dakle, ovo zasićenje u informacionom kapacitetu ne dovodi do značajnog prekida kod korisnika sa boljim CSI. Korisnik sa boljim CSI prikuplja energiju od signala bazne stanice i ponovo prenosi signal ka korisniku sa lošijim CSI. Njegova dostignuta brzina prenosa zavisi od efikasnosti prikupljanja energije i snage signala. Korisnik sa lošijim CSI prima signal od korisnika sa boljim CSI koji djeluje kao relej. Njegova dostignuta brzina prenosa zavisi od prikupljene snage i ponovo prenijete od strane korisnika sa boljim CSI.

Zaključak simulacije je da rezultati jasno ilustruju dualnu funkcionalnost korisnika sa boljim CSI u SWIPT NOMA arhitekturi. Proces prikupljanja energije dovodi do zasićenja informacionog kapaciteta, ali bez negativnog uticaja na performanse korisnika jer je ciljni prag konzistentno zadovoljen. Istovremeno, prikupljena energija omogućava efikasnu *relay* funkcionalnost koja progresivno poboljšava informacioni kapacitet korisnika sa lošijim CSI sa povećanjem predajne snage. Ova simulacija potvrđuje SWIPT NOMA sistem kao kandidata za scenarije gdje su energetska efikasnost i proširenje pokrivenosti ključni zahtjevi.

4.7. Kašnjenje

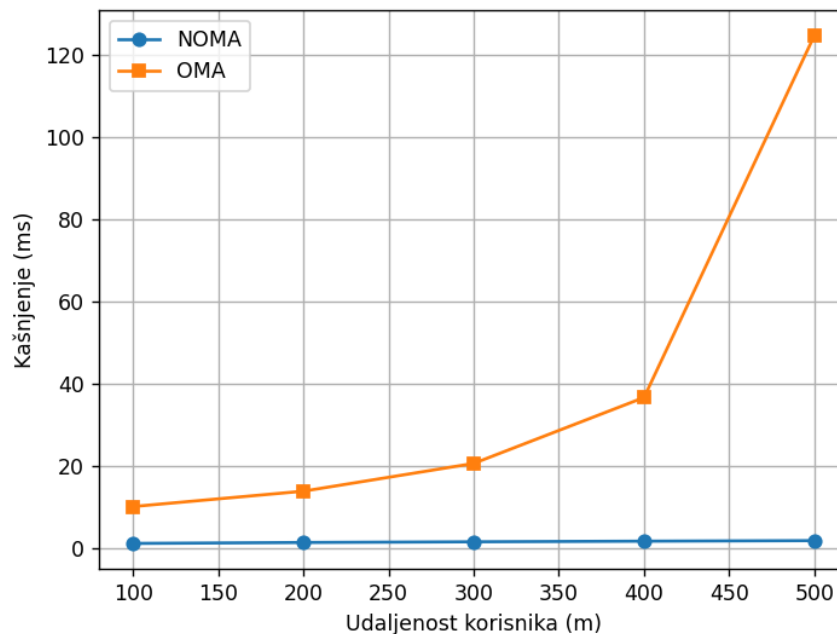
Simulacija je sprovedena kako bi se uporedila kašnjenja u NOMA i OMA sistemima za različite udaljenosti korisnika od bazne stanice. Cilj je da se analizira kako različite metode pristupa resursima utiču na ukupno kašnjenje za korisnike. Pretpostavljamo da se u OMA sistemu svakom korisniku dodjeljuje različiti vremenski slot za prenos, dok u NOMA sistemu korisnici dijele isti vremenski slot uz različite koeficijente alokacije snage. Parametri simulacije su sljedeći:

- Mreža sa pet korisnika koji su povezani na baznu stanicu sa različite udaljenosti od 100, 200, 300, 400 i 500m;
- Trajanje jednog vremenskog slota 1ms;
- Predajna snaga 30dBm;
- U OMA sistemu, svaki korisnik dobija ekskluzivan vremenski slot za prenos podataka. Kašnjenje za svakog korisnika izračunava se kao odnos broja realizacija i prosječnog informacionog kapaciteta kanala, skaliran sa trajanjem vremenskog slota i brojem

korisnika u sistemu. Faktor broja korisnika odražava činjenicu da svaki korisnik mora čekati dok drugi korisnici ne završe svoje slotove;

- U NOMA sistemu, svi korisnici simultano koriste isti vremenski slot. Kašnjenje se izračunava kao odnos broja iteracija i prosječnog informacionog kapaciteta, skaliran samo sa trajanjem vremenskog slota. Pri računanju informacionog kapaciteta uzima se u obzir interferencija od svih ostalih korisnika koji istovremeno koriste isti resurs;
- Za OMA sistem, informacioni kapacitet korisnika izračunava se na osnovu SNR-a bez međukorisničke interferencije. Za NOMA sistem, informacioni kapacitet se izračunava uzimajući u obzir interferenciju od svih ostalih korisnika, pri čemu ukupna interferencija predstavlja zbir signala svih korisnika osim posmatranog korisnika plus šum na kanalu.

Na Slici 4.9 dati su rezultati dobijeni simulacijom. Pokazana je zavisnost kašnjenja od udaljenosti korisnika za oba sistema.



Slika 4.9. Zavisnost kašnjenja od udaljenosti korisnika kod OMA i NOMA sistema

Grafik pokazuje da kašnjenje raste sa povećanjem udaljenosti korisnika od bazne stanice. Ovo je očekivano jer slabiji signal na većim udaljenostima dovodi do smanjenog informacionog kapaciteta, što povećava vrijeme potrebno za prenos istog broja podataka. U NOMA sistemu, korisnici dijele isti vremenski slot koristeći različite koeficijente alokacije snage. Ovo omogućava

simultani prenos podataka različitim korisnicima, smanjujući potrebu za čekanjem na odobrenje pristupa.

Zaključak simulacije je da NOMA sistem ima niže kašnjenje u poređenju sa OMA sistemom za sve udaljenosti korisnika. Ovo se dešava zbog efikasnije upotrebe resursa i mogućnosti simultanog prenosa. Kašnjenje u NOMA sistemu raste sa povećanjem udaljenosti korisnika, ali ostaje značajno niže u poređenju sa OMA sistemom. Dodatno, kako broj korisnika raste, OMA sistem može postati neefikasan zbog potrebe za dodjelom odvojenih resursa svakom korisniku. Dok, nasuprot tome, NOMA omogućava bolju skalabilnost, omogućavajući većem broju korisnika da istovremeno prenose podatke. Ovi rezultati pokazuju prednosti NOMA sistema u pogledu kašnjenja i poboljšanja ukupne efikasnosti mreže, što ga čini pogodnim za buduće komunikacione tehnologije koje zahtijevaju visoke performanse i nisko kašnjenje.

Na osnovu sveobuhvatne analize sprovedenih simulacija, potvrđeno je da NOMA pristupi predstavljaju superiornu tehnologiju u odnosu na OMA u kontekstu masivnih komunikacija mašinskog tipa. Rezultati demonstriraju da NOMA omogućava opsluživanje značajno većeg broja korisnika uz povećanje predajne snage, pri čemu se postiže do tri puta veća spektralna efikasnost u poređenju sa OMA sistemima. Analiza informacionog kapaciteta pokazuje da NOMA ima bolje performanse u odnosu na OMA pri visokim vrijednostima SNR-a, iako nesavršenost SIC procedure može degradirati performanse korisnika sa boljim CSI. Dinamična alokacija snage se izdvaja kao ključni faktor za optimizaciju sistema, omogućavajući balans između fernosti korisnika i povećanja ukupnog informacionog kapaciteta. U domenu pouzdanosti, potvrđeno je da povećanje predajne snage konzistentno smanjuje vjerovatnoću otkaza i BER za korisnike sa boljim i lošijim CSI. Integracija SWIPT tehnologije sa NOMA pristupom omogućava znatno povećanje energetske efikasnosti, što je od velikog značaja za mMTC aplikacije sa ograničenim energetske resursima. Pored toga, NOMA sistemi ostvaruju niže kašnjenje u odnosu na OMA sisteme zahvaljujući GF tehnikama i simultanom opsluživanju korisnika. Ovi rezultati jednoznačno potvrđuju da NOMA tehnike ispunjavaju servisne zahtjeve 5G mreža, čineći ih ključnom tehnologijom za realizaciju masivnih komunikacija mašinskog tipa i postavljajući temelje za šestu generaciju i dalji razvoj budućih generacija mobilnih mreža.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu izvršena je sveobuhvatna analiza neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa u kontekstu masivnih komunikacija mašinskog tipa u 5G mrežama. Polazeći od pregleda razvoja mobilnih mreža i tehnika višestrukog pristupa, kroz detaljnu teorijsku analizu demonstrirane su ključne prednosti NOMA sistema u odnosu na ortogonalne pristupe. Navedena analiza je obuhvatila matematičko modelovanje u cilju dobijanja matematičkih izraza za informacijski kapacitet, energetska i spektralna efikasnost, vjerovatnoću otkaza i vjerovatnoću greške, uzimajući u obzir uticaj greške SIC procedure i *Rayleigh* fadinga i analizu strategija raspodjele snage. Razvijen je analitički okvir za evaluaciju performansi NOMA sistema u mMTC scenarijima, pri čemu je pokazano da NOMA sistemi kroz multipleksiranje u domenu snage i primjenu SIC tehnike, omogućavaju simultano opsluživanje znatno većeg broja korisnika u jednom resursnom bloku u poređenju sa OMA sistemima. Izvršena je detaljna komparacija fiksne i dinamične alokacije snage u NOMA sistemima, pri čemu je pokazano da dinamična alokacija snage obezbjeđuje do 25% manju vjerovatnoću otkaza u poređenju sa fiksnom alokacijom, istovremeno održavajući princip pravednosti između korisnika. U prilog tome su izvedeni analitički izrazi za koeficijente alokacije snage koji optimizuju performanse korisnika sa različitim uslovima na kanalu.

Sprovedene *Monte Carlo* simulacije potvrdile su teorijski izvedene rezultate i omogućile kvantifikaciju performansi sistema u realnim uslovima. Pokazano je da NOMA postiže do tri puta veću spektralnu efikasnost u odnosu na OMA sisteme pri visokim SNR vrijednostima, da NOMA može opsluživati do 10 korisnika sa 40dBm predajne snage bez degradacije ukupnog informacionog kapaciteta, da implementacija SWIPT tehnologije omogućava autonomni rad IoT uređaja uz zadržavanje ciljnog informacionog kapaciteta. Utvrđeno je smanjenje kašnjenja u NOMA sistemima za 60-80% u poređenju sa OMA pristupom. Izvršena je analiza integracije SWIPT tehnologije sa kooperativnim NOMA sistemima za mMTC aplikacije, pri čemu je pokazano da korisnici sa boljim CSI mogu simultano prikupljati energiju i djelovati kao kooperativni releji, čime se postiže dvostruka korist kroz poboljšanje energetske autonomije IoT uređaja i proširenje pokrivenosti sistema bez angažovanja dodatnih infrastrukturnih resursa. Identifikovani su kritični faktori koji određuju maksimalni broj korisnika koji mogu biti simultano opsluženi u NOMA sistemu, pri čemu je pokazano da ovaj broj zavisi od predajne snage, kvaliteta CSI, složenosti SIC procedure i zahtjeva za željenim QoS parametrima, te je ustanovljeno da za

predajnu snagu od 40dBm, optimalan broj korisnika je 10, nakon čega se javlja degradacija performansi usljed povećane složenosti SIC dekodiranja.

Može se reći da ovaj rad postavlja temelje za razumijevanje i optimizaciju NOMA sistema u mMTC scenarijima pružajući teorijsku osnovu i praktične smjernice za implementaciju, pri čemu rezultati potvrđuju da NOMA tehnike predstavljaju ključnu tehnologiju za realizaciju vizije 5G mreža i postavljaju osnovu za evoluciju ka 6G i budućim generacijama mobilnih komunikacija.

Na osnovu rezultata ovog istraživanja, identifikovano je nekoliko perspektivnih pravaca za dalja istraživanja koji uključuju razvoj naprednijih algoritama za dinamično grupisanje korisnika i alokaciju ortogonalnih resursa u hibridnim NOMA/OMA sistemima, primjenu tehnika mašinskog učenja za predikciju CSI i optimizaciju alokacije snage u realnom vremenu, istraživanje performansi NOMA tehnika u opsegu milimetarskih talasa što je ključno za realizaciju potpunog potencijala 5G i budućih 6G mreža. Pravci budućeg istraživanja mogu biti i razvoj bezbjednosnih mehanizama za detekciju i prevenciju napada u kontekstu masivnih IoT komunikacija, razvoj strategija za interoperabilnost sa postojećom 4G infrastrukturom uz minimalno narušavanje servisa postojećih korisnika, kao i prilagođavanje NOMA tehnika za specifične mMTC aplikacije poput autonomnih vozila, industrijskog IoT-a i pametnih gradova uzimajući u obzir njihove specifične zahtjeve u pogledu kašnjenja, pouzdanosti i broja uređaja.

LITERATURA

- [1] A. Osseiran, J. F. Monserrat, and P. Marsch, *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. Cambridge University Press, 2016.
- [2] X. Lin and N. Lee, *5G and Beyond: Fundamentals and Standards*. Springer, 2020.
- [3] S. Ahmadi, *5G NR: Architecture, Technology, Implementation, and Operation of 3GPP New Radio Standards*. Academic Press, 2019.
- [4] W. Xiang, K. Zheng, and X. S. Shen, *5G Mobile Communications*. Springer, 2017.
- [5] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*. Cambridge University Press, 2018.
- [6] H. Sun, R. Q. Hu, and Y. Qian, *5G and Beyond Wireless Communication Networks*. John Wiley & Sons, 2021.
- [7] H. Yu, H. Lee, and H. Jeon, "What is 5G? Emerging 5G mobile services and network requirements," *Sustainability*, vol. 9, no. 10, p. 1848, 2017.
- [8] A. Ghosh, R. Ratasuk, S. Redana, and P. Rost, *5G-Enabled Industrial IoT Networks*. IEEE Press, 2020.
- [9] U. D. Urošević and Z. I. Veljović, "Koncept budućih mreža šeste generacije - 6G," *Telekomunikacije*, vol. 19, no. 3, pp. 335-349, 2021.
- [10] Z. Li, H. Shariatmadari, B. Singh, and M. Uusitalo, "5G URLLC: Design challenges and system concepts," in *Proc. 15th Int. Symp. Wireless Commun. Syst.*, 2018, pp. 1-6.
- [11] D. Chandramouli, R. Liebhart, and J. Pirskanen, *5G for the Connected World*. John Wiley & Sons, 2019.

- [12] A. Al-Dulaimi, X. Wang, and C.-L. I, *5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management*. IEEE Press, 2018.
- [13] M. Aldababsa et al., "A tutorial on nonorthogonal multiple access for 5G and beyond," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, Article ID 9713450, 2018.
- [14] F. Kara and H. Kaya, "BER performances of downlink and uplink NOMA in the presence of SIC errors over fading channels," *IET Communications*, vol. 12, no. 15, pp. 1834-1844, 2018.
- [15] D. Bulatović, Z. Veljović, U. Urošević, and E. Kočan, "Analiza informacionog kapaciteta u NOMA sistemima," *65th Telfor Conf.*, 2021, pp. RT2.1-1-4.
- [16] N. Čatović, Z. Veljović, U. Urošević, and E. Kočan, "Performanse downlink NOMA sistema sa multipleksiranjem u domenu snage," *65th Telfor Conf.*, 2021, pp. RT2.6-1-4.
- [17] Y. Liu and M. ElKashlan, "On the application of SWIPT in NOMA networks," in *Wireless Information and Power Transfer: Theory and Practice*, D. W. K. Ng and R. Schober, Eds. John Wiley & Sons, 2019, ch. 6, pp. 179-201.
- [18] J. Liu, G. Wu, X. Zhang, S. Fang, and S. Li, "Modeling, analysis, and optimization of grant-free NOMA in massive MTC via stochastic geometry," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 7, pp. 4294-4307, 2020.

PRILOZI

Prilog 1: Kod za analizu masivne konektivnosti

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

# Funkcija za konverziju dBm u linearnu skalu

def db2pow(db):

    return 10 ** (db / 10)

# Parametri

Pt_values = [10, 20, 30, 40] # Lista predajnih snaga u dBm

BW = 15*10**3 # Širina opsega

No = -174 + 10 * np.log10(BW) # Snaga šuma u dBm

no = (10 ** -3) * db2pow(No) # Snaga šuma u linearnoj skali

eta = 4 # Eksponent gubitka puta

K = np.arange(2, 22, 2) # Broj korisnika

N = 10**3 # Broj realizacija kanala

mc = 10**3 # Broj Monte Carlo simulacija za uprosječavanje rezultata

# Inicijalizacija plot-a
```

```

plt.figure()

colors = ['b', 'g', 'r', 'c'] # Boje za različite prenosne snage

labels = [f'{Pt} dBm' for Pt in Pt_values] # Legenda za različite predajne snage

for idx, Pt in enumerate(Pt_values):

    pt = (10 ** -3) * db2pow(Pt) # Predajna snaga u linearnoj skali

    C_sum = np.zeros((mc, len(K))) # Inicijalizacija matrice za sumarnu stopu prenosa

    for iter in range(mc):

        for u in range(len(K)):

            # Nasumično pozicioniranje potrebnog broja korisnika

            dist = np.random.randint(200, 1501, K[u]).astype(float)

            # Sortiranje korisnika u opadajućem redosljedu na osnovu udaljenosti

            d = np.sort(dist)[::-1]

            # Generisanje Rayleigh-ovih koeficijenata fadingsa sa srednjom vrednošću 0 i varijansom 1
            za sve korisnike

            H = (np.random.randn(K[u], N) + 1j * np.random.randn(K[u], N)) / np.sqrt(2)

            # Množenje svakog koeficijenta fadingsa korisnika sa željenim sqrt(varijansom)

            h = H * np.sqrt(d**2-eta)[:, None]

            # Dobitak kanala

            g = np.abs(h)**2

            # Alokacija snage

            pa = np.zeros(K[u])

```

```

for m in range(K[u]):
    if m == K[u] - 1:
        pa[m] = 1 - np.sum(pa[:m])
    else:
        pa[m] = (1 - np.sum(pa[:m])) * 3 / 4

pa_sum = np.zeros(K[u])
for m in range(K[u]):
    pa_sum[m] = np.sum(pa[m+1:])

# Izračunavanje kapaciteta
C = np.log2(1 + (pa[:, None] * g * pt) / (pa_sum[:, None] * g * pt + no))
Ct = C.T
C_sum[iter, u] = np.sum(np.mean(Ct, axis=0))

# Prosječni dostignuti informacioni kapacitet dobijen u svim iteracijama
Cap = np.mean(C_sum, axis=0)

# Iscrtavanje rezultata za trenutnu predajnu snagu
plt.plot(K, Cap, '-+', color=colors[idx], linewidth=2, label=labels[idx])

```

```
# Prikazivanje legende
plt.legend()

plt.grid(True)

plt.xlabel('Broj korisnika')

plt.ylabel('Informacioni kapacitet (b/s/Hz)')

# Postavljanje cijelih brojeva na x-osu
plt.xticks(K)

plt.show()
```

Prilog 2: Kod za analizu informacionog kapaciteta

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Funkcija za konverziju dBm u linearnu skalu
def db2pow(db):
    return 10 ** (db / 10)

# Opseg SNR-a
Pt = np.arange(-114, -53, 5) # u dB
pt = db2pow(Pt) # u linearnoj skali

N = 10**4
```

```
d1, d2, d3 = 20, 10, 5 # Udaljenost korisnika
```

```
eta = 4 # Eksponent gubitka puta
```

```
# Rayleigh-ovi koeficijenti fadinga za sve korisnike
```

```
h1 = (np.sqrt(d1**-eta)) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
h2 = (np.sqrt(d2**-eta)) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
h3 = (np.sqrt(d3**-eta)) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
# Dobitak kanala
```

```
g1 = np.abs(h1)**2
```

```
g2 = np.abs(h2)**2
```

```
g3 = np.abs(h3)**2
```

```
BW = 10**9 # Širina opsega
```

```
No = -174 + 10 * np.log10(BW) # Snaga šuma u dBm
```

```
no = (10**-3) * db2pow(No) # Snaga šuma u linearnoj skali
```

```
# Koeficijenti alokacije snage
```

```
a1, a2 = 0.75, 0.1825
```

```
a3 = 1 - (a1 + a2)
```

```
C_noma_sum = np.zeros(len(pt))
```

```

C_oma_sum = np.zeros(len(pt))

for u in range(len(pt)):

    # Izračunavanje kapaciteta za NOMA

    C_noma_1 = np.log2(1 + pt[u] * a1 * g1 / (pt[u] * a2 * g1 + pt[u] * a3 * g1 + no)) # Korisnik
1
    C_noma_2 = np.log2(1 + pt[u] * a2 * g2 / (pt[u] * a3 * g2 + no)) # Korisnik 2
    C_noma_3 = np.log2(1 + pt[u] * a3 * g3 / no) # Korisnik 3

    C_noma_sum[u] = np.mean(C_noma_1 + C_noma_2 + C_noma_3) # Sumarni kapacitet
NOMA

    # Izračunavanje kapaciteta za OMA

    C_oma_1 = (1 / 3) * np.log2(1 + pt[u] * g1 / no) # Korisnik 1
    C_oma_2 = (1 / 3) * np.log2(1 + pt[u] * g2 / no) # Korisnik 2
    C_oma_3 = (1 / 3) * np.log2(1 + pt[u] * g3 / no) # Korisnik 3

    C_oma_sum[u] = np.mean(C_oma_1 + C_oma_2 + C_oma_3) # Sumarni kapacitet OMA

SNR = Pt - No

# Iscrtavanje rezultata

plt.figure()

plt.plot(SNR, C_noma_sum, linewidth=2, label='NOMA')

```

```
plt.plot(SNR, C_oma_sum, linewidth=2, label='OMA')  
plt.xlabel('SNR (dB)')  
plt.ylabel('Informacioni kapacitet (b/s/Hz)')  
plt.legend()  
plt.ylim([0, max(C_noma_sum) + 1])  
plt.grid(True)  
plt.show()
```

Prilog 3: Kod za analizu uticaja greške na SIC procedure

```
import numpy as np  
import matplotlib.pyplot as plt  
  
# Parametri  
N = 10**5  
  
d1 = 1000  
d2 = 500 # Udaljenosti korisnika od bazne stanice  
a1 = 0.75  
a2 = 0.25 # Faktori alokacije snage  
eta = 4 # Eksponent gubitka puta  
err = [0, 10**-4, 10**-3, 10**-2] # Greške SIC-a
```

```

# Generisanje Rayleigh-ovih fading koeficijenata za oba korisnika
h1 = np.sqrt(d1**-eta) * (np.random.randn(N) + 1j*np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
h2 = np.sqrt(d2**-eta) * (np.random.randn(N) + 1j*np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)

g1 = np.abs(h1)**2
g2 = np.abs(h2)**2

Pt = np.arange(0, 42, 2) # Predajna snaga u dBm
pt = (10**-3) * 10**(Pt/10) # Predajna snaga u linearnoj skali
BW = 10**6 # Širina sistema
No = -174 + 10*np.log10(BW) # Snaga šuma (dBm)
no = (10**-3) * 10**(No/10) # Snaga šuma (linearna skala)

p = len(Pt)

# Simulacija
for ep in range(len(err)):
    R2d_av = []
    for u in range(p):
        gamma_2d = a2 * pt[u] * g2 / (err[ep] * a1 * pt[u] * g2 + no)
        R2d = np.log2(1 + gamma_2d)
        R2d_av.append(np.mean(R2d))
plt.plot(Pt, R2d_av, linewidth=2)

```

```

# Prikaz rezultata

plt.grid(True)

plt.xlabel('Predajna snaga (dBm)')

plt.ylabel('Informacioni kapacitet (b/s/Hz)')

plt.legend([' $\epsilon = 0$  (savršeni SIC)', ' $\epsilon = 10^{-4}$ ', ' $\epsilon = 10^{-3}$ ', ' $\epsilon = 10^{-2}$ '])

plt.show()

```

Prilog 4: Kod za analizu spektralne efikasnosti

```

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

# Funkcija za konverziju dBm u linearnu skalu

def db2pow(db):

    return 10 ** (db / 10)

# Parametri simulacije

N = 10**5

Pt = 30

pt = db2pow(Pt - 30)

BW = 15 * 10**3

No = -174 + 10 * np.log10(BW)

```

```

no = db2pow(No - 30)

eta = 4

# 3 KORISNIKA

distances = np.array([100, 200, 300], dtype=float)

num_users = 3

# Generisanje kanala

np.random.seed(42)

H = []

G = []

for d in distances:

    h = np.sqrt(d**-eta) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)

    H.append(h)

    G.append(np.abs(h)**2)

# OMA

o_se = np.zeros(num_users)

for i in range(num_users):

    snr = pt * G[i] / no

    capacity = (BW / num_users) * np.log2(1 + snr)

    o_se[i] = capacity.mean() / BW

```

```
#NOMA - Alokacija 3/4 formula
```

```
a = np.zeros(num_users)
```

```
a[2] = 0.75
```

```
a[1] = 0.25 * (1 - a[2])
```

```
a[0] = 1 - a[1] - a[2]
```

```
n_se = np.zeros(num_users)
```

```
# Korisnik 0 (100m) - najbolji CSI
```

```
signal_0 = a[0] * pt * G[0]
```

```
snr_0 = signal_0 / no
```

```
capacity_0 = BW * np.log2(1 + snr_0)
```

```
n_se[0] = capacity_0.mean() / BW
```

```
# Korisnik 1 (200m) - srednji CSI
```

```
signal_1 = a[1] * pt * G[1]
```

```
interference_1 = a[0] * pt * G[1] + no
```

```
snr_1 = signal_1 / interference_1
```

```
capacity_1 = BW * np.log2(1 + snr_1)
```

```
n_se[1] = capacity_1.mean() / BW
```

```
# Korisnik 2 (300m) - najgori CSI
```

```
signal_2 = a[2] * pt * G[2]
```

```

interference_2 = a[0] * pt * G[2] + a[1] * pt * G[2] + no

snr_2 = signal_2 / interference_2

capacity_2 = BW * np.log2(1 + snr_2)

n_se[2] = capacity_2.mean() / BW

# Kreiraj figuru

plt.figure()

plt.plot(distances, n_se, '-o', label='NOMA', linewidth=2)

plt.plot(distances, o_se, '-s', label='OMA', linewidth=2)

# Legende

plt.xlabel('Udaljenost korisnika (m)')

plt.ylabel('Spektralna efikasnost (b/s/Hz)')

plt.legend()

# Prikaz rezultata

plt.grid(True)

plt.show()

```

Prilog 5: Kod za analizu vjerovatnoće greške sa različitim strategijama alokacije snage

```

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

```

```

# Funkcija za konverziju dBm u linearnu skalu

def db2pow(db):

    return 10 ** (db / 10)

# Parametri

N = 10**5 # Broj simulacija

Pt = 30 # Maksimalna predajna snaga BS (dBm)

pt = (10**-3) * db2pow(Pt) # Maksimalna predajna snaga BS

No = -114 # Snaga šuma (dBm)

no = (10**-3) * db2pow(No) # Snaga šuma

r = np.arange(0.5, 10.5, 0.5) # Opseg ciljane brzine prenosa udaljenog korisnika (R*)

df = 1000 # Udaljenost korisnika sa lošijim CSI

dn = 500 # Udaljenost korisnika sa boljim CSI

eta = 4 # Eksponent gubitka puta

p1 = np.zeros(len(r)) # Vjerovatnoća otkaza za fiksni PA (korisnik sa lošijim CSI)

p2 = np.zeros(len(r)) # Vjerovatnoća otkaza za fiksni PA (korisnik sa boljim CSI)

pa1 = np.zeros(len(r)) # Vjerovatnoća otkaza za dinamični PA (korisnik sa lošijim CSI)

pa2 = np.zeros(len(r)) # Vjerovatnoća otkaza za dinamični PA (korisnik sa boljim CSI)

```

```
af = 0.75 # Fiksna alokacija snage za korisnika sa lošijim CSI
```

```
an = 0.25 # Fiksna alokacija snage za korisnika sa boljim CSI
```

```
# Rayleigh-ovi koeficijenti fadinga za oba korisnika
```

```
hf = np.sqrt(df**-eta) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
hn = np.sqrt(dn**-eta) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
g1 = np.abs(hf)**2
```

```
g2 = np.abs(hn)**2
```

```
for u in range(len(r)):
```

```
    epsilon = (2**r[u]) - 1 # Ciljani SINR za udaljenog korisnika
```

```
    # Fiksna alokacija snage
```

```
    # aaf = min(1, epsilon * (no + pt * g1) / (pt * g1 * (1 + epsilon)))
```

```
    # aan = 1 - aaf
```

```
    # Dinamična alokacija snage
```

```
    aaf = epsilon * (no + pt * g1) / (pt * g1 * (1 + epsilon))
```

```
    aaf[aaf > 1] = 0
```

```
    aan = 1 - aaf
```

```
# Izračunavanje SINR-a za fiksnu alokaciju snage
```

```
gamma_f = pt * af * g1 / (pt * g1 * an + no)
```

```
gamma_nf = pt * af * g2 / (pt * g2 * an + no)
```

```
gamma_n = pt * g2 * an / no
```

```
# Izračunavanje SINR-a za fair alokaciju snage
```

```
gamm_f = pt * aaf * g1 / (pt * g1 * aan + no)
```

```
gamm_nf = pt * aaf * g2 / (pt * g2 * aan + no)
```

```
gamm_n = pt * g2 * aan / no
```

```
# Kapaciteti za fiksnu alokaciju snage
```

```
Cf = np.log2(1 + gamma_f)
```

```
Cnf = np.log2(1 + gamma_nf)
```

```
Cn = np.log2(1 + gamma_n)
```

```
# Kapaciteti za dinamičnu alokaciju snage
```

```
Ca_f = np.log2(1 + gamm_f)
```

```
Ca_nf = np.log2(1 + gamm_nf)
```

```
Ca_n = np.log2(1 + gamm_n)
```

```
# Izračunavanje vjerovatnoće otkaza
```

```
for k in range(N):
```

```
    if Cf[k] < r[u]:
```

```

    p1[u] += 1
if Cnf[k] < r[u] or Cn[k] < r[u]:
    p2[u] += 1
if Ca_f[k] < r[u]:
    pa1[u] += 1
if aaf[k] != 0:
    if Ca_n[k] < r[u] or Ca_nf[k] < r[u]:
        pa2[u] += 1
else:
    if Ca_n[k] < r[u]:
        pa2[u] += 1

# Vjerovatnoće otkaza
pout1 = p1 / N
pout2 = p2 / N
pouta1 = pa1 / N
pouta2 = pa2 / N

# Iscrtavanje rezultata
plt.figure()
plt.plot(r, pout1, '--+r', linewidth=2, label='Korisnik sa lošijim CSI (fiksna)')
plt.plot(r, pout2, '--ob', linewidth=2, label='Korisnik sa boljim CSI (fiksna)')
plt.plot(r, pouta1, 'r', linewidth=2, label='Korisnik sa lošijim CSI (dinamična)')

```

```
plt.plot(r, pouta2, 'b', linewidth=2, label='Korisnik sa boljim CSI (dinamična)')
plt.xlabel('Ciljni informacijski kapacitet korisnika sa lošijim CSI (b/s/Hz)')
plt.ylabel('Vjerovatnoća otkaza')
plt.xlim([r[0], r[-1]])
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Prilog 6: Kod za analizu vjerovatnoće otkaza u zavisnosti od predajne snage

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Broj simulacija
N = 10**5

# Udaljenosti korisnika od bazne stanice
d1 = 1000
d2 = 500

# Faktori alokacije snage
a1 = 0.75
a2 = 0.25
```

```
# Eksponent gubitka puta
```

```
eta = 4
```

```
# Generisanje Rayleigh-ovih koeficijenata fadingsa za oba korisnika
```

```
h1 = np.sqrt(d1**(-eta)) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
h2 = np.sqrt(d2**(-eta)) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
# Dobitak kanala
```

```
g1 = np.abs(h1)**2
```

```
g2 = np.abs(h2)**2
```

```
# Predajna snaga u dBm
```

```
Pt = np.arange(0, 42, 2)
```

```
# Predajna snaga
```

```
pt = (10**(-3)) * 10**(Pt / 10)
```

```
# Širina opsega sistema
```

```
BW = 10**6
```

```
# Snaga šuma u dBm
```

```
No = -174 + 10 * np.log10(BW)
```

```
# Snaga šuma
```

```
no = (10**(-3)) * 10**(No / 10)
```

```

# Broj različitih predajnih snaga
p = len(Pt)

# Vjerovatnoće otkaza za oba korisnika
p1 = np.zeros(p)
p2 = np.zeros(p)

# Ciljane brzine prenosa korisnika u b/s/Hz
rate1 = 1
rate2 = 2

# Prolazak kroz sve nivoe predajne snage
for u in range(p):
    # Izračunavanje SNR-a
    gamma_1 = a1 * pt[u] * g1 / (a2 * pt[u] * g1 + no)
    gamma_12 = a1 * pt[u] * g2 / (a2 * pt[u] * g2 + no)
    gamma_2 = a2 * pt[u] * g2 / no

    # Izračunavanje brzina prenosa
    R1 = np.log2(1 + gamma_1)
    R12 = np.log2(1 + gamma_12)
    R2 = np.log2(1 + gamma_2)

```

```

# Prosječne brzine prenosa

R1_av = np.mean(R1)

R12_av = np.mean(R12)

R2_av = np.mean(R2)

# Provjera otkaza

for k in range(N):

    if R1[k] < rate1:

        p1[u] += 1

    if R12[k] < rate1 or R2[k] < rate2:

        p2[u] += 1

# Vjerovatnoće otkaza

pout1 = p1 / N

pout2 = p2 / N

# Iscrtavanje rezultata

plt.figure()

plt.semilogy(Pt, pout1, linewidth=1.5, label='Korisnik sa lošijim CSI')

plt.semilogy(Pt, pout2, linewidth=1.5, label='Korisnik sa boljim CSI')

plt.xlabel('Predajna snaga (dBm)')

plt.ylabel('Vjerovatnoća otkaza')

plt.legend()

```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.show()
```

Prilog 7: Kod za analizu BER-a

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
# Broj simulacija
```

```
N = 10**6
```

```
# Udaljenosti korisnika od bazne stanice
```

```
d1 = 1000
```

```
d2 = 500
```

```
# Faktori alokacije snage
```

```
a1 = 0.75
```

```
a2 = 0.25
```

```
# Eksponent gubitka puta
```

```
eta = 4
```

```
# Generisanje Rayleigh-ovih koeficijenata fadanga za oba korisnika
```

```
h1 = np.sqrt(d1**eta) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
h2 = np.sqrt(d2**eta) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
# Dobitak kanala
```

```
g1 = np.abs(h1)**2
```

```
g2 = np.abs(h2)**2
```

```
# Predajna snaga u dBm
```

```
Pt = np.arange(0, 42, 2)
```

```
# Predajna snaga
```

```
pt = (10**-3) * 10**(Pt / 10)
```

```
# Širina opsega sistema
```

```
BW = 10**6
```

```
# Snaga šuma u dBm
```

```
No = -174 + 10 * np.log10(BW)
```

```
# Snaga šuma
```

```
no = (10**-3) * 10**(No / 10)
```

```
# Generisanje uzoraka šuma za oba korisnika
```

```
w1 = np.sqrt(no) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
w2 = np.sqrt(no) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)
```

```
# Generisanje slučajnih binarnih podataka za dva korisnika
```

```

data1 = np.random.randint(0, 2, N) # Podaci korisnika 1
data2 = np.random.randint(0, 2, N) # Podaci korisnika 2

# BPSK modulacija podataka

x1 = 2 * data1 - 1
x2 = 2 * data2 - 1

# Broj različitih predajnih snaga

p = len(Pt)

# Inicijalizacija promenljivih za BER

ber1 = np.zeros(p)
ber2 = np.zeros(p)
ber_th1 = np.zeros(p)
ber_th2 = np.zeros(p)

for u in range(p):

    # Superpoziciono kodiranje

    x = np.sqrt(pt[u]) * (np.sqrt(a1) * x1 + np.sqrt(a2) * x2)

    # Priljeni signali

    y1 = h1 * x + w1
    y2 = h2 * x + w2

```

```

# Ekvalizacija

eq1 = y1 / h1

eq2 = y2 / h2

# KOD KORISNIKA 1

# Direktno dekodiranje x1 iz y1

x1_hat = np.zeros(N)

x1_hat[eq1 > 0] = 1

# Poređenje dekodiranog x1_hat sa data1 za procjenu BER-a

ber1[u] = np.mean(data1 != x1_hat)

# KOD KORISNIKA 2

# Direktno dekodiranje x1 iz y2

x12_hat = np.ones(N)

x12_hat[eq2 < 0] = -1

y2_dash = eq2 - np.sqrt(a1 * pt[u]) * x12_hat

x2_hat = np.zeros(N)

x2_hat[np.real(y2_dash) > 0] = 1

ber2[u] = np.mean(data2 != x2_hat)

```

```

# Teorijske vrijednosti BER-a

gam_a = 2 * ((np.sqrt(a1 * pt[u]) - np.sqrt(a2 * pt[u]))**2) * np.mean(g1) / no
gam_b = 2 * ((np.sqrt(a1 * pt[u]) + np.sqrt(a2 * pt[u]))**2) * np.mean(g1) / no
ber_th1[u] = 0.25 * (2 - np.sqrt(gam_a / (2 + gam_a)) - np.sqrt(gam_b / (2 + gam_b)))

gam_c = 2 * a2 * pt[u] * np.mean(g2) / no
gam_d = 2 * ((np.sqrt(a2) + np.sqrt(a1))**2) * pt[u] * np.mean(g2) / no
gam_e = 2 * ((np.sqrt(a2) + 2 * np.sqrt(a1))**2) * pt[u] * np.mean(g2) / no
gam_f = 2 * ((-np.sqrt(a2) + np.sqrt(a1))**2) * pt[u] * np.mean(g2) / no
gam_g = 2 * ((-np.sqrt(a2) + 2 * np.sqrt(a1))**2) * pt[u] * np.mean(g2) / no

gc = 1 - np.sqrt(gam_c / (2 + gam_c))
gd = 1 - np.sqrt(gam_d / (2 + gam_d))
ge = 1 - np.sqrt(gam_e / (2 + gam_e))
gf = 1 - np.sqrt(gam_f / (2 + gam_f))
gg = 1 - np.sqrt(gam_g / (2 + gam_g))

ber_th2[u] = 0.5 * gc - 0.25 * gd + 0.25 * (ge + gf - gg)

# Prikazivanje rezultata

plt.figure()

plt.semilogy(Pt, ber1, 'r', linewidth=1.5, label='Sim. Korisnik sa lošijim CSI')

plt.semilogy(Pt, ber2, 'b', linewidth=1.5, label='Sim. Korisnik sa boljim CSI')

```

```
plt.semilogy(Pt, ber_th1, '*r', linewidth=1.5, label='Teor. Korisnik sa lošijim CSI')
plt.semilogy(Pt, ber_th2, '*b', linewidth=1.5, label='Teor. Korisnik sa boljim CSI')
plt.xlabel('Predajna snaga (dBm)')
plt.ylabel('BER')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

Prilog 8: Kod za analizu energetske efikasnosti sa SWIPT tehnologijom

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Broj simulacija
N = 10**6

# Udaljenosti korisnika od bazne stanice
dsn = 10 # BS do korisnika sa boljim CSI
dnf = 10 # korisnik sa boljim CSI do korisnika sa lošijim CSI

# Eksponent gubitka puta
eta = 4
```

```

# Generisanje Rayleigh-ovih koeficijenata fadanga za oba korisnika

hsn = (np.sqrt(dsn**-eta)) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)

hnf = (np.sqrt(dnf**-eta)) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2)

# Dobitak kanala

gsn = np.abs(hsn)**2

gnf = np.abs(hnf)**2

# Predajna snaga u dBm

Pt = np.arange(0, 25, 5)

# Predajna snaga

pt = (10**-3) * 10**(Pt / 10)

# Širina opsega sistema

BW = 10**9

# Snaga šuma u dBm

No = -174 + 10 * np.log10(BW)

# Snaga šuma

no = (10**-3) * 10**(No / 10)

# Faktori alokacije snage

af = 0.8

an = 0.2

# Ciljana brzina prenosa za oba korisnika

```

```

ratetarget = 1

# Ciljani SNR za oba korisnika

snrtarget = (2**(2 * ratetarget)) - 1

# Efikasnost prikupljanja energije

eff = 0.7

# Mala konstanta

del_eps = 10**-6

# Inicijalizacija promenljivih za vjerovatnoću otkaza i prosječne brzine prenosa

pn = np.zeros(len(pt))

pf = np.zeros(len(pt))

cn = np.zeros(len(pt))

cf = np.zeros(len(pt))

for u in range(len(pt)):

    # Procenat prikupljene snage od strane korisnika sa boljim CSI

    frac = np.maximum(0, (1 - snrtarget * no / ((af - snrtarget * an) * pt[u] * gsn)) - del_eps)

    # Količina prikupljene snage od strane korisnika sa boljim CSI

    ph = pt[u] * gsn * frac * eff

    # Dostižna brzina prenosa za korisnika sa boljim CSI

    Rnf = 0.5 * np.log2(1 + af * pt[u] * (1 - frac) * gsn / (an * pt[u] * (1 - frac) * gsn + no))

    Rnn = 0.5 * np.log2(1 + an * pt[u] * (1 - frac) * gsn / no)

```

```

# Dostižna brzina prenosa za dalekog korisnika
Rf = 0.5 * np.log2(1 + ph * gnf / no)

cn[u] = np.mean(Rnn)
cf[u] = np.mean(Rf)

for k in range(N):
    if (Rnn[k] < ratetarget) or (Rnf[k] < ratetarget):
        pn[u] += 1
    if Rf[k] < ratetarget:
        pf[u] += 1

poutn1 = pn / N
poutf1 = pf / N

# Prikazivanje rezultata
plt.figure()
plt.plot(Pt, cn, linewidth=2, label='Korisnik sa boljim CSI')
plt.plot(Pt, cf, linewidth=2, label='Korisnik sa lošijim CSI')
plt.xlabel('Predajna snaga (dBm)')
plt.ylabel('Prosječni informacijski kapacitet (b/s/Hz)')
plt.legend()
plt.grid(True)

```

```
plt.show()
```

Prilog 9: Kod za analizu kašnjenja

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

# Funkcija za konverziju dBm u linearnu skalu
def db2pow(db):
    return 10 ** (db / 10)

# Parametri simulacije
N = 10**5 # Broj realizacija
slot_duration = 1 # Trajanje jednog vremenskog slota u ms

# Definisanje predajne snage i snage šuma
Pt = 30 # Predajna snaga u dBm
pt = db2pow(Pt - 30) # Prenosna snaga u linearnoj skali
BW = 15 * 10**3 # Širina opsega u Hz
No = -174 + 10 * np.log10(BW) # Snaga šuma u dBm
no = db2pow(No - 30) # Snaga šuma u linearnoj skali

# Eksponent gubitka puta
```

```

eta = 4

# Udaljenosti korisnika (100m, 200m, 300m, 400m, 500m)
distances = np.array([100, 200, 300, 400, 500], dtype=float)
num_users = len(distances)

# Generisanje Rayleigh-ovih koeficijenata fadanga za sve korisnike
H = [np.sqrt(d**(-eta)) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N)) / np.sqrt(2) for d in
distances]

G = [np.abs(h)**2 for h in H]

# Definisane faktora alokacije snage za NOMA
power_allocations = np.linspace(0.1, 1, num_users)[::-1]
power_allocations = power_allocations / np.sum(power_allocations) # Normalizacija da zbir bude
1

# Prikaz vrijednosti koeficijenata alokacije snage
print("Alokacija snage za NOMA sa 5 korisnika:", power_allocations)

# Simulacija kapaciteta i kašnjenja u OMA
o_delays = np.zeros(num_users)

for i in range(num_users):
    # Računanje kapaciteta kanala

```

```

snr = pt * G[i] / no

capacity = BW * np.log2(1 + snr)

o_delays[i] = (N / capacity.mean()) * slot_duration * num_users

# Simulacija kapaciteta i kašnjenja u NOMA

n_delays = np.zeros(num_users)

for i in range(num_users):

    snr_interference = np.sum([power_allocations[j] * pt * G[i] for j in range(num_users) if j != i],
axis=0) + no

    snr = power_allocations[i] * pt * G[i] / snr_interference

    capacity = BW * np.log2(1 + snr)

    n_delays[i] = (N / capacity.mean()) * slot_duration

# Prikazivanje rezultata kašnjenja

plt.figure()

plt.plot(distances, o_delays, '-o', label='NOMA')

plt.plot(distances, n_delays, '-s', label='OMA')

plt.xlabel('Udaljenost korisnika (m)')

plt.ylabel('Kašnjenje (ms)')

plt.legend()

plt.grid(True)

plt.show()

```