

**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Spec. Sci Dragana Bulatović

**TEHNIKE VIŠESTRUKOG PRISTUPA U MASIVNIM
KOMUNIKACIJAMA MAŠINSKOG TIPA**

- MAGISTARSKI RAD -

Podgorica, 2023. godine

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Dragana Bulatović, Spec. Sci

Datum i mjesto rođenja: 07.11.1992.god., Podgorica

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:
Elektronika, telekomunikacije i računari (BSc.), 2014 god.

Telekomunikacije (Spec. Sci), 2015 god.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Naziv postdiplomskog studija: Telekomunikacije

Naslov rada: Tehnike višestrukog pristupa u masivnim komunikacijama mašinskog tipa

Fakultet na kojem je rad odbranjen: Elektrotehnički fakultet

UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 16.01.2023. god.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 08.05.2023. god.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

Prof. dr Zoran Veljović, ETF Podgorica

Prof. dr Enis Kočan, ETF Podgorica

Doc. dr Uglješa Urošević, PMF Podgorica

Mentor: prof. dr Zoran Veljović, ETF Podgorica

Komisija za ocjenu rada:

Prof. dr Enis Kočan, ETF Podgorica

Prof. dr Zoran Veljović, ETF Podgorica

Doc. dr Uglješa Urošević, PMF Podgorica

Komisija za odbranu rada:

Prof. dr Enis Kočan, ETF Podgorica

Prof. dr Zoran Veljović, ETF Podgorica

Doc. dr Uglješa Urošević, PMF Podgorica

Datum odbrane: 28.11.2023.god.

Ime i prezime autora: Dragana Bulatović, Spec. Sci

ETIČKA IZJAVA

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 magistarski rad pod naslovom:

„Tehnike višestrukog pristupa u masivnim komunikacijama mašinskog tipa”

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,



Dragana Bulatović, Spec. Sci

U Podgorici, dana 28.05.2023. godine

SAŽETAK

Masivne komunikacije mašinskog tipa (mMTC) su u fokusu razvoja budućih mobilnih mreža, a za njihovu uspješnu implementaciju je potrebno obezbijediti tehnike višestrukog pristupa korisnika raspoloživom spektru koje podržavaju masivnu konektivnost uređaja i obezbjeđuju im platformu za efikasnu komunikaciju.

Predmet istraživanja ovog rada su tehnike višestrukog pristupa u masivnim komunikacijama mašinskog tipa. Analizirani se izazovi u primjeni ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa u masivnim komunikacijama mašinskog tipa koji dovode do potrebe za definisanjem novog koncepta tehnika višestrukog pristupa koji je zasnovan na neortogonalnoj dodjeli resursa korisnicima. Principi na kojima se zasnivaju neortogonalne tehnike u domenu snage su superpozicija signala na predajnoj strani i sukcesivno uklanjanje interferencije na prijemnoj strani, a preduslov za njihovo pravilno funkcionisanje je dodjela odgovarajućeg nivoa snage korisnicima tj. pravilna alokacija snage. U istraživanju su analizirane BER performanse sistema zasnovanog na neortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa u domenu snage. Simulirana je *downlink* komunikacija između bazne stanice i dva korisnika, kao i kooperativni prenos. Cilj je ispitati na koji način alokacija snage korisnicima utiče na vjerovatnoću greške na strani udaljenog korisnika, kao i da li se vjerovatnoća greške na strani udaljenog korisnika može poboljšati ukoliko se bližem korisniku dodijeli uloga releja. Vršene se simulacije sa različitim koeficijentima alokacije snage i posmatrane su performanse sistema po pitanju ostvarenog BER-a što predstavlja i konkretan doprinos ovog rada. Pokazuje se da se primjenom PD-NOMA tehnika može postići veći informacijski kapacitet nego primjenom ortogonalnih tehnika, kao i da se dodjelom uloge releja korisniku sa boljim uslovima na kanalu poboljšaju BER performanse kod korisnika sa lošijim uslovima u kanalu.

Ključne riječi: NOMA, BER, masivne komunikacije mašinskog tipa, tehnike višestrukog pristupa

ABSTRACT

Massive machine-type communications (mMTC) are a focal point in the development of the future mobile networks, and their successful implementation requires providing multiple access techniques in the available spectrum to support massive device connectivity and efficient communication. This research paper investigates multiple access techniques in mMTC. The challenges in applying orthogonal multiple access techniques in mMTC are analyzed, which lead to the need for defining a new concept of multiple access techniques based on non-orthogonal resource allocation to users. The principles underlying non-orthogonal techniques in the power domain involve superposition of signals at the transmission side and successive interference cancellation at the reception side, with the prerequisite of appropriate power allocation to users. The research analyzes the bit error rate (BER) performance of a system based on non-orthogonal multiple access techniques in the power domain. Downlink communication between a base station and two users, as well as cooperative transmission, is simulated. The goal is to examine how power allocation to users affects the error probability at the remote user and whether the error probability at the remote user can be improved by assigning the relay role to the closer user. Simulations are performed with different power allocation coefficients, and the system performance in terms of achieved BER is observed, which represents a specific contribution of this work. The results show that the application of power domain non-orthogonal multiple access (PD-NOMA) techniques can achieve higher information capacity compared to orthogonal techniques, and assigning the relay role to the user with better channel conditions improves BER performance for users with poorer channel conditions.

Key words: NOMA, BER, machine-type communication, multiple access techniques

SADRŽAJ

Sažetak	4
Abstract	5
1. Uvod	7
2. Masivne komunikacije mašinskog tipa	8
2.1 Osnovne karakteristike, zahtjevi i specifičnosti mMTC komunikacija	10
2.2 Oblasti primjene mMTC	13
2.3 Trenutni standardi koji definišu mMTC i budući razvoj	14
3. Ortogonalne tehnike višestrukog pristupa	18
3.1 Osnovne karakteristike ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa	21
3.2 Izazovi u primjeni ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa u mMTC	30
4. Neortogonalne tehnike višestrukog pristupa	36
4.1 Poređenje OMA i NOMA tehnika na primjeru downlink komunikacije	37
4.2 NOMA tehnike i drugi trendovi u razvoju budućih mobilnih mreža	42
4.3 Primjena NOMA tehnika u masivnim komunikacijama mašinskog tipa	54
4.4 Standardizacija i budući pravci istraživanja	61
5. Pouzdanost sistema sa NOMA pristupom	66
5.1 Downlink komunikacija	66
5.2 Kooperativni prenos	74
6. Zaključak	79
Literatura	82
Spisak skraćenica	85

1. UVOD

Imajući u vidu da je radio frekvencijski spektar ograničen prirodni resurs, jedan od ključnih zahtjeva pri dizajniranju mobilnih mreža je pronalaženje što efikasnijih tehnika za njegovo korišćenje. Sa tim ciljem, razvijene su tehnike za višestruki pristup korisnika sistemu korišćenjem raspoloživog spektra, koje predstavljaju jedan od osnovnih segmenata u planiranju i razvoju mobilnih mreža. Višestruki pristup podrazumijeva mogućnost da veći broj korisnika istovremeno koristi dostupne resurse, pri čemu je potrebno obezbijediti zahtijevani kvalitet servisa za sve korisnike koji učestvuju u komunikaciji. Tehnike višestrukog pristupa imaju dominantan uticaj na efikasnost korišćenja raspoloživog spektra, brzinu prenosa i kašnjenje u sistemu. Ove tehnike su se tokom svog razvoja mijenjale i prilagođavale korisničkim zahtjevima, kako u pogledu brzine prenosa i broja istovremenih konekcija, tako i u pogledu količine i vrste saobraćaja koji se prenosi u mreži. Osim navedenog, tehnike višestrukog pristupa moraju da prate i promjene navika korisnika, zahtjeve za sve većom mobilnošću, kao i fleksibilnost u pogledu zahtijevanih aplikacija i servisa. Naročiti izazov u dizajniranju tehnika višestrukog pristupa poslednjih godina predstavlja činjenica da one moraju biti prilagođene naglom porastu broja uređaja koji komuniciraju međusobno ili sa centralnom lokacijom, bez učešća ili sa minimalnim učešćem čovjeka. Nagli rast i razvoj IoT (*Internet of Things*) aplikacija čini da potreba za komunikacijom raznih uređaja, senzora, mašina i slično, postaje dominantna u odnosu na potrebu za komunikacijom ljudi, a nastavak takvog trenda se očekuje i u budućnosti. Vjeruje se da trenutno postoji oko 25 milijardi povezanih uređaja. Taj broj će ubrazano rasti u narednim godinama, pa će prema trenutnim predviđanjima do 2030. godine postojati oko 125 milijardi povezanih uređaja, [1]. Zato su masivne komunikacije mašinskog tipa u fokusu razvoja budućih mobilnih mreža. Za njihovu uspješnu implementaciju, prije svega je potrebno obezbijediti efikasne tehnike višestrukog pristupa korisnika sistemu, koje podržavaju masivnu konektivnost uređaja i obezbjeđuju im platformu za efikasnu komunikaciju.

Dosadašnje generacije mobilnih mreža su dizajnirane prvenstveno da podrže i zadovolje čovjekove potrebe za komunikacijom i razmjenom informacija u uslovima

mobilnosti. U dosadašnjim generacijama mobilnih sistema (1G-4G) primjenjivane su tehnike višestrukog pristupa koje su zasnovane na ortogonalnom višestrukome pristupu OMA (*Orthogonal Multiple Access*). Ortogonalni višestruki pristup podrazumijeva da se korisnicima dodjeljuju ortogonalni frekvencijski, vremenski, ili kodni resursi, sa ciljem smanjenja interferencije između njih na najmanju moguću mjeru. Da bi se u okviru postojećih mobilnih sistema obezbijedila efikasna platforma za masivne komunikacije mašinskog tipa, potrebna su brojna unapređenja postojećih tehnika višestrukog pristupa kako bi se obezbijedila mogućnost komunikacije velikom broju uređaja, bez narušavanja kvaliteta HTC (*Human Type Communications*) komunikacija. U ovom radu biće analizirani izazovi u primjeni ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa u masivnim komunikacijama mašinskog tipa, koji poslednjih godina dovode do potrebe za razvojem novog koncepta tehnika višestrukog pristupa koji je zasnovan na neortogonalnoj dodjeli resursa korisnicima. Jedno od predloženih rješenja je razvoj neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa (NOMA - *Non-Orthogonal Multiple Access*).

Neortogonalne tehnike višestrukog pristupa zasnivaju se na dodjeli neortogonalnih resursa korisnicima, što znači da je korisnicima dozvoljeno da koriste iste vremenske, frekvencijske ili kodne resurse za komunikaciju. Neortogonalne tehnike omogućavaju komunikaciju većem broju korisnika unutar istog resursnog bloka, pa se zahvaljujući tome postiže bolja spektralna efikasnost u odnosu na ortogonalne tehnike, kao i masivna konektivnost. Tehnike neortogonalnog višestrukog pristupa dijele se na dvije glavne grupe: neortogonalno multipleksiranje u domenu snage i neortogonalno multipleksiranje u domenu koda. Neortogonalno multipleksiranje u domenu koda podrazumijeva da se korisnicima dodjeljuju kodne sekvence koje nisu međusobno ortogonalne. Neortogonalno multipleksiranje u domenu snage (PA NOMA - *Power Allocation Non-Orthogonal Multiple Access*), koje je i predmet ovog rada, zasniva se na razdavanju korisnika na osnovu nivoa snage koji im se dodjeljuje, pri čemu svi korisnici koriste iste vremenske i frekvencijske resurse. Nivo snage koji se dodjeljuje korisnicima zavisi od karakteristika njihovih komunikacionih kanala.

Ostatak rada koncipiran je tako što su u drugom poglavlju predstavljene osnovne karakteristike, sistemski zahtjevi i specifičnosti masivnih komunikacija mašinskog

tipa, oblasti njihove primjene, trenutni standardi koji definišu ovu oblast i očekivani budući razvoj. Treće poglavlje donosi pregled karakteristika i načina funkcionisanja najvažnijih ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa. Nakon toga su analizirani izazovi i ograničenja u primjeni ovih tehnika u masivnim komunikacijama mašinskog tipa. U četvrtom poglavlju opisani su razlozi za uvođenje neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa, ključni principi njihovog funkcionisanja i izvršeno je njihovo poređenje sa ortogonalnim tehnikama. Takođe, analizirana je kompatibilnost neortogonalnih tehnika i drugih trendova u razvoju mobilnih mreža, kao i primjena neortogonalnih tehnika u masivnim komunikacijama mašinskog tipa. U petom poglavlju ovog rada se, kroz odgovarajuće simulacije relevantnih scenarija primjene, ispituje pouzdanost sistema zasnovanih na neortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa. U šestom poglavlju se daju zaključna razmatranja uz sumiranje cjelokupnog istraživanja i identifikaciju mogućih budućih pravaca istraživanja u ovoj oblasti.

2. MASIVNE KOMUNIKACIJE MAŠINSKOG TIPA

Komunikacije mašinskog tipa obuhvataju širok spektar bežičnih uređaja, različitih vrsta i karakteristika, koji komuniciraju bez direktnog ili sa minimalnim učešćem čovjeka. U zavisnosti od primjene i osnovnih karakteristika mašinske komunikacije se obično dijele na dva tipa: masivne komunikacije mašinskog tipa (mMTC – *Massive Machine Type Communication*) i ultra pouzdane mašinske komunikacije (uMTC - *Ultra-reliable Machine Type Communication*), [2]. Ipak, podjela između navedena dva tipa mašinskih komunikacija nije strogo definisana tako da su mogući i izuzeci u kojima mMTC komunikacije imaju karakteristike uMTC komunikacija ili obrnuto.

2.1. Osnovne karakteristike, zahtjevi i specifičnosti mMTC komunikacija

Masivne komunikacije mašinskog tipa doživljavaju ekspanziju poslednjih godina i najčešće se definišu kao komunikacije u kojima učestvuje veliki broj različitih vrsta senzora, bez učešća ili sa minimalnim učešćem čovjeka. Zajednička karakteristika u većini slučajeva je da uređaji generišu saobraćaj koji ne zahtijeva širok propusni opseg i velike brzine prenosa, kao i da je ograničena potrošnja energije jedna od ključnih stvari o kojoj se mora voditi računa prilikom implementacije sistema, [3].

Tipični problemi koji se javljaju u ovim mrežama vezuju se za energetske efikasnost i obezbjeđivanje rada mreže u zadovoljavajuće dugom vremenskom periodu. S obzirom da se senzorski čvorovi obično napajaju baterijski, njihova zamjena ili punjenje je spor i skup proces, koji u velikoj mjeri narušava performanse mreže, a u nekim slučajevima nije ni izvodljiv. U 5G mrežama se zahtijeva da životni vijek baterije uređaja bude u trajanju od najmanje 10 godina u toku kojeg nema potrebe za dodatnim punjenjem. Na životni vijek baterije najveći uticaj ima vrijeme tokom kojeg uređaji šalju i/ili primaju informacije, a dodatno treba uzeti u obzir i samopražnjenje baterije. Zato je potrebno pronaći optimalnu učestalost slanja informacija od strane senzora ka centralnoj lokaciji. Ukoliko senzor određenu informaciju prenosi na svakih pet minuta, životni vijek baterije će biti 25 puta duži

nego u slučaju kada se informacija prenosi nakon svakog minuta. Uređaji koji se nalaze na ivici ćelije imaju značajno kraći životni vijek baterije u poređenju sa uređajima koji svoje informacije prenose po kanalu sa boljim propagacionim karakteristikama. Jedan od načina da se produži trajanje baterije uređaja na ivici ćelije je relejni prenos, u kojem se uređaji sa boljim uslovima na komunikacionom kanalu ponašaju kao releji koji primaju i prosleđuju informacije do uređaja na ivici ćelije. Na ovaj način moguće je produžiti trajanje baterije kod senzora na ivici ćelije, ali se sa druge strane, u određenoj mjeri, narušavaju performanse uređaja koji se koriste kao relejni čvorovi.

Masivne komunikacije mašinskog tipa su u većini slučajeva tolerantne na kašnjenje u određenoj mjeri i to značajno olakšava njihovu implementaciju. Ovo se naročito odnosi na situacije u kojima različite vrste senzora prikupljaju informacije o nekom stanju ili pojavi i prosleđuju ih ka centralnoj lokaciji. Izuzetak su slučajevi u kojima se vrši prenos alarmnih informacija. Primjer za to može biti situacija u kojoj se u objektu detektuje da je došlo do požara. Tada je neophodno što prije prenijeti informaciju dežurnom osoblju o nastaloj opasnosti, jer od brzine prenosa ove informacije zavisi i početak evakuacije ljudi iz objekta. U prethodno opisanim slučajevima informacija koja se prenosi je najčešće korelisana između više senzora koji se nalaze na bliskom području, tako da problemi u funkcionisanju ili prestanak rada jednog od senzora neće značajnije uticati na performanse cjelokupnog sistema, što je još jedna od karakteristika mMTC komunikacija. Uređaji koji učestvuju u masivnim komunikacijama su obično statični, pa nema potrebe za tehnikama obezbjeđivanja komunikacije u uslovima mobilnosti korisnika, niti za *handover*-om između ćelija.

Jednostavan hardver, tj. mala kompleksnost uređaja, je jedan od osnovnih zahtjeva u mMTC mrežama koji se postiže zahvaljujući činjenici da se od senzora ne očekuju neke složene funkcionalnosti. Na kompleksnost samih uređaja veliki uticaj ima broj antena, kao i način na koji se odvija komunikacija. Ukoliko je potrebno da postoji istovremena komunikacija u direktnom i povratnom kanalu onda je najčešće potrebno da uređaji sadrže duplekser za razdvajanje frekvencija, ukoliko je razdvajanje predaje i prijema ostvareno u frekvencijskom domenu, što čini hardver složenijim i skupljim. Zato se u većini slučajeva komunikacija odvija na principu vremenskog dupleksa ili frekvencijskog polu-dupleksa. Najveći dio komunikacije se

odvija na *uplink*-u i predstavlja slanje podataka od senzora ka centralnoj lokaciji. Komunikacija u suprotnom smjeru, od centralne lokacije ka uređajima, je mnogo rjeđa i uglavnom se odnosi na slanje podataka neophodnih za sinhronizaciju, konfiguraciju, *update* i sl. Izuzetak, u nekoj mjeri, predstavljaju primjene u okviru pametnih zgrada u kojima se i sa centralne lokacije šalju određene izvršne funkcije. Priroda mašinskih komunikacija se bitno razlikuje u odnosu na komunikacije u kojima učestvuje čovjek. Radi jednostavnosti uređaja ograničava se i njihova predajna snaga pa se pojačavači snage mogu realizovati kao dio integrisanih kola, bez potrebe za eksternim pojačavačima snage. U LTE (*Long Term Evolution*) Release 13 mrežama predajna snaga uređaja ograničena je na 20 dBm. Jednostavan hardver omogućava da uređaji koji se primjenjuju u mMTC mrežama imaju nisku cijenu, pa je samim tim moguća i njihova masivna primjena, [3].

Priroda i zahtjevi masivnih komunikacija mašinskog tipa se značajno razlikuju u odnosu na HTC (*Human Type Communication*) komunikacije. Komunikacije u kojima učestvuje čovjek uglavnom karakteriše potreba za prenosom velike količine podataka, velikom brzinom, sa što manjim kašnjenjem. Dizajn mreža koje zadovoljavaju navedene zahtjeve je uvijek složen i izazovan proces koji u određenoj mjeri olakšava predvidljivost H2H (*Human-to-Human*) komunikacija. Sa druge strane, saobraćaj koji se generiše u mMTC mrežama je sporadičan i nepredvidiv zbog stalnog porasta broja uređaja koji se povezuju na mrežu i novih načina primjene uređaja u IoT aplikacijama. Veliki broj uređaja generiše male količine podataka, koje se prenose malim brzinama do centralne lokacije. Uređaji su slabih procesorskih moći i ograničene potrošnje energije. Sve ovo stavlja novi izazov pred mobilne sisteme koji su trenutno u upotrebi. Osnovni izazov je omogućiti istovremeno postojanje mMTC i H2H komunikacija u jednoj mreži, tj. omogućiti i ljudima i uređajima da koristeći iste tehnike višestrukog pristupa u mreži zadovolje svoje zahtjeve koji se umonogome razlikuju, [4].

2.2. Oblasti primjene mMTC

mMTC komunikacije imaju jako široku primjenu. Ovakve mreže su danas nezaobilazne u prikupljanju i obradi podataka za različite namjene. Tako se mogu

koristiti na širokom geografskom području za nadgledanje i mjerenje različitih parametara, ali i u *indoor* okruženju u vidu raznih *smart home* aplikacija. Osnovne oblasti i tipovi primjene su:

- Zdravstvo, gdje generalni problem prikupljanja podataka o fiziološkom stanju i ponašanju pacijenata kako bi se izvršila dijagnoza, monitoring ili kontrola hroničnih bolesti, može da se u velikoj mjeri riješi upotrebom ove tehnologije. mMTC mogu da doprinesu pravovremenom djelovanju zdravstvenog sistema u hitnim situacijama, kao i sve obimnijem prebacivanju aktivnosti savremene medicine u domen preventivne [5]. Takođe, mMTC pronalaze sve veću primjenu u nadgledanju stanja pacijenata (pritisak, puls, saturacija i sl.), kao i u pružanju pomoći nepokretnim i hendikepiranim osobama. Umrežavanje medicinskih uređaja je još jedna od primjena senzorskih mreža, koja će omogućiti veliki napredak u medicini i doprinijeti lakoj dostupnosti informacija, [6].
- Vojne primjene, kao jedan od pokretača razvoja mMTC. Smatra se da različite vrste senzora mogu značajno doprinijeti u detekciji hemijskih i bioloških prijetnji, ali i detekciji jedinica i pokreta na kopnu i moru. Takođe, ove mreže se mogu koristiti u sistemima za komandu, komunikaciju i kontrolu, kao i u sistemima za osmatranje, nadgledanje i navođenje.
- Građevinarstvo, gdje propadanje i potreba za efikasnim održavanjem građevinskih objekata predstavlja veliki problem širom svijeta. Da bi se omogućilo bezbjedno i efikasno održavanje potrebni su podaci o dugoročnim (statici) i kratkoročnim performansama (dinamici) građevinskih objekata, [7]. Slični problemi, koji mogu da se prevaziđu upotrebom senzorskih mreža, javljaju se i kod složenih i skupih mehaničkih struktura kao što su avioni i plovila.
- Inteligentni transport, gdje mMTC omogućavaju podršku zahvaljujući mogućnosti lakog i jeftinog postavljanja velikog broja senzorskih čvorova, koji mogu u realnom vremenu da vrše monitoring transporta i obezbijede kvalitetne podatke za efikasnije i bezbjednije upravljanje transportom. Takođe, mogu se koristiti za detekciju slobodnih mjesta na parking prostoru, monitoring i upravljanje drumskim saobraćajem i sl.

- Poljoprivreda, kao oblast u kojoj već postoje mnoge primjene senzora koji prate čitave procese proizvodnje od sadnje kultura, do praćenja njihovog rasta, prikupljanja, obrade, skladištenja i transporta. U budućnosti će primjena mMTC u ovoj oblasti postajati sve značajnija.
- Energetika i industrija, gdje se u proteklih nekoliko godina prepoznaje mMTC kao obećavajuća tehnologija koja može da poboljša razne aspekte današnjih elektroenergetskih sistema, uključujući procese proizvodnje, distribucije i održavanja. Zahvaljujući mMTC stvara se nova generacija elektroenergetskih sistema, tzv. pametnih mreža, u kojima su navedeni procesi u velikoj mjeri automatizovani. Takođe, mMTC veliku primjenu pronalaze u raznim industrijskim postrojenjima u kojima omogućavaju udaljeni monitoring stanja raznih mašina i uređaja koji se koriste u procesu proizvodnje, automatizacije proizvodnih procesa, logistike i lanaca snabdijevanja.
- Monitoring okoline, koji predstavlja jednu od prvih primjena mMTC. Tu spada praćenje životnog okruženja raznih bioloških vrsta, detektovanje opasnih hemijskih supstanci i bioloških agenasa, detektovanje pomjeranja tla i predviđanje ove pojave, detektovanje lokacije i karakteristika zemljotresa i pratećih efekata, predviđanje aktivnosti vulkana, predviđanje i detekcija poplava i požara, prikupljanje podataka za vremensku prognozu, itd., [8].
- Pametne kuće i pametni gradovi, kod kojih je zahvaljujući mMTC komunikacijama moguće lokalno ili sa udaljene lokacije vršiti monitoring i upravljanje sistemima u domaćinstvu poput rasvjete, grijanja ili hlađenja, navodnjavanja i raznih bezbjedonosnih sistema. Trend pametnih gradova poslednjih godina postaje sve dominantniji. Razne vrste senzora i uređaja postavljenih na kritičnim mjestima u gradu omogućavaju efikasnije upravljanje saobraćajem, parking prostorom, veću bezbjednost građana zahvaljujući uvođenju video nadzora i sl.

2.3. Trenutni standardi koji definišu mMTC i budući razvoj

Imajući u vidu razvoj mašinskih komunikacija, 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) je razvio tri standarda koji imaju za cilj uvođenje novih funkcionalnosti i poboljšanja u okviru postojećih mobilnih sistema, kako bi se zadovoljili zahtjevi koje

nemaće MTC. Prvi standard se odnosi na proširivanje pokrivenosti postojećeg GSM (*Global System for Mobile Communication*) standarda i nosi naziv EC-GSM (*Extended Coverage GSM*). EC-GSM definiše mogućnost povezivanja do 50000 uređaja po ćeliji, životni vijek baterije do 10 godina, nižu cijenu uređaja (u poređenju sa standardnim GSM/GPRS uređajima) i povećanu sigurnost komunikacije. Implementacija EC-GSM je jednostavna i podrazumijeva softverski *update* postojećih GSM mreža. S obzirom da je preko 90% površine planete pokriveno GSM signalom ovaj standard može imati široku primjenu, naročito u zemljama u kojima je telekomunikaciona infrastruktura još uvijek nedovoljno razvijena, [9].

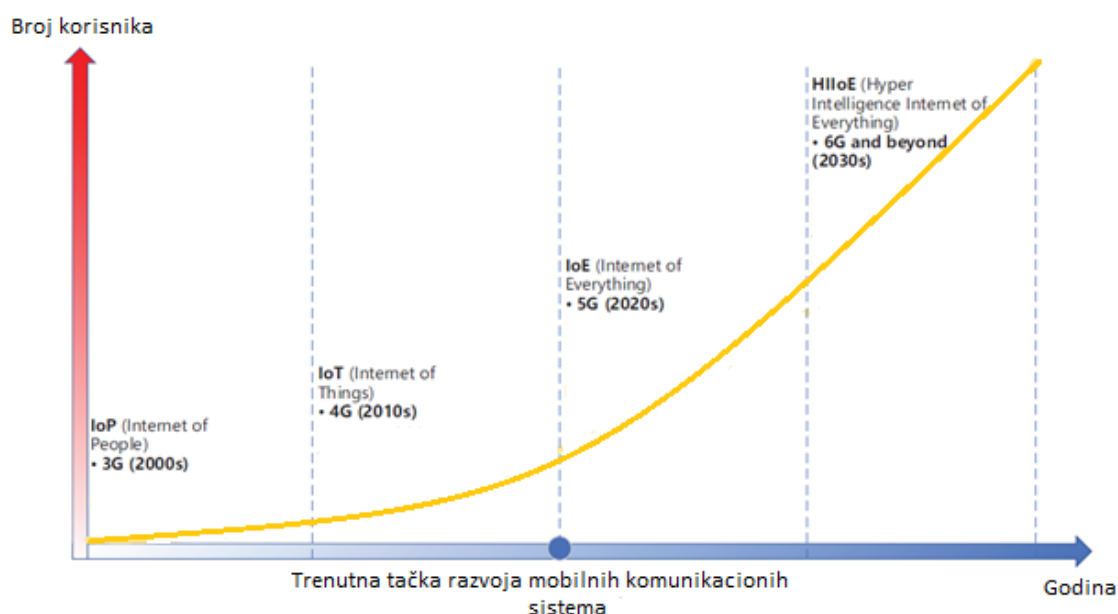
NB-IOT (*Narrow band IOT*) i LTE-M (*LTE for Machine Type Communication*) su preostala dva standarda razvijena od strane 3GPP-a koji imaju za cilj da omoguće masivne komunikacije mašinskog tipa u okviru LTE spektra, [2]. NB-IOT je namijenjen za fiksne senzore, te stoga nema mogućnost *handover-a*, ne podržava prenos govora niti poruka i koristi frekvencijske kanale širine 200kHz za komunikaciju. LTE-M omogućava veće brzine prenosa i manje kašnjenje u poređenju sa prethodna dva standarda, podržava mobilne uređaje i ima mogućnost *handover-a*. Poređenje osnovnih karakteristika navedenih standarda prikazano je u tabeli 2.1.

Masivne komunikacije mašinskog tipa su i dalje u jednoj od ranih faza razvoja, u smislu broja povezanih uređaja koji trenutno komuniciraju. Razlog za veliki porast broja povezanih uređaja koji se očekuje u budućnosti je prelazak iz IoT domena u loE (*Internet of Everything*) domen u kojem će biti povezani ljudi, uređaji, procesi, objekti i sl. Prema jednom od Cisco istraživanja zaključuje se da 99,4% fizičkih objekata koji mogu biti dio loE koncepta trenutno nije povezano. Na slici 2.1. prikazana je evolucija broja uređaja od ranijeg loP (*Internet of People*) koncepta, preko trenutnog IoT koncepta, pa do budućeg loE koncepta, [10].

Tabela 2.1. Poređenje standarda koji definišu mMTC

	LTE-M	NB-IOT	EC-GSM
Brzina prenosa - <i>uplink</i>	1 Mb/s	63 Kb/s	474 Kb/S
Brzina prenosa - <i>downlink</i>	1 Mb/s	27 Kb/s	2 Mb/s

Kašnjenje	10ms - 4s	1.4s - 10s	700ms - 2s
Mobilnost	moguća (<i>handover</i>)	Ograničena	moguća (<i>handover</i>)
Govor	voLTE	Ne	Ne
SMS	Da	Ne	Da
Podaci	Da	Da	Da



Slika 2.1. Porast broja uređaja kroz vrijeme

Nagli porast broja konekcija koji je prikazan na prethodnoj slici dovodi do velikog povećanja količine saobraćaja koji je potrebno prenijeti, kao i do kreiranja velikog broja novih korisničkih scenarija. Posmatrano na globalnom nivou, smatra se da će se količina saobraćaja koja se prenosi u mobilnim mrežama, u periodu od 2010. godine do 2030. godine povećati oko 20000 puta, [11].

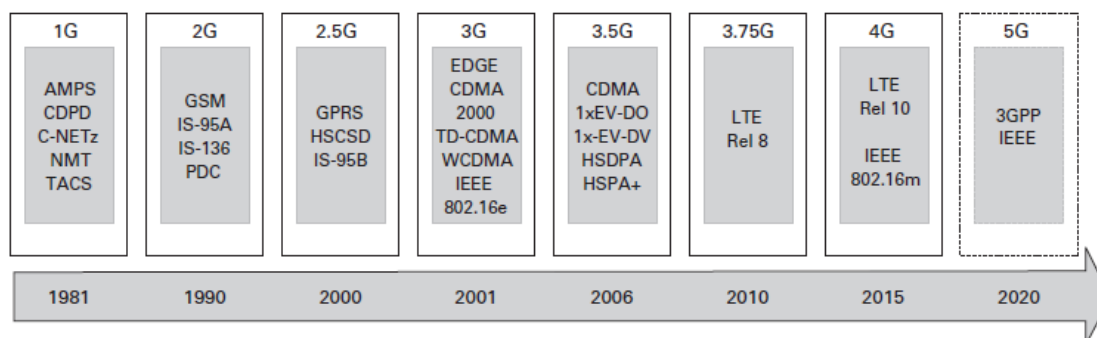
Imajući u vidu da živimo u eri četvrte tehnološke revolucije koja oblikuje svijet na jedan nov i drugačiji način, sva dosadašnja dostignuća u mobilnim komunikacijama nisu dovoljna da podrže i zadovolje buduće potrebe. Uprkos naporima da se u okviru postojećih mobilnih sistema, obezbijedi efikasna platforma za mMTC, i dalje su potrebna brojna unapređenja kako bi se obezbijedila mogućnost komunikacije velikom broju uređaja, bez narušavanja kvaliteta HTC komunikacija. U 4G mrežama

je i dalje veliki izazov obezbjeđenje velike brzine prenosa u uslovima visoke mobilnosti, podrška za masivne komunikacije, minimalno kašnjenje u kritičnim aplikacijama i sl. *Cloud* servisi, autonomna vožnja, primjena robotike u medicini i industriji, pametni i povezani gradovi, dostave bazirane na dronovima su neki od scenarija u kojima postojeće 4G mreže ne mogu obezbijediti zadovoljavajući QoS (*Quality of Services*). Zato su ovo postali ključni zahtjevi koje moraju da omoguće 5G i buduće mreže kroz razvoj nove mrežne arhitekture i novih tehnika višestrukog pristupa korisnika. Trenutno aktuelne generacije mobilnih sistema su bazirane na ortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa i smatra se da je to jedan od osnovnih ograničavajućih faktora za masivnu konektivnost u mMTC komunikacijama, jer ograničen broj ortogonalnih resursa ograničava i maksimalan broj korisnika. Kao rješenje za prevazilaženje navedenih problema, u domenu pristupa korisnika raspoloživom spektru, vidi se prelazak sa trenutno aktuelnih ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa, koje su opisane u Poglavlju 3 ovog rada, na nove, neortogonalne tehnike višestrukog pristupa koje će detaljno biti opisane u Poglavlju 4.

3. ORTOGONALNE TEHNIKE VIŠESTRUKOG PRISTUPA

Ortogonalne tehnike višestrukog pristupa omogućavaju da više korisnika istovremeno pristupa dostupnim vremensko-frekvencijskim resursima, pri čemu su korisnici međusobno razdvojeni u vremenskom, frekvencijskom ili kodnom domenu. Vremenom su se razvijale različite vrste ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa koje su se prilagođavale korisničkim zahtjevima, kako u pogledu brzine prenosa i broja istovremenih konekcija, tako i u pogledu količine i vrste saobraćaja koji se prenosi u mreži. Osim navedenih korisničkih zahtjeva, ove tehnike moraju da prate i promjene navika korisnika pri korišćenju mobilnih uređaja, zahtjeve za sve većom mobilnošću, kao i fleksibilnost u pogledu zahtijevanih aplikacija i servisa.

Gledano hronološki, može se zaključiti da je svaku novu generaciju mobilnih mreža pratio i razvoj novih tehnika višestrukog pristupa. Promjena se dešavala onda kada postojeće tehnike, a samim tim i generacija mobilnih mreža u okviru koje su realizovane, nisu dovoljne da opsluže broj i zahtjeve korisnika koje prirodno nameće ubrzani razvoj tehnologije. Glavne etape u razvoju mobilnih sistema od njihovog nastanka pa do danas su date na slici 3.1., [3].



Slika 3.1. Etape u razvoju mobilnih mreža

Prva generacija (1G) mobilnih sistema nastala je 1979. godine u Japanu, a pravu značajnu primjenu imala je nakon 1981. godine i to u okviru nekoliko različitih standarda: NMT (*Nordic Mobile Telephone*) u nordijskim zemljama, AMPS (*Advanced Mobile Phone system*) u Americi, TACS (*Total Access Communications System*) u Evropi. Prvu generaciju mobilnih sistema čine analogni celularni standardi zasnovani na FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) tehnici

višestrukog pristupa, dok je kao tip dupleksa primijenjen FDD (*Frequency Division Duplex*). U ovim sistemima korišćena su dva frekvencijska kanala po korisniku, jedan za prijem informacija, a drugi za predaju. U praksi je to značilo da se svakom korisniku dodjeljuje prvi slobodan kanal za komunikaciju u datoj ćeliji i korisnik ima pravo na njegovo korišćenje sve do prekida komunikacije, [12]. Ovo je dovelo do neefikasnog korišćenja spektra, interferencije među susjednim kanalima, velikog kašnjenja, ograničene pokrivenosti i ograničenog broja korisnika. Sistemi prve generacije bili su namijenjeni isključivo za prenos govora i nisu se mogli koristiti za prenos podataka, [13].

Da bi se prevazišli nedostaci koji su postojali u prvoj generaciji mobilnih sistema, od 1982. godine započet je razvoj druge generacije (2G) mobilnih mreža od strane CEPT-a (*The European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*). Ovo je bila početna tačka u razvoju GSM-a, dominantnog 2G standarda, koji je internacionalno prihvaćen 1991. godine. Primarni zadatak GSM-a je bio da omogući prenos digitalizovanog govora, te da omogući i ograničen prenos digitalnih poruka. GSM je baziran na hibridnom TDMA (*Time Division Multiple Access*) i FDMA višestrukog pristupu. U ovom konceptu dodijeljeni frekvencijski opseg se dijeli na više kanala kojima korisnici pristupaju u različitim vremenskim intervalima. Glavna prednost ovih sistema ogleda se u tome što je u određenoj mjeri moguće prenositi signale različitog protoka, što se realizuje dodjeljivanjem odgovarajućeg broja vremenskih slotova korisniku.

S obzirom da su potrebe korisnika vremenom postajale sve veće razvijena je i treća generacija mobilnih sistema (3G) koja je imala glavni cilj da omogući prenos podataka većom brzinom uz promjenljivu brzinu signaliziranja po korisniku. Zahvaljujući 3G mobilnim mrežama korisnicima je omogućen širi spektar usluga, poput video poziva. Da bi se to ostvarilo razvijena je CDMA (*Code Division Multiple Access*) tehnika višestrukog pristupa koja je omogućila da više korisnika istovremeno koristi iste frekvencijske i vremenske resurse, pri čemu su korisnici međusobno razdvojeni ortogonalnim pseudo-slučajnim sekvencama. Osim navedene tehnike, postoje i standardi u kojima se primjenjuju neortogonalne CDMA tehnike. Razvojem 3G mreža prvi put je obezbijeđen širokopojasni pristup Internetu, [2]. Osnovni standard koji je prihvaćen za 3G mreže u Evropi je UMTS (*Universal*

Mobile Telecommunications System), koji je kasnije unaprijeđen sa HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*) i HSPA+ (*Evolved High Speed Packet Access*) standardom, koji predstavlja prvi korak ka razvoju još uvijek aktuelne četvrte generacije (4G) mobilnih mreža, [3].

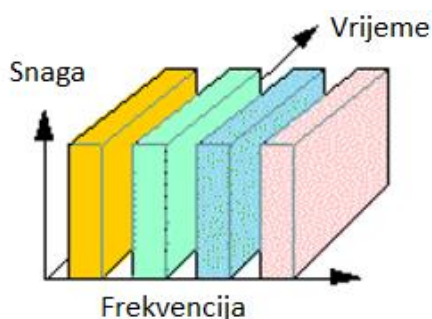
Povećanje broja korisnika, širenje oblasti pokrivanja, veće brzine prenosa i bolji kvalitet servisa, naročito za korisnike na ivici ćelije, bili su glavni pokretači razvoja 4G mreža. Pojavom društvenih mreža i raznih drugih aplikacija, korisnicima je trebalo obezbijediti konstantnu povezanost, mogućnost dijeljenja multimedijalnih sadržaja, ali i odgovarajući kvalitet servisa. Kao i u prethodnim slučajevima, nova generacija mobilnih mreža zasnovana je na razvoju nove tehnike višestrukog pristupa, u ovom slučaju OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Kod ove tehnike svakom korisniku se dodjeljuje skup ortogonalnih podnosilaca za komunikaciju sa baznom stanicom, što dovodi do bolje iskorišćenosti spektra i veće otpornosti na uticaj frekvencijski selektivnog *multipath* fedinga. Četvrta generacija mobilnih mreža, prepoznata po LTE standardu, donijela je značajno unapređenje u poređenju sa prethodnim generacijama mobilnih mreža. LTE, u kome su implementirane MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) tehnike, relejni prenos, agregacija podnosilaca i druge napredne tehnike, omogućava povezivanje velikog broja korisnika uz obezbjeđenje zahtijevane brzine prenosa i kvaliteta servisa, [3].

Zajednička karakteristika svih mobilnih sistema prije 5G je da su bazirani na ortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa. Ortogonalnost podrazumijeva međusobno razdvajanje korisnika u vremenskom, frekvencijskom ili kodnom domenu, zavisno od primijenjene tehnike. Ortogonalna priroda ovih tehnika omogućava da svaki korisnik ima svoj resursni blok u kojem vrši komunikaciju, čime se smanjuje uticaj interferencije među korisnicima, što je i glavni razlog i prednost primjene navedenih tehnika. Zahvaljujući svojstvu ortogonalnosti, sistemi bazirani na ovim tehnikama višestrukog pristupa ne zahtijevaju naročito složene prijemne sklopove i tehnike za demodulaciju signala, što u velikoj mjeri olakšava njihovu implementaciju i čini ih pogodnim za upotrebu.

3.1. Osnovne karakteristike ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa

3.1.1. FDMA

FDMA je najstarija tehnika višestrukog pristupa. Kod ove tehnike dostupan frekvencijski opseg se dijeli na više kanala koji se dodjeljuju korisnicima. Svakom korisniku se dodjeljuje po jedan slobodan kanal u ćeliji kojoj pripada. Korisnik ima pravo na korišćenje datog kanala sve dok postoji potreba za komunikacijom. Komunikacija je dvosmjerna i odvija se istovremeno, slika 3.2, [13]-[14].

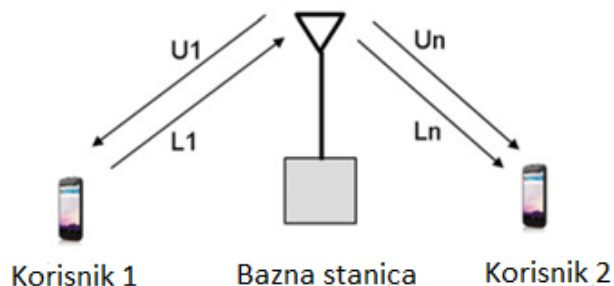


Slika 3.2. Koncept razdvajanja kod FDMA

FDMA se može primjenjivati u kombinaciji sa FDD (*Frequency Division Duplex*) ili TDD (*Time Division Duplex*) dupleksom. Kada se primjenjuje FDD dupleks svakom korisniku se dodjeljuju dvije frekvencije za komunikaciju, jedna iz nižeg i jedna iz višeg dostupnog frekvencijskog opsega. Frekvencija iz nižeg opsega se uglavnom koristi za *uplink* komunikaciju od mobilnog terminala do bazne stanice, a frekvencija iz višeg opsega se koristi za *downlink* komunikaciju od bazne stanice ka mobilnom terminalu. Frekvencije su međusobno razdvojene zaštitnim intervalom. Na ovaj način komunikacija u oba smjera se odvija istovremeno, ali na različitim frekvencijama, slika 3.3, [12].

U slučaju primjene TDD dupleksa *uplink* i *downlink* komunikacija se odvija na istoj frekvenciji, ali u različitim vremenskim intervalima. Podaci se u ovom slučaju dijele na okvire (*frame-ove*), pri čemu je jedan *frame* sastavljen od više vremenskih slotova. Svaki *frame* se sastoji od informacionih simbola i sinhronizacionih bita, koji

su jedinstveni za svaki vremenski slot i koriste se za sinhronizaciju *frame*-a. Direktni i povratni kanal su razdvojeni vremenskim intervalom koji mora biti dovoljno kratak tako da korisnik ima utisak da se komunikacija odvija istovremeno.



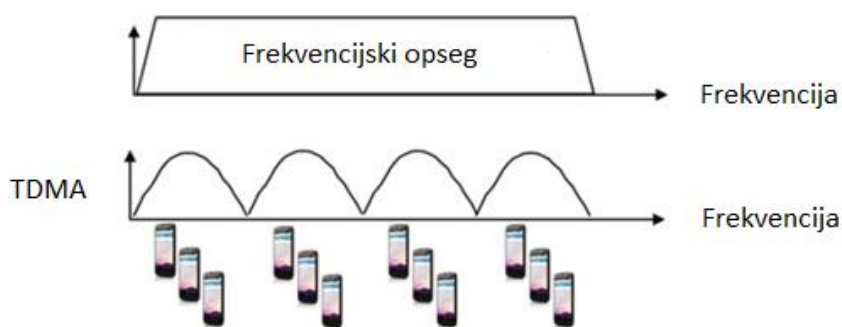
Slika 3.3. Koncept FDMA/FDD komunikacije

Postoji nekoliko razlika između sistema baziranih na frekvencijskom i vremenskom dupleksu. FDD je pogodan za sisteme kod kojih se svakom korisniku dodjeljuje nezavisna frekvencija. Kod ovih sistema je veoma važna pravilna alokacija frekvencija na direktnom i povratnom kanalu, ali i generalna raspodjela frekvencija među korisnicima u ćeliji. Sa druge strane, TDD komunikacija se odvija na istoj frekvenciji pri čemu predajnik u jednom trenutku radi u predajnom, a u drugom u prijemnom režimu. S obzirom da ovakav vid komunikacije ne predstavlja istovremenu dvosmjernu komunikaciju u pravom smislu te riječi, potrebno je kašnjenja u direktnom i povratnom kanalu svesti na minimum. Zbog toga su TDD sistemi pogodni u onim situacijama u kojima je korisnik stacionaran pa nema značajnih propagacionih kašnjenja.

Glavna prednost FDMA sistema ogleda se u jednostavnoj hardverskoj implementaciji. Ova tehnika pokazuje donekle dobre rezultate ukoliko se primjenjuje u sistemima sa malim brojem korisnika koji generišu ograničenu količinu saobraćaja. U nedostatke se ubraja složen proces planiranja i raspodjele frekvencija, slaba iskorišćenost spektra zbog kanala koji se nalaze u „praznom hodu” i po kojima se ne vrši komunikacija. Suštinski nedostatak je u neprimjenljivosti ove tehnike za prenos signala različitim brzinama signaliziranja, obzirom da su FDMA kanali fiksne širine.

3.1.2. TDMA

TDMA tehnika omogućava da korisnici dodijeljenim kanalima za komunikaciju pristupaju po principu vremenske raspodjele. To znači da istu frekvenciju može koristiti više korisnika, ali u različitim vremenskim intervalima. Zato se TDMA tehnika može posmatrati kao proširenje i unapređenje FDMA jer prevazilazi njena ključna ograničenja. TDMA se obično primjenjuje u kombinaciji sa FDD dupleksom. Na TDMA/FDD konceptu bazirana je druga generacija mobilnih mreža, uključujući i GSM standard. U ovom slučaju frekvencijama koje se koriste za *uplink* i *downlink* komunikaciju pristupa više korisnika, ali u različitim vremenskim intervalima (slotovima), slika 3.4, [12].

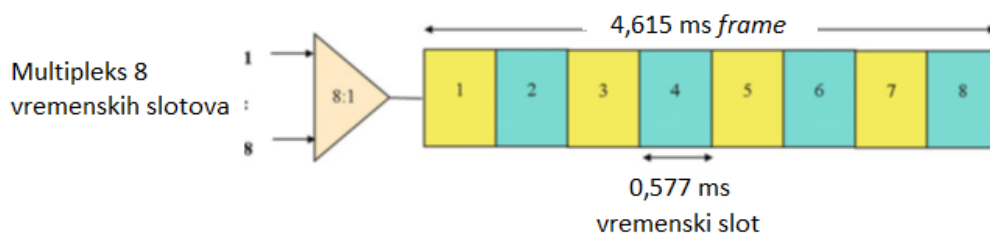


Slika 3.4. Koncept pristupa korisnika frekvencijskom opsegu na bazi TDMA

S obzirom da se ista frekvencija vremenski dijeli između različitih korisnika, u ovim sistemima je veoma važna sinhronizacija. Sinhronizacija omogućava da svi korisnici imaju ravnopravnu mogućnost pristupa spektru, sprečava nepotrebno gubljenje vremenskih slotova i koliziju među korisnicima. Da bi se ostvarila sinhronizacija podaci se organizuju u *frame*-ove koji se sastoje od više vremenskih slotova. Svaki vremenski slot u *frame*-u se dodjeljuje jednom korisniku, što znači da u određenom vremenskom trenutku samo jedan korisnik može imati pristup kanalu. U svim TDMA sistemima princip formiranja *frame*-ova je isti, ali se njihova struktura u smislu broja i trajanja vremenskih slotova unutar jednog *frame*-a može razlikovati.

U GSM sistemima dostupan frekvencijski opseg se dijeli na kanale širine 200 kHz, pri čemu se svakom kanalu pristupa preko 8 vremenskih slotova kojima se razdvajaju korisnici. GSM *frame* sa sastoji od 8 vremenskih slotova i traje 4,615 ms.

Jedan vremenski slot unutar *frame*-a je trajanja 0,577 ms, sadrži 156,25 bita, pa je brzina signaliziranja 270,83 kb/s. Struktura GSM okvira prikazana je na slici 3.5.



Slika 3.5. Struktura GSM okvira

Pomenuti okviri (*frame*-ovi) se grupišu u toku prenosa u veće strukture tako da u TDMA GSM hijerarhiji razlikujemo multi *frame*-ove, super *frame*-ove i hiper *frame*-ove. Postoje dva tipa multi *frame*-ova, [12]:

- Kontrolni multi *frame*-ovi koji se sastoje od 51 vremenskog slotova i služe za prenos kontrolnih informacija neophodnih za generalnu sinhronizaciju u sistemu, dodjelu kanala, *handoff*, *paging* i sl. i
- Multi *frame*-ovi koji se sastoje od 26 vremenskih slotova u kojima se prenose podaci.

Kombinacijom više multi *frame*-ova dobijaju se super *frame*-ovi koji se mogu sastojati od 51 kontrolnog multi *frame*-a i 26 multi *frame*-ova za prenos podataka ili od 26 kontrolnih i 51 multi *frame*-a za prenos podataka. Na vrhu hijerarhije nalaze se hiper *frame*-ovi koji se sastoje od 2048 *frame*-ova. Hiper *frame*-ovi imaju različite uloge, između ostalog da omoguće enkripciju i sinhronizovano frekvencijsko skakanje u sklopu predajnika i prijemnika na novu frekvenciju. Tehnika frekvencijskog skakanja će punu primjenu doživjeti u CDMA tehnikama višestrukog pristupa.

Prednost TDMA tehnike u odnosu na FDMA ogleda se u boljoj iskorišćenosti spektra, jer se u istom frekvencijskom opsegu može obezbijediti komunikacija za veći broj korisnika. Takođe, TDMA tehnika može omogućiti u određenoj mjeri korisnicima prenos podataka različitim brzinama signaliziranja. Sa druge strane, hardverske komponente neophodne za implementaciju TDMA sistema su složenije nego u slučaju FDMA sistema, a neophodna je naprednija sinhronizacija.

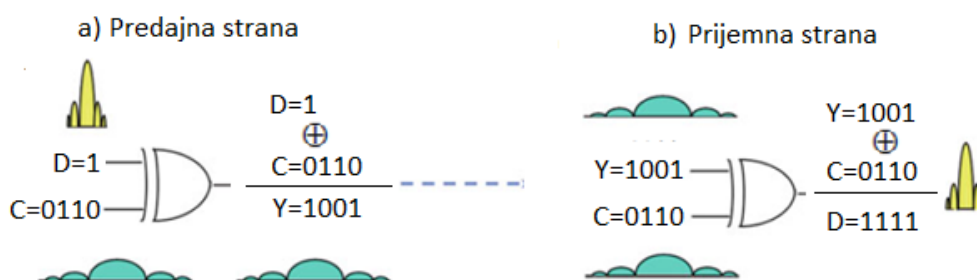
3.1.3. CDMA

Ortogonalne CDMA tehnike višestrukog pristupa omogućavaju da više korisnika istovremeno koristi dostupne frekvencijske resurse pri čemu su korisnici međusobno razdvojeni ortogonalnim pseudo-slučajnim sekvencama. Zahvaljujući ovoj tehnici prvi put je omogućen širokopojasni pristup jer je data mogućnost većem broju korisnika da istovremeno pristupi istom frekvencijskom opsegu, čime su prevaziđena ograničenja FDMA i TDMA tehnika.

Ortogonalna CDMA tehnika višestrukog pristupa spada u tehnike prenosa proširenim spektrom i može se realizovati na dva načina:

- tehnikom direktne sekvence DS-CDMA (*Direct Sequence CDMA*) i
- tehnikom frekvencijskog skakanja FH-CDMA (*Frequency Hopping CDMA*).

DS-CDMA tehnika funkcioniše na način što se na predajnoj strani signal koji nosi korisničke podatke množi sa pseudo-slučajnim kodom čiji signalizacioni interval traje značajno kraće od signalizacionog intervala ulaznog signala. Signal koji se dobija kao rezultat ove operacije se zatim moduliše i prenosi komunikacionim kanalom. Na prijemnoj strani se dobijeni signal množi sa istim pseudo-slučajnim kodom i na taj način se dobija originalni poslani signal. Pomenuto množenje zapravo predstavlja operaciju ekskluzivno ILLI, i njegova realizacija je prikazana na slici 3.6, [12].



Slika 3.6. Koncept kodiranja kod DS-SS tehnike

Način na koji se vrši prenos tehnikom proširenog spektra može se jednostavno opisati na primjeru prenosa jednog bita. Ukoliko se vrši prenos bita 1, a kao pseudo-slučajni kod se koristi sekvenca 0110, rezultat operacije ekskluzivno ILLI je kod 1001. Rezultujući kod ima trajanje signalizacionog intervala koje je jednako trajanju

signalizacionog intervala pseudo-slučajnog koda i ono je četiri puta manje od trajanja signalizacionog intervala originalnog signala. Sa druge strane, spektar koji zauzima ovaj signal je četiri puta širi od spektra originalnog signala. Na prijemnoj strani vrši se množenje primljenog signala proširenog spektra istim pseudo-slučajnim kodom i kao rezultat operacije dobija se originalni poslani signal.

$$1001 \oplus 0110 = 1111 \quad (3.1)$$

Snaga originalnog signala i signala kodiranog spektra je ista, ali se amplitude signala razlikuju. Amplituda originalnog signala je četiri puta veća od amplitude kodiranog signala. Glavni cilj prenosa signala tehnikom proširenog spektra je omogućavanje pristupa korisnika sistemu koji zahtjevaju različite brzine signaliziranja uz smanjenje uskopojasne interferencije.

U CDMA sistemima se svakom korisniku dodjeljuje jedinstveni ortogonalni pseudo-slučajni kod čime se postiže da se samo signal datog korisnika na prijemu može pravilno regenerisati. Kada se signali ostalih korisnika pomnože sa neodgovarajućom pseudo-slučajnom sekvencom njihov spektar ostaje i dalje proširen i samim tim se mogu posmatrati kao interferencija u odnosu na signal datog korisnika.

Kod FH-CDMA tehnike vrši se promjena frekvencije nosioca u skladu sa nekom pseudo-slučajnom šemom koja je poznata predajniku i prijemniku. Osnovni cilj primjene ove tehnike je smanjenje susjednoćelijske interferencije. U cilju smanjenja uticaja dubokog *multipath* fedinga, koji se može javiti prilikom promjene frekvencije primjenjuje se *interleaving*, kao i kodovi za kontrolu greške. U zavisnosti od brzine frekvencijskog skakanja, frekvencija nosioca se može promijeniti više puta u toku prenosa jednog simbola ili se više simbola može prenijeti na istoj frekvenciji. U tom smislu razlikujemo sporo i brzo frekvencijsko skakanje. Kada se u sistemu primjenjuje FH tehnika ona donosi dodatni nivo zaštite, naročito u slučajevima kada je veliki broj frekvencija u upotrebi, jer je veoma teško korisniku koji ne poznaje pseudo-slučajnu šemu po kojoj se vrši promjena frekvencije da ometa komunikaciju.

Generalno, problem koji se javlja u sistemima baziranim na DS-CDMA tehnici je tzv. *near-far* problem. Ovaj problem se javlja kod korisnika na ivici ćelije u slučajevima

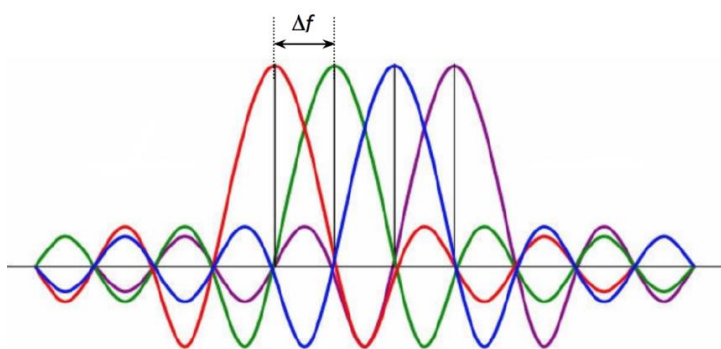
kada je veliki broj korisnika prisutan u radio kanalu, i izražen je na *uplink*-u. Tada se signal korisnika koji nema dobre uslove na kanalu ne može pravilno detektovati zbog interferencije od strane korisnika sa boljim uslovima na kanalu čiji su signali mnogo većeg nivoa snage i maskiraju signal željenog korisnika. Rješenje za ovaj problem je kontrola snage, koja će biti znatno složenija nego u sistemima zasnovanim na FDMA i TDMA pristupu. Bazna stanica vrši česte provjere odnosa signal/šum i upoređuje ih sa dozvoljenim odnosom. Ukoliko se u tom procesu dođe do zaključka da je odnos visok ili nizak u odnosu na dozvoljeni nivo, bazna stanica šalje informaciju mobilnim terminalima da je potrebno smanjiti ili povećati nivo snage kojom šalju signale baznoj stanici. Na ovaj način obezbjeđuje se da bazna stanica od svih korisnika u oblasti pokrivanja dobija signal približno iste snage.

Za razliku od TDMA i FDMA tehnika, broj korisnika u sistemima baziranim na CDMA tehnici nije striktno ograničen. Iako nema striktnog ograničenja po pitanju broja korisnika u CDMA sistemima, ipak se sa povećanjem broja korisnika iznad određenog broja u sistemu stvara interferencija i narušavaju se performanse komunikacije svih korisnika, [14].

3.1.4. OFDMA

Da bi se prevazišao problem ograničenja informacionog kapaciteta u mrežama treće generacije (3G), uzrokovan pojavom frekvencijski selektivnog fedinga, razvijena je OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) tehnika. Ova tehnika ima za cilj da na ulazu prijemnika obezbijedi frekvencijski ravan feding. Na bazi ove tehnike razvijen je i koncept višestrukog pristupa na bazi OFDM-a (OFDMA). Pored rješenja problema frekvencijski selektivnog fedinga, koji kod sistema sa jednim nosiocem (SC – *Single Carrier*), karakterističnim za mreže prije 4G, ne omogućava dalje povećanje informacionog kapaciteta sistema, OFDM se pokazala i kao spektralno efikasna tehnika. Efikasno korišćenje spektra kao ograničenog prirodnog resursa, pored povećanja informacionog kapaciteta, postavlja se kao ključni zahtjev pred mreže narednih generacija. Zbog toga OFDMA predstavlja tehniku višestrukog pristupa u 4G sistemima. OFDM je prvi put razvijen sredinom XX vijeka, ali tada nije doživio značajniju upotrebu zbog složenog načina realizacije. OFDM doživljava punu primjenu sa razvojem IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) i FFT (*Fast Fourier*

Transform) koje se koriste na predajnoj i prijemnoj strani. OFDM se zasniva na konceptu u kojem se dostupan frekvencijski opseg dijeli na više međusobno ortogonalnih podkanala. Ortogonalnost podnosilaca omogućava da se u paralelnim granama signali u određenoj mjeri preklapaju u spektru. Na ovaj način ostvaruje se bolja iskorišćenost spektra, zato što je za prenos OFDM simbola potreban uži frekvencijski opseg nego za prenos signala koji se prenosi jednim nosiocem pri istoj korisničkoj brzini signaliziranja. Kod OFDM-a se podaci koji se prenose dijele na više paralelnih tokova i nezavisno se šalju preko ortogonalnih podnosilaca, [15]. Ortogonalni podnosioci su prikazani na slici 3.7.



Slika 3.7. Ortogonalni podnosioci

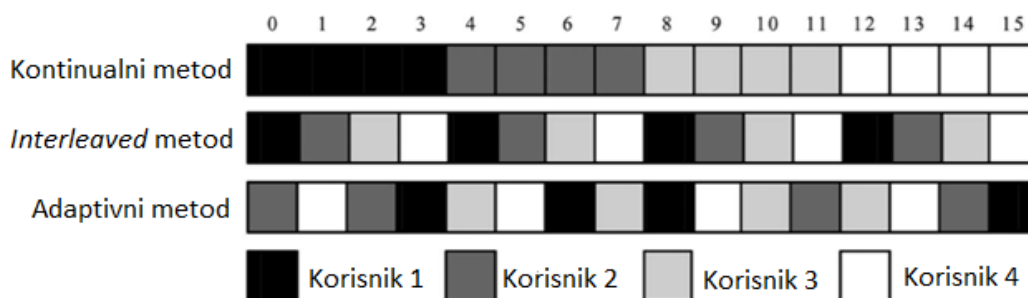
U svakom od podkanala brzina prenosa je K puta manja od brzine prenosa originalnog signala, pa je K puta manji i opseg koji zauzima signal u podkanalima. Izborom broja K može se postići da po svakom podnosiocu opseg prenošenog signala bude manji od koherentnog opsega mobilnog radio kanala, čime se obezbeđuje da mobilni radio kanal bude frekvencijski ravan. Kao dodatni vid zaštite od intersimbolske interferencije između OFDM simbola, svakom simbolu se dodaje zaštitni (*guard interval*) i ciklični prefiks. Ciklični prefiks sadrži kopiju poslednjeg dijela OFDM simbola i ima važnu ulogu u vremenskoj sinhronizaciji predajnika i prijemnika, jer zahvaljujući njemu signal postaje periodičan pa se mogu lakše identifikovati *frame*-ovi. Dodavanjem cikličnog prefiksa trajanje OFDM simbola se povećava, a spektralna efikasnost sistema se smanjuje.

S obzirom da je glavna karakteristika na kojoj je baziran OFDM ortogonalnost podnosilaca, sinhronizacija u ovim sistemima ima veoma važnu ulogu. Za pravilnu

sinhronizaciju predajnika i prijemnika prije svega je potrebno smanjiti na najmanju moguću mjeru frekvencijski *offset*.

Frekvencijski *offset* može nastati kao posledica *Doppler*-ovog pomjeraja koji nastaje usled mobilnosti korisnika. To dovodi do narušavanja ortogonalnosti podnosilaca, što za posledicu ima nepravilnu demodulaciju signala. Da bi pravilna demodulacija signala bila moguća potrebno je da u tački u kojoj svaki od podnosilaca ima maksimalnu vrijednost amplitude, svi ostali podnosioci imaju vrijednosti amplitude jednaku nuli. Kada postoji frekvencijski *offset*, u trenutku odabiranja simbola na prijemu, pojavljuju se i komponente drugih simbola pa nije moguće pravilno demodulisati simbol od interesa. Zato je posledica frekvencijskog *offset*-a stvaranje interferencije između podnosilaca.

OFDMA je tehnika višestrukog pristupa koja je zasnovana na OFDM-u. Kod OFDMA tehnike svakom korisniku se dodjeljuje skup ortogonalnih podnosilaca za komunikaciju sa baznom stanicom, dok se kod OFDM-a signal jednog korisnika prenosi preko više podnosilaca. Postoje različiti načini na koje se može izvršiti dodjela ortogonalnih podnosilaca korisnicima u okviru ćelije. Jedan od načina je da se korisnicima dodjeljuju susjedni podnosioci (kontinualna raspodjela), drugi način je da se svakom korisniku dodijeli po jedan podnosilac i da se raspodjela na taj način nastavi sve do poslednjeg podnosioca u ćeliji (*interleaved* metod) i treći način je slučajna ili adaptivna raspodjela podnosilaca. Mana kontinualne raspodjele podnosilaca je što se ne iskorišćava na pravi način frekvencijski *diversity* koji omogućava upotreba višestrukih podnosilaca. Kontinualna raspodjela podnosilaca je podložna uticaju dubokog fadinga koji, u ovom slučaju, zahvata nekoliko podnosilaca koji pripadaju istom korisniku i na taj način značajno urušava kvalitet signala datog korisnika. Kod *interleaved* metoda podnosioci su uniformno raspoređeni među korisnicima. Iako se na ovaj način značajno umanjuje uticaj fadinga, ipak najbolje rezultate pokazuje adaptivna raspodjela podnosilaca u kojoj način dodjele podnosioca korisnicima nije unaprijed određen, već korisnici mogu izabrati podnosioca koji u datom momentu imaju najbolje karakteristike (npr. imaju najbolji odnos signal/šum), [15]. Načini dodjele podnosilaca prikazani su na slici 3.8.



Slika 3.8. Načini dodjele podnosilaca u OFDM sistemu

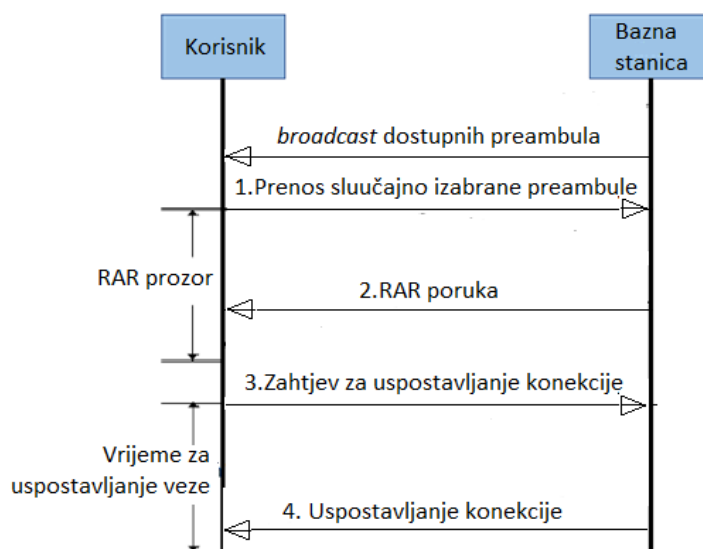
Generalno, OFDMA tehnika ima brojne prednosti u poređenju sa tehnikama višestrukog pristupa zastupljenim u prethodnim generacijama mobilnih mreža, zbog čega je i našla široku primjenu i postala tehnika na kojoj se zasniva pristup u 4G mobilnim sistemima. Glavne prednosti OFDMA tehnike ogledaju se u:

- Velikoj spektralnoj efikasnosti zbog upotrebe ortogonalnih podnosilaca;
- Kontrolu snage na svakom od podkanala;
- Otpornosti na frekvencijski selektivni fading;
- Smanjenom uticaju uskopojasne interferencije;
- Brzini prenosa koja se može prilagoditi uslovima na kanalu;
- Mogućnosti, u slučaju potrebe, korišćenja različitih modulacija na različitim podnosiocima;
- Korišćenju savremenih tehnika obrade signala u njenoj realizaciji.

3.2. Izazovi u primjeni ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa u masivnim komunikacijama mašinskog tipa

Poseban izazov u dizajniranju i primjeni ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa poslednjih godina predstavlja činjenica da one moraju biti prilagođene naglom porastu broja uređaja koji komuniciraju međusobno ili sa centralnom lokacijom, bez učešća ili sa minimalnim učešćem čovjeka. U slučaju velikog broja korisnika, ortogonalni način pristupa spektru stvara kolizije i zagušenja jer su resursi koji se dodjeljuju korisnicima ograničeni, kao posledica njihove ortogonalnosti. Zato se smatra da su ortogonalne tehnike višestrukog pristupa jedna od glavnih prepreka za primjenu masivnih komunikacija mašinskog tipa u postojećim mobilnim mrežama.

Problemi koje izaziva ograničen broj ortogonalnih resursa najbolje se mogu vidjeti ako se analizira procedura za pristup korisnika kanalu u LTE/LTE-A sistemima. Navedena procedura u kojoj korisnik pristupa kanalu i traži od bazne stanice slobodan slot za prenos zasnovana je na slučajnom pristupu i naziva se RA (*Random Access*) procedura. Ova procedura primjenjuje se kod inicijalnog uspostavljanja komunikacije, *uplink* sinhronizacije, ponovnog uspostavljanja komunikacije u slučaju prekida, *handover-a* između ćelija. RA procedura u LTE/LTE-A mrežama se odvija u četiri faze kao što je prikazano na slici 3.9, [16].



Slika 3.9. RA procedura u LTE sistemima

Postupak počinje tako što bazna stanica šalje informaciju o dostupnim PRACH (*Physical Random Access Channel*) slotovima svim uređajima, u vidu *broadcast-a*. U LTE sistemima svaka ćelija sadrži 64 ortogonalna OFDM podnosioca, tzv. preambule. Svaki od uređaja, u prvom dostupnom RA slotu, bira jednu od moguće 64 ortogonalne preambule i šalje je baznoj stanici i ovo predstavlja prvi korak u RA proceduri. Bazna stanica prima poslatu preambulu i vrši kros-korelaciju sa svim drugim preambulama u ćeliji. S obzirom da su preambule međusobno ortogonalne, rezultat korelacija sa ostalim signalima je jednak 0. Na osnovu detektovane preambule bazna stanica može da procijeni određene parametre korisničkog kanala poput težinskog koeficijenta kanala, vremena potrebnog za prenos do korisnika i sl. Ukoliko dva ili više korisnika izabere istu preambulu, bazna stanica detektuje primljeni signal kao signal koji je stigao do nje različitim putanjama i na taj način detektuje koliziju. Sve detektovane kolizije se odbacuju i uređaji moraju da čekaju

novi slobodni RA slot da bi opet započeli proceduru, [6]. Bazna stanica šalje korisnicima čije je preambule uspješno detektovala RAR (*Random Access Response*), koji sadrži informacije o dodijeljenim radio resursima i parametrima neophodnim za sinhronizaciju. Ovo predstavlja drugi korak u RA proceduri. Ukoliko uređaj ne dobije RAR u unaprijed definisanom vremenu, ili dobije RAR koji ne sadrži dodijeljene resurse, ponavlja proceduru iz prvog koraka. Nakon što stigne RAR, uređaj šalje baznoj stanici zahtjev za uspostavljanje konekcije, što predstavlja treći korak u RA proceduri. RA procedura se završava tako što bazna stanica odobrava zahtjev za uspostavljanje konekcije i dodjeljuje resurse za komunikaciju svim korisnicima koji su uspješno prošli prethodna tri koraka. Uređaji tada vrše prenos podataka koristeći dodijeljene vremensko-frekvencijske resurse.

Kao što je ranije pomenuto, svaka LTE ćelija sadrži 64 preambule, tj. ortogonalna OFDM podnosioca. U većini slučajeva deset od navedenih 64 OFDM podnosilaca je rezervisano za kritične scenarije u kojima je neophodno da korisnik ostvari što bržu komunikaciju sa baznom stanicom. Primjer za to je slučaj kada korisnik prelazi iz jedne ćelije u drugu i neophodno je da odmah dobije potrebne resurse za prenos podataka kako se komunikacija ne bi prekinula. Ovo znači da ostaju 54 slobodne preambule za standardne korisnike. Pristup korisnika kanalu u RA proceduri ima trajanje od 5ms, što znači da je ukupan broj dostupnih preambula 10800 u sekundi i to predstavlja maksimalni kapacitet sistema u datoj ćeliji. Navedeni maksimalni kapacitet se može ostvariti samo u slučaju kada ne dolazi do pojave kolizije među korisnicima, tj. kada je svaka preambula odabrana samo od strane jednog korisnika, što u praksi nije realno. Generalno, sa povećanjem broja korisnika, povećava se i broj kolizija među korisnicima, a samim tim se narušavaju performanse cjelokupnog sistema.

Iz svega navedenog zaključuje se da primjena ortogonalnih tehnika u masivnim komunikacijama mašinskog tipa nosi sa sobom brojna ograničenja. Osnovni ograničavajući faktor je konačan i ograničen broj ortogonalnih resursa koji ne može da isprati nagli rast broja korisnika u IoT segmentu. Sve ovo za posledicu ima nekoliko tipičnih problema koji se javljaju kada se govori o primjeni ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa u mMTC mrežama:

- Kolizija je jedan od najčešćih problema koji se javlja u mMTC mrežama i nastaje kada dva ili više uređaja odabere istu preambulu za pristup baznoj stanici u prvom koraku RA procedure. Tada oba uređaja moraju čekati prvi naredni slobodan RA slot za prenos što dovodi do kašnjenja u prenosu signala, gubljenja paketa, neiskorišćenih radio resursa i zagušenja u mreži. Sa povećanjem broja korisnika, situacija postaje složenija. Iako se razvijaju brojne tehnike koje bi trebalo da pomognu u prevazilaženju ovog problema, nijedna od njih ne daje dovoljno dobre rezultate koji bi omogućili zadovoljenje potreba IoT aplikacija.
- Prilikom uspostavljanja komunikacije u LTE sistemima, velike količine resursa se troše na prenos zaglavlja i informacija neophodnih za samo uspostavljanje veze. Ovaj problem je naročito izražen u mMTC u kojima veliki broj uređaja istovremeno prenosi male količine podataka. Recimo, za prenos 100B podataka, obično je potrebno 59B na *uplink*-u i 136B na *downlink*-u za prenos zaglavlja i propratnih signalnih informacija. Kada se navedeni problem posmatra u kontekstu velikog broja konekcija, koji je potreban u mMTC, dolazi se do zaključka da je više resursa potrebno za prenos propratnih informacija neophodnih za uspostavljanje i održavanje veze, nego za sami prenos podataka. Jedan od načina na koji se pokušava umanjiti navedeni problem je agregacija nosilaca, ali se ona može primijeniti samo kod komunikacija koje su tolerantne na kašnjenje u određenoj mjeri.
- mMTC karakterišu različiti zahtjevi po pitanju kvaliteta servisa koji moraju biti uzeti u obzir prilikom dizajniranja tehnika za višestruki pristup uređaja. U određenim slučajevima, poput raznih alarmnih stanja, informacija mora biti prenijeta za manje od 10ms, dok u drugim slučajevima informacija može biti prenijeta i sa kašnjenjem od nekoliko sati. Primjer za ovo su različite vrste senzora za očitavanje raznih parametara životne sredine. Ortogonalne tehnike višestrukog pristupa oba navedena scenarija tretiraju na isti način što za posledicu ima gubitke resursa, prekide servisa, nebalansiran saobraćaj u mreži i sl.
- Današnji mobilni radio sistemi i ortogonalne tehnike višestrukog pristupa na kojima su bazirani prvenstveno su razvijeni u skladu sa HTC zahtjevima, koji se u velikoj mjeri razlikuju od potreba u mMTC. Zato je veoma teško prilagoditi mobilne sisteme tako da istovremeno efikasno podržavaju i HTC i

mMTC. S obzirom da broj korisnika u mMTC neuporedivo brže raste u odnosu na broj korisnika u HTC, mMTC komunikacije bi mogle da predstavljaju prepreku za odvijanje HTC komunikacija.

Prethodno opisani izazovi i ograničenja predstavljaju osnovni nedostatak ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa i čine ih nepogodnim za primjenu u mMTC. Generalno, može se zaključiti da su ortogonalne tehnike višestrukog pristupa bile optimalno rješenje za HTC, međutim njihova efikasnost opada kada im se opseg primjene proširi i na mMTC. Imajući u vidu da ljudi više nisu dominantni korisnici i učesnici u komunikaciji, već to postaju različite vrste senzora i uređaja, ekspanzija mMTC u narednim godinama je izvjesna. Zato je neophodno obezbijediti platformu za uspješnu implementaciju ovog tipa komunikacija koji sa sobom nosi brojne specifičnosti u odnosu na dosadašnje komunikacije. To zahtijeva promjene u samoj arhitekturi, tehnikama pristupa i servisima mobilnih mreža, jer se u fokusu njihovog razvoja, pored ljudi, sada nalaze i uređaji.

Imajući u vidu da postojeće 4G mreže ne mogu da podrže očekivano povećanje broja korisnika, poslednjih godina se intenzivno radilo na razvoju pete generacije mobilnih mreža čija je implementacija već uveliko započeta u velikom broju zemalja. 3GPP za 5G mreže predviđa maksimalno povezivanje do 300000 korisnika po ćeliji, što je 10 puta više u odnosu na trenutne zahtjeve u 4G mrežama. Da bi se obezbijedila mogućnost komunikacije za tako veliki broj korisnika, prije svega je potrebno prevazići već opisani problem ograničenih resursa u ortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa. Zato se za 5G mreže i buduće komunikacije razmatra novi koncept neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa o kojima će biti više riječi u narednom poglavlju ovog rada.

4. NEORTOGONALNE TEHNIKE VIŠESTRUKOG PRISTUPA

Neortogonalne tehnike višestrukog pristupa zasnivaju se na dodjeli neortogonalnih resursa korisnicima, što znači da je korisnicima dozvoljeno da koriste iste vremenske, frekvencijske ili kodne resurse za komunikaciju. Glavni motiv za uvođenje neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa je, kao što je ranije navedeno, prevazilaženje ograničenja u broju korisnika koje je posledica same prirode ortogonalnih tehnika. Neortogonalne tehnike omogućavaju komunikaciju većem broju korisnika unutar istog resursnog bloka pa se zahvaljujući tome postiže bolja spektralna efikasnost u odnosu na ortogonalne tehnike, kao i masivna konektivnost. Ovakav koncept donosi i brojne izazove, poput kompleksnijih prijemnih sklopova, implementacije složenijih tehnika za uklanjanje interferencije i sl. Generalno, NOMA tehnike se mogu podijeliti na dvije grupe: neortogonalni pristup u domenu koda CD-NOMA (*Code Domain NOMA*) i neortogonalni pristup u domenu snage PD-NOMA (*Power Domain NOMA*). CD-NOMA se zasniva na sličnom principu kao i CDMA tehnika. Razlika u odnosu na CDMA pristup je što se kod ove tehnike ne koriste međusobno ortogonalni kodovi kao *spreading* sekvence. Iako CD-NOMA, zahvaljujući većem kodnom dobitku, može značajno da poveća spektralnu efikasnost u sistemima u kojima se primjenjuje, u naučnim krugovima trenutno mnogo više pažnje privlači PD-NOMA. Razlog za to je činjenica da je njena implementacija mnogo jednostavnija posmatrano iz ugla postojeće infrastrukture u 4G sistemima, [17]. Zato je predmet i ovog rada PD-NOMA i u nastavku rada pod pojmom NOMA tehnika će se podrazumijevati PD-NOMA tehnike.

Osnovna ideja na kojoj se zasniva PD-NOMA je da korisnici međusobno budu razdvojeni u domenu snage, pri čemu mogu koristiti iste vremenske i frekvencijske resurse za komunikaciju. Razdvajanje u domenu snage zapravo znači dodjeljivanje različitog nivoa snage korisnicima u zavisnosti od karakteristika njihovih komunikacionih kanala. Korisnici koji imaju bolje uslove na komunikacionom kanalu dobijaju niži nivo snage, dok korisnici koji imaju slabije uslove na kanalu dobijaju viši nivo snage. Na taj način smanjuje se interferencija koju izazivaju korisnici sa dobrim uslovima na komunikacionom kanalu i omogućava se bolji QoS za korisnike sa lošijim uslovima na kanalu, [18]. Iz svega navedenog se vidi da je optimalna

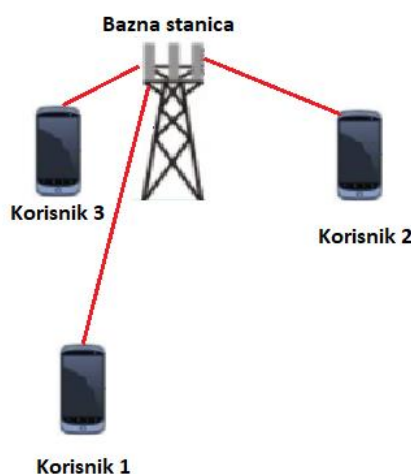
raspodjela snage među korisnicima ključna za pravilno funkcionisanje NOMA tehnike. Osnovne tehnike na kojima se zasniva PD-NOMA su superpozicija signala na predajnoj strani i sukcesivno uklanjanje interferencije (SIC – *Successive Interferation Cacellation*) na prijemnoj strani. Superpozicija signala na predajnoj strani podrazumijeva stvaranje zbirnog (superponiranog) signala u kojem su pojedinačni korisnički signali zastupljeni sa odgovarajućim nivoom snage koji im se dodjeljuje na osnovu karakteristika njihovih kanala. Sukcesivno otklanjanje interferencije, koje se vrši na prijemnoj strani zasniva se na principu po kojem svaki od korisnika prvo detektuje signale korisnika sa višim nivoom snage od svog i sukcesivno ih izdvaja iz superponiranog signala, a zatim detektuje svoj signal, pri čemu signale sa nižim nivoom snage od svog posmatra kao interferenciju. Na ovaj način, u idealnom slučaju, omogućava se korisniku sa najslabijim uslovima na komunikacionom kanalu da detektuje svoj signal bez interferencije. U realnim scenarijima interferencija je u određenoj mjeri uvijek prisutna, jer i same SIC tehnike nisu savršene već funkcionišu sa određenom vjerovatnoćom greške. Ipak, pokazuje se da su SIC tehnike u poređenju sa drugim MUD (*Multi-User Detection*) tehnikama jednostavnije za implementaciju zbog svoje iterativne prirode, pa je to bio osnov za njihovu primjenu u NOMA sistemima, [19].

4.1. Poređenje OMA i NOMA tehnika na primjeru *downlink* komunikacije

Prethodno opisani koncept PD-NOMA tehnika može se prikazati na primjeru *downlink* komunikacije između bazne stanice i 3 korisnika koji se nalaze na različitim lokacijama i imaju različite uslove na svojim komunikacionim kanalima. Ovaj scenario je prikazan na slici 4.1, [20].

U analiziranom okruženju, bazna stanica šalje superponirani signal koji se sastoji od 3 komponente. Svaki od korisničkih signala zastupljen je u superponiranom signalu sa odgovarajućim nivoom snage koji dodjeljuje bazna stanica na osnovu CSI (*Channel State Information*) na komunikacionim kanalima korisnika. Snaga koja se dodjeljuje korisnicima je obrnuto proporcionalna uslovima na komunikacionom kanalu svakog od korisnika. U konkretnom slučaju, pretpostavka je da korisnik 1 ima

najlošije uslove na svom komunikacionom kanalu, korisnik 2 ima nešto bolje, dok korisnik 3 ima najbolje karakteristike komunikacionog kanala. Komunikacija se odvija u okruženju u kojem ne postoji linija direktne vidljivosti između bazne stanice i korisnika, pa su komponente signala izložene raznim uticajima poput: refleksije, difrakcije, rasijanja i sl. *Rayleigh*-ev model kanala se najčešće koristi u okruženjima gdje ne postoji optička vidljivost između predajnika i prijemnika. Ovaj model je pogodan za opis komunikacionih kanala u urbanim područjima, kao što su gradske oblasti sa visokim zgradama.



Slika 4.1. Primjer downlink komunikacije između bazne stanice i 3 korisnika

Neka su x_1, x_2 i x_3 signali korisnika, dok su a_1, a_2 i a_3 koeficijenti alokacije snage korisnika 1, 2 i 3, respektivno, pri čemu je $a_1 > a_2 > a_3$, jer se dodjela koeficijenata snage vrši na osnovu uslova na korisničkom kanalu. Bazna stanica šalje korisnicima superponirani signal:

$$x = \sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2 + \sqrt{a_3}x_3) \quad (4.1)$$

gdje je P emisiona snaga bazne stanice.

Signali koje dobijaju korisnici 1, 2 i 3 mogu se zapisati na sledeći način, respektivno:

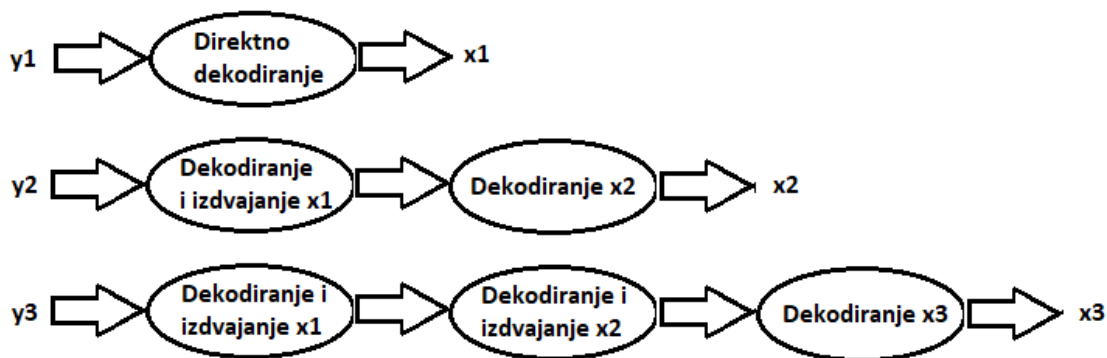
$$y_1 = h_1x + n_1 = h_1\sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2 + \sqrt{a_3}x_3) + n_1 \quad (4.2)$$

$$y_2 = h_2x + n_2 = h_2\sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2 + \sqrt{a_3}x_3) + n_2 \quad (4.3)$$

$$y_3 = h_3x + n_3 = h_3\sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2 + \sqrt{a_3}x_3) + n_3 \quad (4.4)$$

Parametri h_1, h_2 i h_3 predstavljaju koeficijente pojedinačnih komunikacionih kanala, dok parametri n_1, n_2 i n_3 predstavljaju aditivni bijeli *Gauss*-ov šum koji se javlja na

pripadajućim komunikacionim kanalima. Na slici 4.2 je prikazan princip dekodiranja signala na mjestu prijema.



Slika 4.2. Princip dekodiranja signala na mjestu prijema

U konkretnom slučaju, korisnik 1 ima najlošije uslove na komunikacionom kanalu pa mu je neophodno omogućiti direktno dekodiranje signala, bez primjene SIC (*Successive Interference Cancelation*) tehnike. Zato se korisniku 1 dodjeljuje najveći nivo snage u superponiranom signalu, a signali korisnika 2 i korisnika 3 se prilikom dekodiranja signala korisnika 1 posmatraju kao interferencija. Korisnik 2 ima nešto bolje uslove na komunikacionom kanalu i njegov signal je zastupljen sa manjim nivoom snage u superponiranom signalu, u odnosu na korisnika 1, ali sa višim nivoom snage u odnosu na korisnika 3. S obzirom da je signal korisnika 1 dominantan u prijemnom signalu y_2 , korisnik 2 mora jednom primijeniti SIC tehniku kako bi dekodirao svoj signal, pri čemu signal korisnika 3 posmatra kao interferenciju. Na kraju, korisnik 3 za dekodiranje svog signala mora 2 puta da primijeni SIC tehniku. Korisnik 3 ima najbolje uslove na komunikacionom kanalu pa shodno opisanom konceptu raspodjele snage njemu se dodjeljuje najmanji koeficijent alokacije snage, [20]. Generalno, iz opisanog koncepta se uočava važnost optimalne dodjele snage korisnicima za uspješnu primjenu SIC tehnike i pravilno dekodiranje signala. Od dodijeljene snage zavisi koji od korisnika će biti u mogućnosti da direktno dekodira svoj signal, dok kod ostalih korisnika dodijeljena snaga utiče na broj iteracija koji je neophodan prilikom primjene SIC tehnike.

Odnos signal/šum (SNR - *Signal to Noise Ratio*) za korisnika 1 se može prikazati sledećom relacijom:

$$SNR_1 = \frac{|h_1|^2 P a_1}{|h_1|^2 P a_2 + |h_1|^2 P a_3 + n_1^2}. \quad (4.5)$$

Informacioni kapacitet korisnika 1 je:

$$R_1 = \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P a_1}{|h_1|^2 P a_2 + |h_1|^2 P a_3 + n_1^2} \right). \quad (4.6)$$

Da bi korisnici 2 i 3 iz primljenih signala y_2 i y_3 dekodirali svoje signale x_2 i x_3 , potrebno je da primijene tehniku za sukcesivno uklanjanje interferencije. Postupak za dekodiranje signala korisnika 2 koji ima srednje uslove na kanalu je sledeći:

1. Direktnim dekodiranjem signala y_2 dobija se signal x_1 , jer je to signal sa najvišim nivoom snage u superponiranom signalu;
2. Dobijeni signal x_1 se izdvaja iz signala y_2 i dobija se estimirani signal:

$$y_2' = y_2 - \sqrt{a_1} x_1 \quad (4.7)$$

3. Iz signala y_2' se zatim izdvaja signal x_2 , pri čemu se signal korisnika 3 posmatra kao interferencija. Prema tome, SNR korisnika 2 je:

$$SNR_2 = \frac{|h_2|^2 P a_2}{|h_2|^2 P a_3 + n_2^2}, \quad (4.8)$$

dok je njegov informacioni kapacitet:

$$R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 P a_2}{|h_2|^2 P a_3 + n_2^2} \right) \quad (4.9)$$

Korisnik 3 primjenjuje dva puta SIC tehniku: jednom da bi izdvojio signal korisnika 1, a drugi put da bi izdvojio signal korisnika 2. Nakon toga detektuje svoj signal. Prema tome, SNR korisnika 3 je:

$$SNR_3 = \frac{|h_3|^2 P a_3}{n_3^2}, \quad (4.10)$$

a informacioni kapacitet:

$$R_3 = \log_2 \left(1 + \frac{|h_3|^2 P a_3}{n_3^2} \right) \quad (4.11)$$

Iz navedenog SIC postupka se uočava važnost optimalne raspodjele snage među korisnicima jer ona omogućava uspješnu primjenu SIC tehnike, a samim tim i pravilno dekodiranje signala. U suprotnom, stvara se velika interferencija među korisnicima koja narušava performanse SIC procedure. To je naročito važno zbog

toga što je SIC procedura iterativan postupak, pa se greška koja se desi prilikom dekodiranja signala jednog od korisnika prenosi i na signale ostalih korisnika.

Uplink komunikacija se u određenoj mjeri razlikuje u odnosu na *downlink*. U tom slučaju, bazna stanica dobija signale svih korisnika i primjenjuje SIC proceduru za dekodiranje pojedinačnih korisničkih signala. S obzirom da je predajna snaga terminala u velikoj mjeri slična, na korisnički signal dominantan uticaj imaju karakteristike komunikacionih kanala. Prilikom *uplink* komunikacije važno je da na mjestu prijema postoji dovoljna diferencijacija u nivoima korisničkih signala kako bi se moglo izvršiti pravilno dekodiranje signala. Za razliku od *downlink* komunikacije, prilikom dekodiranja signala na *uplink*-u bazna stanica primjenjuje SIC proceduru počevši od signala korisnika sa najvećim nivoom snage.

Ako bi se u prethodno opisanom scenariju umjesto NOMA tehnike primijenile OMA tehnike i pod pretpostavkom da se dostupan opseg dijeli na 3 jednaka podkanala, informacijski kapaciteti prethodno opisanih korisnika 1, 2 i 3 bi bili, respektivno:

$$R_1 = \frac{1}{3} \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P}{n_1^2} \right) \quad (4.12)$$

$$R_2 = \frac{1}{3} \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 P}{n_2^2} \right) \quad (4.13)$$

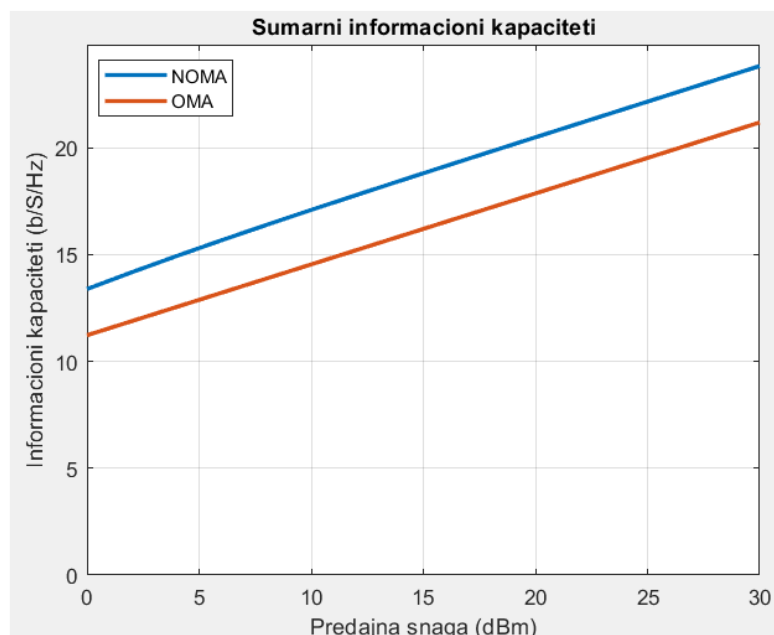
$$R_3 = \frac{1}{3} \log_2 \left(1 + \frac{|h_3|^2 P}{n_3^2} \right) \quad (4.14)$$

Poređenje informacijskih kapaciteta za slučaj primjene OMA i NOMA tehnika dat je na slici 4.3. Uočava se da se veći zbirni informacijski kapacitet u sistemu ostvaruje primjenom NOMA tehnika u odnosu na OMA tehike.

Generalno, kada se porede OMA i NOMA tehnike zaključuje se sledeće:

- Primjenom NOMA tehnika ostvaruje se značajno bolja spektralna efikasnost. Ta razlika je naročito izražena kada se ortogonalni resursi dodijele korisnicima sa lošim uslovima na komunikacionim kanalima. Zbog takvih uslova na kanalu informacijski kapacitet ovih korisnika je mali. Osnovni problem je što su dodijeljeni resursi tada neupotrebljivi za sve ostale korisnike u sistemu jer im oni ne mogu pristupiti sve dok postoji potreba za komunikacijom korisnika kojima su resursi prvenstveno dodijeljeni. Sa druge strane, NOMA

omogućava da svi korisnici istovremeno imaju pristup cjelokupnom spektru čime se postiže mnogo bolja iskorišćenost spektra.



Slika 4.3. Poređenje informacionih kapaciteta u slučaju primjene OMA i NOMA tehnike

- Za razliku od oportunističkog pristupa spektru koji je zastupljen kod OMA tehnika i koji omogućava korisnicima sa boljim uslovima na kanalu prioritet u ostvarivanju komunikacije, NOMA omogućava istovremeni pristup spektru korisnicima sa različitim uslovima na kanalu što dovodi do smanjenja kašnjenja u odnosu na OMA tehnike.
- NOMA tehnike omogućavaju pronalaženje optimalnih parametara tako da se u sistemu ostvari ravnopravnost među korisnicima, tj. odgovarajući QoS za sve korisnike uz postizanje što većih brzina prenosa. Ovo je naročito važno u 5G mrežama koje bi trebalo da omoguće povezivanje biliona različitih uređaja, što sa ortogonalnom raspodjelom resursa ne bi bilo moguće postići.
- Pokazuje se da NOMA tehnike bolje funkcionišu u heterogenoj grupi korisnika, tj. kada se primjenjuju u ćeliji sastavljenoj od korisnika čiji su uslovi na komunikacionim kanalima izrazito različiti, pa se preporučuje uparivanje korisnika sa različitim zahtijevanim QoS (npr. uparivanje korisnika koji obavlja video konferencijski poziv, sa bežičnim senzorom koji prikuplja određeni tip

informacija). Što su sličniji uslovi na komunikacionim kanalima korisnika, to su problemi sa interferencijom među korisnicima dominantniji, [19]-[21].

Važna karakteristika NOMA tehnika je da se one mogu posmatrati kao neki vid nadogradnje postojećih ortogonalnih tehnika, što im značajno olakšava implementaciju.

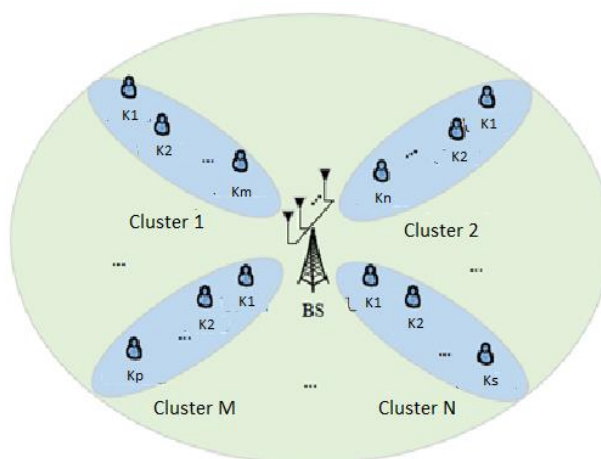
4.2. NOMA tehnike i drugi trendovi u razvoju budućih mobilnih mreža

Imajući u vidu da je primjena NOMA tehnika planirana za buduće mreže, počevši od 5G, od velikog je značaja ispitati kompatibilnost neortogonalnih tehnika i drugih trendova na kojima će se bazirati 5G i buduće mobilne mreže. U nastavku su opisani neki od osnovnih koncepata koji se razmatraju u brojnim naučnim radovima.

4.2.1. MIMO-NOMA

MIMO sistemi imaju široku primjenu u mobilnim radiokomunikacijama. Upotreba većeg broja antena na predajnoj i/ili prijemnoj strani doprinosi povećanju spektralne efikasnosti, smanjenju vjerovatnoće greške i povećanju informacionog kapaciteta u mreži. Zato se kombinacija NOMA tehnika i MIMO sistema nameće kao jedno od osnovnih rješenja na kojima će se bazirati buduće mreže. Za razliku od ranije opisanih slučajeva *downlink* komunikacije, u MIMO-NOMA sistemima komunikacioni kanali su predstavljeni u vidu matrica što značajno usložnjava proces alokacije snage korisnicima. Dva osnovna tipa MIMO-NOMA sistema koji se razmatraju u naučnim radovima su: *cluster* MIMO-NOMA i *beamforming* MIMO-NOMA, [19].

Cluster MIMO-NOMA zasniva se na podjeli korisnika u više *cluster*-a što se može vidjeti na slici 4.4, na kojoj su korisnici grupisani u M *cluster*-a. Svakom od *cluster*-a dodjeljuje se odgovarajući *beamforming* vektor.

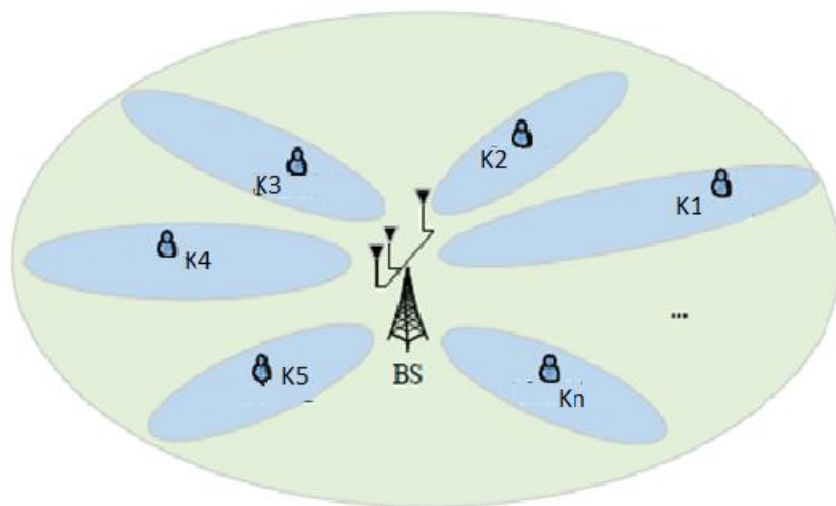


Slika 4.4. Prikaz cluster MIMO-NOMA sistema

Za uspješan dizajn i efikasnost navedenog sistema ključna su dva faktora. Prvi se odnosi na način grupisanja korisnika unutar *cluster*-a, a drugi na dodjelu odgovarajućih *beamforming* koeficijenata svakom od *cluster*-a. U navedenom scenariju korisnici se suočavaju sa dvije vrste interferencije. Jedna je interferencija koja se javlja između *cluster*-a, a druga je interferencija koja se javlja između korisnika unutar jednog *cluster*-a. Uobičajen je scenario u kojem se biraju međusobno ortogonalni *beamforming* koeficijenti kako bi se na taj način eliminisala interferencija između *cluster*-a. U aktuelnim naučnim radovima razmatraju se različiti načini raspodjele snage između *cluster*-a. Ukoliko su *cluster*-i formirani od približno istog broja korisnika, koji međusobno imaju slične uslove na komunikacionom kanalu, onda je jedna od mogućnosti da se snaga bazne stanice ravnomjerno rasporedi između njih. Drugi pristup koji je zastupljen u literaturi podrazumjeva da se u svakom od *cluster*-a odredi „glava *cluster*-a”, tj. korisnik sa najboljim uslovima na kanalu, i da se na osnovu karakteristika na kanalu takvih korisnika napravi raspodjela snage i formiraju *beamforming* vektori. Pokazuje se da ovakav pristup daje dobre rezultate kada su komunikacioni kanali korisnika unutar *cluster*-a korelisani. Treći način, koji bi trebalo da bude primjenljiv u svim situacijama, podrazumijeva da bazna stanica prilikom raspodjele snage između *cluster*-a uzima u obzir ekvivalentni dobitak kanala svih korisnika unutar *cluster*-a. Ovakav pristup je složeniji i zahtijeva poznavanje informacija o stanju kanala svakog od korisnika. Ako se svaki *cluster* posmatra kao nezavisna cjelina onda se na korisnike unutar njega mogu primijeniti NOMA principi.

Postoji nekoliko načina da se izvrši grupisanje korisnika unutar *cluster*-a. U radu [22] razmatraju se dva načina formiranja *cluster*-a. Jedan podrazumijeva formiranje *cluster*-a od korisnika sa međusobno sličnim komunikacionim kanalima, a drugi grupisanje korisnika sa što više različitim uslovima na kanalu. Pokazuje se da se bolje performanse ostvaruju u *cluster*-u koji je sastavljen od korisnika sa različitim uslovima na kanalima, jer u njemu dolazi do efikasnije primjene SIC tehnike. Takođe, jedan od faktora koji ima uticaj na efikasnost MIMO-NOMA sistema u pogledu maksimalnog informacionog kapaciteta je i veličina *cluster*-a. Iako nema generalnog pravila koje određuje dozvoljenu veličinu *cluster*-a smatra se da ukupni informacioni kapacitet u sistemu raste sve dok je broj korisnika takav da je moguće zadržati razlike u nivou snage između korisnika, što dovodi do uspješne primjene SIC procedure. Kada se broj korisnika značajno poveća komunikacioni kanali korisnika postaju korelisani, pa samim tim nije moguće napraviti optimalnu raspodjelu snage međunijima, niti pravilno dekodirati signale na prijemu.

Drugi način implementacije MIMO-NOMA tehnike zasniva se na dodjeli nezavisnog *beam*-a svakom od korisnika kao što je prikazano na slici 4.5.



Slika 4.5. Prikaz beamforming MIMO-NOMA sistema

U ovom slučaju bazna stanica na osnovu fiksne ili dinamičke raspodjele snage, bazirane na CSI koeficijentima, vrši alokaciju snage i određivanje *beamforming* koeficijenata. Korisnici na mjestu prijema primjenjuju standardnu SIC proceduru. Osnovna razlika u odnosu na sistem baziran na *cluster*-ima ogleda se u tome što u ovom slučaju svaki od korisnika dobija svoj *beamforming* koeficijent, dok u slučaju

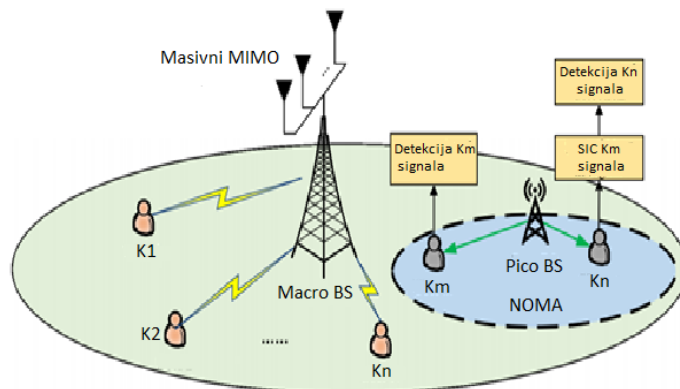
cluster-a više korisnika dijeli isti *beamforming* koeficijent. Pokazuje se da ovakav način realizacije MIMO-NOMA sistema daje optimalne rezultate kada se primjenjuje na manjem broju korisnika. Imajući u vidu broj korisnika koji je zastupljen u masivnim komunikacijama mašinskog tipa *cluster* MIMO-NOMA se smatra rješenjem koje je realnije za implementaciju.

4.2.2. Heterogene mreže i masivni MIMO

Kreiranje gustih heterogenih mreža jedan je od koncepata na kojima će se bazirati buduće mobilne mreže. Osnovna ideja heterogenih mreža je povećanje kapaciteta u sistemu koje se ostvaruje smanjivanjem veličine ćelije. Na taj način bazna stanica se približava korisnicima što dovodi do poboljšanja karakteristika korisničkih komunikacionih kanala. Podjelom mreže na manje ćelije povećava se maksimalni dostupan kapacitet po korisniku jer se resursi bazne stanice dijele na manji broj korisnika. Doprinosi se povećanju spektralne efikasnosti u mreži, ali i povećanju energetske efikasnosti. Zato su mikro, piko i femto ćelije neki od osnovnih tipova ćelija koji će se koristiti u budućim mrežama. Ove ćelije će koegzistirati u mreži u sklopu makro ćelija. Kada se u okviru makro ćelija formiraju mikro ćelije u kojima korisnici dostupnom spektru pristupaju na bazi NOMA tehnika omogućava se mnogo bolja pokrivenost za korisnike na ivici ćelije, kao i veća ravnopravnost među korisnicima. Heterogene mreže predstavljaju kombinaciju različitih tehnologija, arhitektura i mrežnih koncepata, [23].

Neki od problema, prilikom primjene koncepta heterogenih mreža, ogledaju se u kompleksnijem upravljanju mrežom i interferenciji među ćelijama. Jedan od glavnih izazova predstavlja omogućavanje neprimjetnog *handover-a* između heterogenih mreža, ali i rješavanje problema interferencije. Osim toga, neizostavno će doći do uvećanja troškova instalacije, održavanja i povezivanja sa jezgrom mreže usled povećanja broja baznih stanica. Poseban izazov prilikom ovog procesa predstavlja postizanje kompromisa između optimalnog smanjivanja ćelija i benefita koji se tom prilikom ostvaruju, obzirom da to može dovesti do izuzetno niskog nivoa saobraćaja na pojedinačnim baznim stanicama, [24].

Koncept heterogenih mreža najčešće se razmatra u kombinaciji sa masivnim MIMO sistemima. U ovom slučaju prenos signala u makro ćeliji bio bi zasnovan na MIMO principu, dok bi pristup korisnika baznoj stanici u mikro ćeliji bio baziran na NOMA principu. Model ovakvog sistema prikazan je na slici 4.6, [25].



Slika 4.6. Koncept heterogenih mreža u kombinaciji sa masivnim MIMO

Pretpostavlja se da je bazna stanica opremljena antenskim nizovima kod kojih se primjenom ZF *beamforming*-a (ZF-Zero Forcing) vrši istovremeno opsluživanje većeg broja korisnika. Primjenjuje se linearna ZF *beamforming* tehnika, tako da se snaga ravnopravno dijeli između *beam*-ova. Takođe se pretpostavlja da su informacije o stanju na kanalu poznate na strani bazne stanice.

Masivni MIMO sistemi podrazumijevaju instalaciju velikog broja predajnih antena (reda i stotina) na makro baznoj stanici. To je i njihova osnovna razlika u odnosu na MIMO sisteme koji se primjenjuju u 4G mrežama i koji obično podržavaju 2, 4 ili 8 predajnih antena. Masivni MIMO omogućava povećanje spektralne efikasnosti zahvaljujući mogućnostima prostornog multipleksiranja. Prenos signala između bazne stanice i korisnika u makro ćeliji zasnovan je na *beamforming* tehnici. Kreiranje usmjerenih snopova zračenja omogućava efikasnije korišćenje spektra. Ukoliko se ova tehnika primjenjuje na višim frekvencijama (npr. frekvencijama iz milimetarskog opsega) onda *beamforming* omogućava i uspješnije savladavanje prepreka prilikom prenosa signala.

Osim benefita, postoje i brojni izazovi koji prate primjenu masivnih MIMO sistema u makro ćelijama. Osnovni problem je vezan za dobijanje informacija o stanju na kanalu između bazne stanice i korisnika zbog interferencije pilot sekvenci. Kao

posledica velikog broja korisnika, česta je pojava da se pilot sekvence između ćelija međusobno dijele što dovodi do stvaranja interferencije. Drugi problem vezan za masivne MIMO sisteme odnosi se na dizajniranje antenskih predajnih sklopova. Da bi bilo moguće smjestiti veliki broj predajnih antena na maloj površini potrebno je smanjiti veličine antena i nivo snage odgovarajućih pojačavača. U većini slučajeva se predlaže korišćenje antena sa integrisanim pojačavačima. Treći problem tiče se performansi sistema u uslovima visoke mobilnosti korisnika. Pokazuje se da u ovim sistemima u statičnom okruženju signali stotina terminala mogu biti multipleksirani, dok se dobitak prilikom multipleksiranja ograničava na i do deset puta manji broj korisničkih signala u uslovima visoke mobilnosti, [24]-[25].

Kada se u okviru makro ćelija formiraju mikro ćelije, u kojima korisnici dostupnom spektru pristupaju na bazi NOMA tehnika, omogućava se mnogo bolja pokrivenost za korisnike na ivici ćelije, kao i veća ravnopravnost među korisnicima.

Prilikom kreiranja heterogenih mreža ovog tipa treba imati u vidu i energetska efikasnost sistema. Problemi sa energetska efikasnošću naročito se vezuju za makro bazne stanice. Energetska efikasnost baznih stanica opada sa povećanjem broja instaliranih antena na njima. Sa druge strane, povećanjem broja antena povećava se spektralna efikasnost, pa je potrebno pronaći optimalno rješenje između ova dva suprotstavljena zahtjeva. Energetska efikasnost mikro ćelija je manji problem. Zato se nekada u pogledu energetske efikasnosti kao bolje rješenje nameće gusta implementacija većeg broja mikro baznih stanica nego dodavanje novih antenskih nizova na makro baznoj stanici. Takođe se pokazuje da promjena broja antena na makro baznoj stanici nema veliki uticaj na energetska efikasnost mikro baznih stanica.

4.2.3. Kooperativne mreže

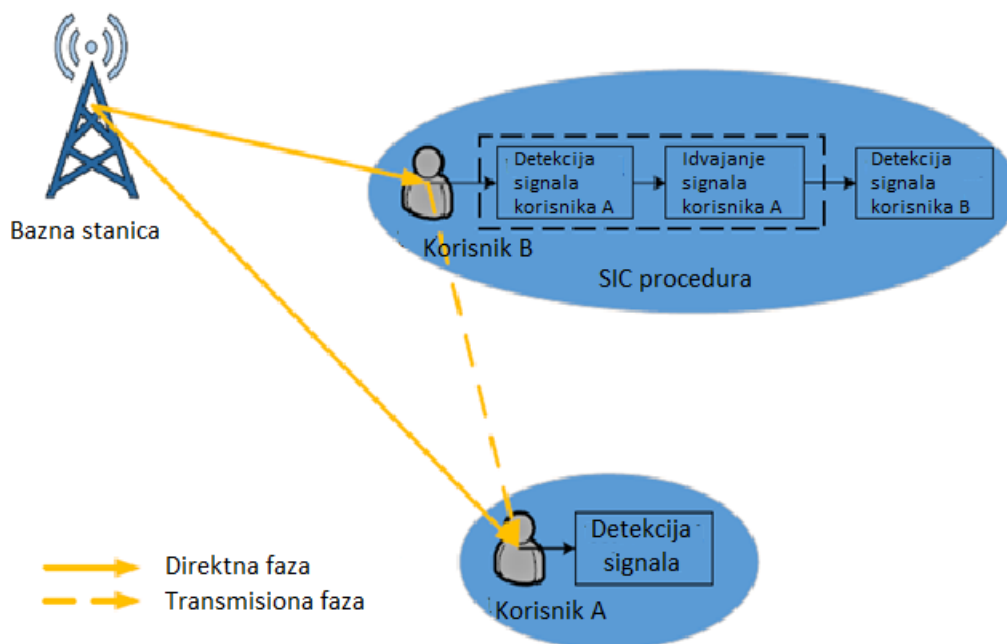
Imajući u vidu karakteristike radio kanala, slabljene signala tokom prenosa je neminovnost koja je uslovljena brojnim faktorima poput topologije terena, broja i vrsta prepreka, udaljenosti od bazne stanice i slično. Jedno od rješenja za prevazilaženje navedenog problema je primjena relejnog prenosa i kooperativnih mreža. Ove tehnike su odavno poznate kao način da se poveća domet signala i

osigura bolji QoS za korisnika na ivici ćelije. Naročitu primjenu ove tehnike imaju u mMTC sistemima gdje se uređaji ponašaju kao relejni čvorovi. Novi pravci istraživanja okrenuti su ka kombinaciji ovih tehnika sa neortogonalnim višestrukim pristupom korisnika spektru, što je princip na kojem će se zasnivati buduće komunikacije.

Primjena kooperativnih NOMA sistema zasniva se na tome da korisnici sa boljim uslovima na komunikacionom kanalu služe kao releji za prenos informacija do korisnika na ivici ćelije, koji imaju slabije karakteristike komunikacionih kanala. Na slici 4.7 dat je prikaz ovog koncepta primijenjen na slučaj *downlink* komunikacije. Cjelokupna komunikacija se može podijeliti u dvije faze: direktna faza i kooperativna faza. Za ostvarivanje navedene komunikacije potrebna su dva vremenska slota. U prvom slotu odvija se direktna faza, dok se u drugom slotu odvija kooperativna faza. U direktnoj fazi komunikacija je zasnovana na klasičnim NOMA principima i odvija se kao i u slučajevima kada ne postoji kooperativna transmisija. Dakle, u prvom slotu bazna stanica šalje korisnicima superponirani signal koji se sastoji od dva korisnička signala zastupljena sa odgovarajućim nivoom snage. Svaki od korisnika dekodira signale, pri čemu korisnik B primjenjuje SIC tehniku, dok korisnik A vrši direktno dekodiranje signala.

U toku navedenog postupka korisnik B, da bi detektovao svoj signal, prvo mora da dekodira i izdvoji signal slabijeg korisnika, tj. korisnika A. Upravo to predstavlja osnov za kooperativni prenos u NOMA sistemima. Kooperativna faza koja se odvija u drugom slotu podrazumijeva da se korisnik B ponaša kao relejno čvorište i da prosljedi korisniku A signal koji je izdvojio u toku SIC procedure. Na ovaj način dobijaju se dodatni benefiti od primjene SIC procedure. Za obradu i prosleđivanje signala od relejnog čvorišta ka destinacionom koriste se razne tehnike. Dvije najčešće primjenjivane tehnike za obradu signala u relejnim čvorištima su: DF (*Decode and Forward*) i AF (*Amplify and Forward*). DF način obrade signala podrazumijeva da se signal dekodira, zatim ponovo kodira i pošalje ka destinacionom čvorištu. Prednost ove tehnike je što se signal može prilagoditi karakteristikama linka preko kojeg će se vršiti prenos, dok je mana dodatna kompleksnost i kašnjenje koji se unose u sistem. Kod AF tehnike relejno čvorište primljeni signal samo pojačava i prosleđuje ka destinaciji, bez dekodiranja i dodatnog

prilagođavanja signala. Prednost primjene AF tehnike je jednostavnija i jeftinija hardverska realizacija, kao i manje kašnjenje. Mana je što se na ovaj način zajedno sa signalom pojačava i šum, [26].



Slika 4.7. Prikaz kooperativnog prenosa

Glavne prednosti primjene kooperativnog prenosa u NOMA sistemima ogledaju se u sledećem:

- Kooperativne mreže se mogu posmatrati kao nadogradnja NOMA tehnika jer se u velikoj mjeri oslanjaju na prenos signala dobijenog u procesu sukcesivnog uklanjanja interferencije. Zato se može smatrati da kooperativnost daje dodatnu vrijednost NOMA tehnici, uz korišćenje postojećih resursa.
- Veća ravnopravnost i bolji QoS među korisnicima, naročito kada se radi o korisnicima na ivici ćelije.
- Smanjenje efekata *multipath* fedinga zahvaljujući prenosu signala po više nezavisnih putanja.
- Kooperativne mreže i relejni prenos omogućavaju redundantnost u sistemu i povećavaju pouzdanost mreže, jer je u slučaju prekida nekog linka komunikaciju moguće obaviti preko drugog.

Prilikom primjene NOMA tehnika treba imati u vidu da se sa povećanjem broja korisnika koji učestvuju u kooperativnom prenosu značajno povećava kompleksnost

sistema. Izazovi se prije svega odnose na dodatne vremenske slotove koji su neophodni za kooperativni prenos, što unosi dodatno kašnjenje u sistem. Ipak, pokazuje se da kooperativni NOMA sistemi stvaraju manje kašnjenje u sistemu u poređenju sa kooperativnim OMA sistemima. Osnovna razlika je u broju potrebnih slotova za direktnu fazu. U NOMA sistemima prenos ka svim korisnicima u direktnoj fazi se odvija u jednom vremenskom slotu, dok broj potrebnih slotova u OMA sistemima zavisi od broja korisnika. Takođe, nije optimalno primjenjivati kooperativni prenos na sve korisnike u sistemu, već je potrebno shodno karakteristikama komunikacionih kanala, QoS-a koji korisnici zahtijevaju i prirodi saobraćaja odabrati odgovarajuće korisnike za kooperativni prenos i zatim kreirati šeme prenosa. Sve ovo uvodi potrebu za dodatnim resursima i planiranjem u sistemu. Kao jedno od rješenja za umanjeње kompleksnosti kooperativnih sistema u naučnim radovima analizira se uparivanje ili grupisanje korisnika. U ovom slučaju kooperativna NOMA primjenjuje se samo unutar unaprijed definisanih grupa. I u ovom slučaju pokazuje se da važi generalno pravilo karakteristično za NOMA sisteme, a to je da se bolje performanse sistema ostvaruju kada se vrši grupisanje korisnika sa što različitim karakteristikama komunikacionih kanala. Takođe, u senzorskim mrežama se razmatra kombinacija kooperativnih sistema i *energy harvesting*-a koji bi omogućio da se pored prenosa podataka vrši i prenos energije ka korisnicima na ivici ćelije, što bi doprinijelo unapređenju energetske efikasnosti sistema, [21], [27].

4.2.4. Kognitivne mreže

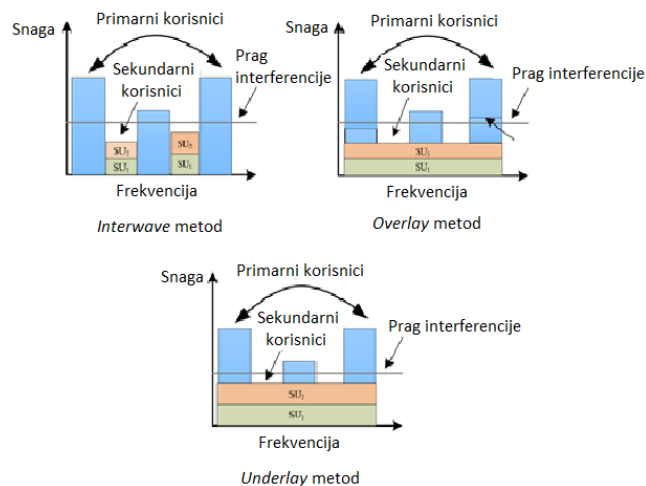
Kako bi se stvorile što efikasnije tehnike za korišćenje dostupnog radio spektra, u mnogim naučnim radovima istražuje se kombinacija neortogonalnog višestrukog pristupa i kognitivnog radija (CR). Kognitivni radio se može definisati kao unaprijeđeni radio sistem koji može da mijenja svoju prirodu u zavisnosti od dostupnog radiofrekvencijskog spektra. Kognitivni radio, zahvaljujući dinamičkom pristupu spektru, omogućava efikasniju komunikaciju i bolju iskorišćenost spektra. Zahvaljujući dinamičkim promjenama svojih parametara, kognitivni radio ima mogućnost istraživanja spektra i pronalaženja neiskorišćenih opsega. Pronađene opsege CR koristi na oportunistički način u cilju poboljšanja ukupne spektralne efikasnosti. Kognitivni radio uvijek vrši interakciju u realnom vremenu sa svojim RF

okruženjem. Ova sposobnost kognitivnog radija zahtijeva neke dodatne funkcije kao što su vremenska i prostorna mjerenja parametara RF okruženja, [28].

Zbog svojih mogućnosti CR može da funkcioniše i u licenciranim i nelicenciranim frekvencijskim opsezima. U licenciranom opsegu prioritet u pristupu kanalu imaju korisnici koji posjeduju licencu za komunikaciju u određenom opsegu, tj. primarni korisnici. Sekundarni korisnici imaju pravo pristupa kanalu sve dok ne stvaraju interferenciju primarnim korisnicima. U naučnim radovima koji se tiču CR-NOMA sistema uglavnom se polazi od pretpostavke da korisnik koji ima lošije uslove na komunikacionom kanalu predstavlja primarnog korisnika, dok korisnici koji imaju dobre uslove na kanalu predstavljaju sekundarne korisnike. Kada primarni korisnik započne komunikaciju sekundarni korisnik mora da detektuje potencijalno neiskorišćeni opseg (oslušivanje spektra), odluči na koji kanal će se premjestiti (spektralno odlučivanje) i na kraju prilagodi svoj primopredajnik tako da se komunikacija nastavi po novom kanalu (spektralni *handoff*). Prethodne tri operacije predstavljaju tipični kognitivni ciklus. Postoji nekoliko metoda koji se razmatraju kada je u pitanju pristup primarnih i sekundarnih korisnika spektru u CR-NOMA mrežama. Tri najčešće razmatrane metode prikazane su na slici 4.8, [29]:

- *Interwave* metod, gdje CR konstantno osluškuje spektar i pronalazi opsege u kojima primarni korisnici ne vrše komunikaciju i tada sekundarni korisnici mogu vršiti prenos. Ovaj pristup je naročito pogodan za UHF/VHF opsege.
- *Overlay* metod, kod koga primarni i sekundarni korisnici istovremeno pristupaju spektru na kooperativan način, tj. sekundarni korisnici se koriste kao releji koji pomažu u komunikaciji primarnom korisnicima i na taj način dobijaju priliku da pristupe spektru. Ovaj metod se može primjenjivati u slučajevima kada sekundarni korisnici imaju dobre uslove na komunikacionom kanalu pa mogu imati funkciju releja.
- *Underlay* metod – primarni i sekundarni korisnici istovremeno pristupaju spektru i vrše komunikaciju sve dok je interferencija koja se stvara na prihvatljivom nivou i ne može da naštetiti primarnim korisnicima. Ovaj metod može da se primijeni u situacijama kada QoS zahtjevi primarnih korisnika nisu izrazito visoki.

Odabir odgovarajućeg metoda zavisi od brojnih faktora kao što su: kompleksnost implementacije CR-NOMA mreža, QoS zahtjevi, mogućnost kooperacije između primarnih i sekundarnih mreža, dozvoljenog praga interferencije kod primarnih korisnika i sl.



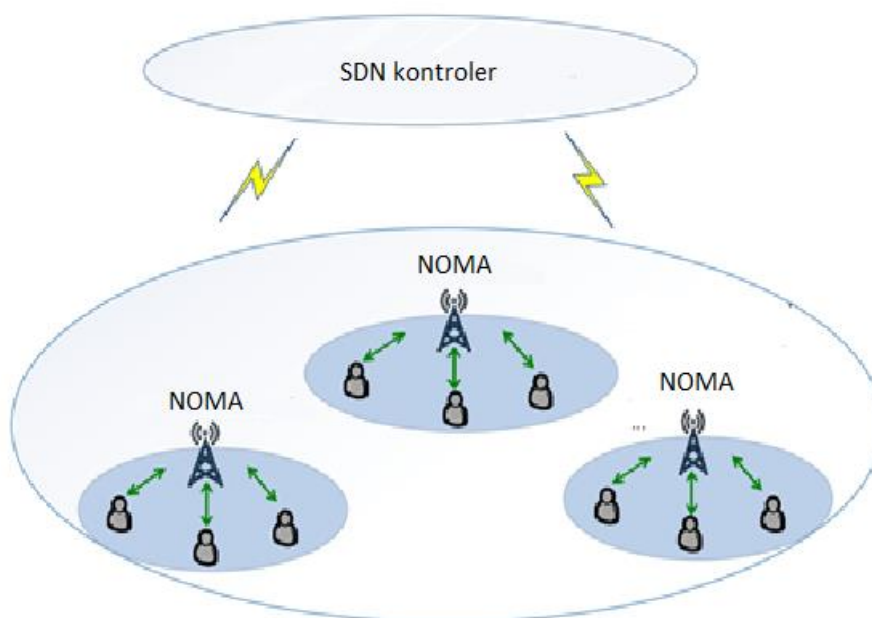
Slika 4.8. CR-NOMA

Jedna od osnovnih karakteristika kognitivnog radija je mogućnost rekonfiguracije. To znači da kognitivni radio u zavisnosti od korisničkih zahtjeva može promijeniti frekvenciju na kojoj funkcioniše, u zavisnosti od uslova na kanalu može mijenjati tip modulacije, a u zavisnosti od prirode aplikacije može promijeniti predajnu snagu. Neki od benefita primjene CR-NOMA mreža su:

- Obezbjediavanje boljeg kvaliteta servisa i veće ravnopravnosti za korisnike sa slabijim uslovima na komunikacionom kanalu, zato što imaju ulogu primarnih korisnika i samim tim prednost u pristupu spektru;
- Veća spektralna efikasnost zahvaljujući kombinaciji karakteristika NOMA tehnika (opsluživanje većeg broja korisnika na istoj frekvenciji i u istom trenutku) i kognitivnih mreža (oslušivanje spektra i pronalaženje neiskorišćenih opsega);
- Manje kašnjenje zbog činjenice da više sekundarnih korisnika može da vrši prenos u istom resursnom bloku;
- Mogućnost većeg broja konekcija zbog efikasnijeg korišćenja spektra.

4.2.5. SDN mreže

Koncept SDN-NOMA (SDN – *Software Defined Network*) mreža prikazan je na slici 4.9. Ideja SDN-NOMA mreža podrazumijeva postojanje SDN kontrolera koji omogućava centralizovano upravljanje mrežom, pri čemu je pristup korisnika dostupnom spektru baziran na neortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa. U ovim mrežama kontrolna ravan i ravan podataka su međusobno razdvojene. Na taj način omogućava se da kontroler ima kompletnu sliku mreže i na osnovu toga donosi odluke koje su u tom momentu najpovoljnije. SDN koncept može značajno da poboljša performanse mreže. Mrežna inteligencija je centralizovana, a mrežna infrastruktura odvojena od nivoa aplikacije što omogućava brže implementiranje novih servisa, manje operative troškove i precizniju kontrolu mreže. SDN omogućava softverski pristup kontrolnoj ravni i upravljanje hardverom kroz standardizovane interfejsse. SDN kontroler ima globalne informacije o cjelokupnoj mreži i ima mogućnost određivanja rasporeda snage korisnicima, eliminacije interferencije unutar *cluster*-a ili između *cluster*-a, raspoređivanja korisnika u *cluster*-e, što su ključni parametri za uspješno funkcionisanje mreža baziranih na NOMA tehnici višestrukog pristupa.



Slika 4.9. Koncept SDN-NOMA mreže

4.3. Primjena NOMA tehnika u masivnim komunikacijama mašinskog tipa

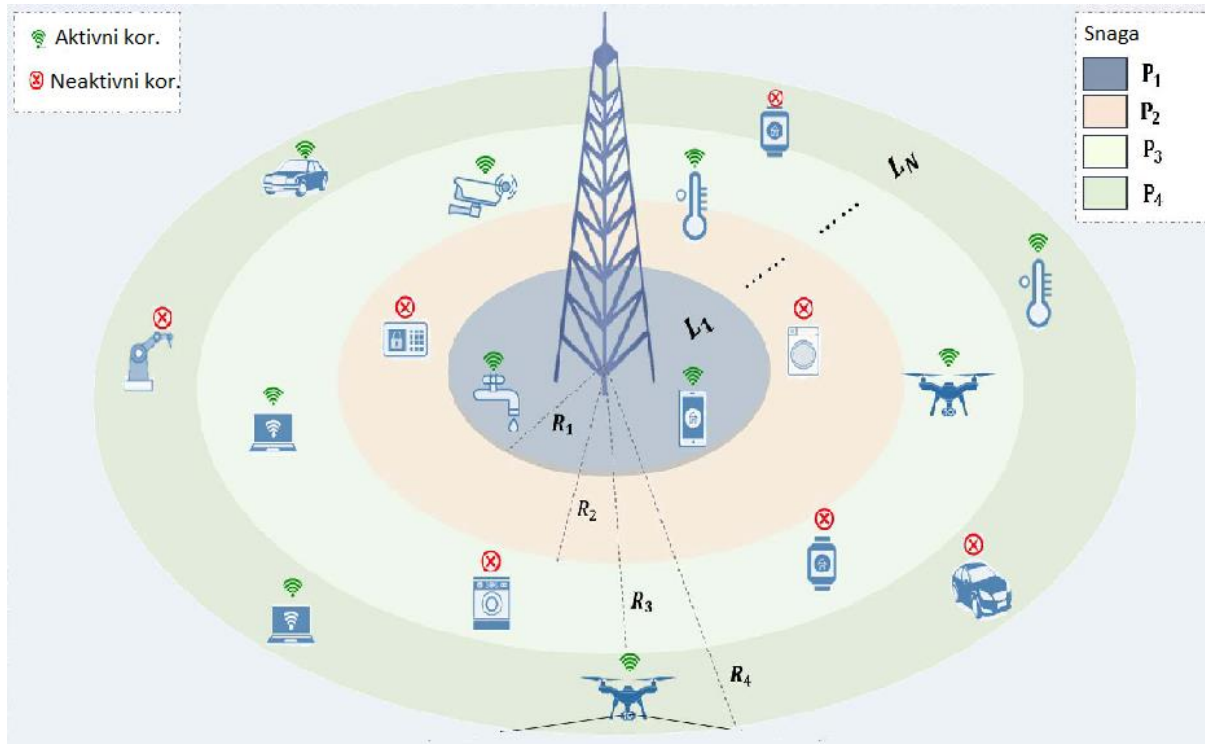
U Poglavlju 3.2. pokazano je da je glavni problem primjene ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa u mMTC komunikacijama vezan za ograničenja u pogledu ortogonalnih resursa, što uslovljava maksimalan broj uređaja koji može komunicirati sa baznom stanicom u datom trenutku. Pokazano je da RA procedura unosi kašnjenje u sistem, kao i da je prenos informacija sadržanih u zaglavlju kritičan parametar za efikasnost mMTC komunikacija jer su često resursi neophodni za prenos zaglavlja veći od resursa potrebnih za prenos podataka. Zato se upotreba neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa razmatra kao rješenje koje bi trebalo da zadovolji specifične potrebe mMTC komunikacija, koje se prije svega odnose na povezivanje velikog broja uređaja i generisanje saobraćaja različitih karakteristika. Ukoliko se višestruki pristup korisnika u mMTC komunikacijama zasniva na neortogonalnom pristupu korisnici ne moraju da prolaze kroz RA proceduru koja se pokazala kao limitirajući faktor kod primjene ortogonalnih tehnika. Umjesto toga, korisnici pristupaju baznoj stanici na slučajan način i vrše prenos podataka. Glavna prednost ovakvog pristupa ogleda se u smanjenju resursa potrebnih za prenos zaglavlja tokom uspostavljanja komunikacije i smanjenju vremena potrebnom za uspostavljanje komunikacije.

Olakšavajuća okolnost prilikom dizajniranja procedura za pristup korisnika spektru baziranih na NOMA tehnikama je to što su u mMTC komunikacijama uređaji u velikoj mjeri fiksni. To znači da se promjene u njihovim kanalima dešavaju dosta sporo pa je moguće dobiti preciznije informacije o stanju kanala. Informacije o stanju kanala dobijaju se tako što uređaji vrše procjenu stanja kanala na bazi pilot sekvenci koje dobijaju od bazne stanice. Pretpostavlja se da su impulsi odzivi *uplink* i *downlink* kanala identični i da su stacionarni u toku jednog transmisionog ciklusa, što je realan scenario ukoliko se radi o fiksnim mMTC uređajima. Ovakav pristup znatno smanjuje kompleksnost bazne stanice zato što bazna stanica ne mora vršiti procjenu stanja kanala za veliki broj mMTC uređaja, [30].

Rješavanje postojećih problema vezanih za RA proceduru i standardizacija neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa za *uplink* komunikacije u mMTC

planirana je u okviru druge faze standardizacije 5G mreža. Prva faza 5G standardizacije je već završena u okviru dokumenata *Release 15 - Release 17* i ona se u najvećoj mjeri fokusira na eMBB (*enhanced Mobile Broadband*) i URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communications*) komunikacije, a u manjoj mjeri na MTC komunikacije. U pomenutim dokumentima neortogonalne tehnike nisu razmatrane kao rješenje za mMTC komunikacije, već je fokus na unapređenju postojećih standarda (NB-IoT, LTE-M i sl.) sa ciljem da se opseg njihove primjene i djelovanje sa MTC komunikacija proširi i na mMTC komunikacije. U navedenim dokumentima neki od osnovnih izazova, poput broja uređaja u mMTC komunikacijama, veličine zaglavlja i sl., i dalje ostaju otvoreni. Rješenje će biti definisano kroz naredne faze 3GPP standardizacije (*Release 18*) čiji je završetak planiran do kraja 2023. godine. Način na koji će neortogonalne tehnike višestrukog pristupa biti implementirane u okviru mMTC komunikacija još uvijek nije u potpunosti poznat. U literaturi se najčešće razmatraju dva pristupa. Jedan je zasnovan na neortogonalnim tehnikama u domenu snage koje su i predmet ovog rada (slika 4.10), a drugi se odnosi na neortogonalne tehnike u domenu koda za koje je takođe dat kratak pregled u ovom radu.

Prvi način primjene PD-NOMA tehnika u mMTC komunikacijama koji je razmatran u naučnim radovima je baziran na *closed-loop* kontroli snage. *Closed-loop* kontrola snage podrazumijeva da bazna stanica na osnovu nivoa snage primljenog signala od strane korisnika, kao i drugih parametara poput SNR-a i BER-a (*Bit Error Rate*), procjenjuje koji je optimalni nivo snage kojim je potrebno da se vrši prenos signala kako bi se ostvarile najbolje moguće performanse na linku. Informacija o potrebnom nivou snage se šalje od strane bazne stanice ka korisniku preko kontrolnog kanala i on na bazi informacija koje dobije prilagođava svoje parametre. Iz prethodno opisanog postupka se vidi da se i u ovom slučaju između bazne stanice i korisnika odvija određena razmjena informacija koja zahtijava postojanje zaglavlja, kontrolnih kanala i sl. Iako je ovakva razmjena informacija jednostavnija u odnosu na standardnu RA proceduru, ipak se smatra da se na ovakav način ne mogu ostvariti puni benefiti primjene neortogonalnih tehnika u mMTC komunikacijama pa se prelazi na drugačiji koncept koji je baziran na *open-loop* kontroli snage.



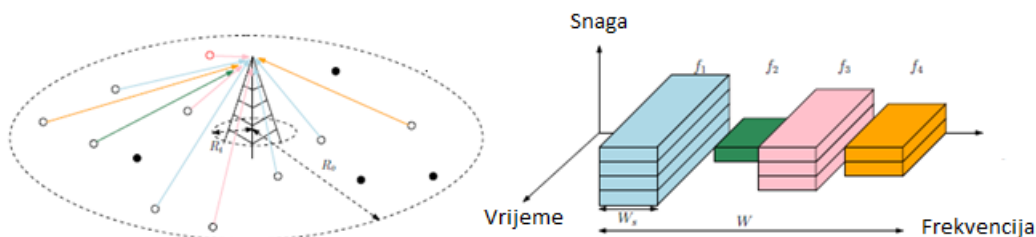
Slika 4.10. PD-NOMA u mMTC komunikacijama

Open-loop kontrola snage je bazirana na minimalnim povratnim informacijama između bazne stanice i korisnika. Jedan od načina da se omogući pravilna raspodjela snage među korisnicima u takvim uslovima je određivanje snage na osnovu lokacije korisnika, tj. oblasti u kojoj se korisnik nalazi. Glavna ideja kod ovog principa je da se definišu različiti nivoi snage za različite lokacije (oblasti) u okviru ćelije koju pokriva bazna stanica. Skup u kome su sadržane sve date informacije bazna stanica prosleđuje korisnicima. Svaki od korisnika kada vrši prenos informacija bira jedan od predefinisanih nivoa snage iz tog skupa. Prilikom definisanja nivoa snage važno je voditi računa da oni budu definisani tako da omogućavaju pravilnu implementaciju SIC procedure.

Drugi pristup koji se odnosi na rješavanje problema sa RA procedurom i koji se analizira u naučnim radovima baziran je na primjeni NOMA tehnike u domenu koda. Iako se ovaj rad dominantno bavi PD-NOMA tehnikom, zbog sveobuhvatnosti pregleda u nastavku je opisana i ova tehnika.

Proces počinje tako što se dostupan frekvencijski opseg dijeli na nekoliko podopsega. U svakom od podopsega bazna stanica periodično šalje pilot signale.

Svaki korisnik na slučajan način bira jedan od podopsega za komunikaciju. Samim tim svaki od podopsega može biti zauzet istovremeno od strane više korisnika kao što je prikazano na slici 4.11. Na bazi pilot signala koji je poslala bazna stanica u tom podopsegu korisnik vrši procjenu stanja kanala.

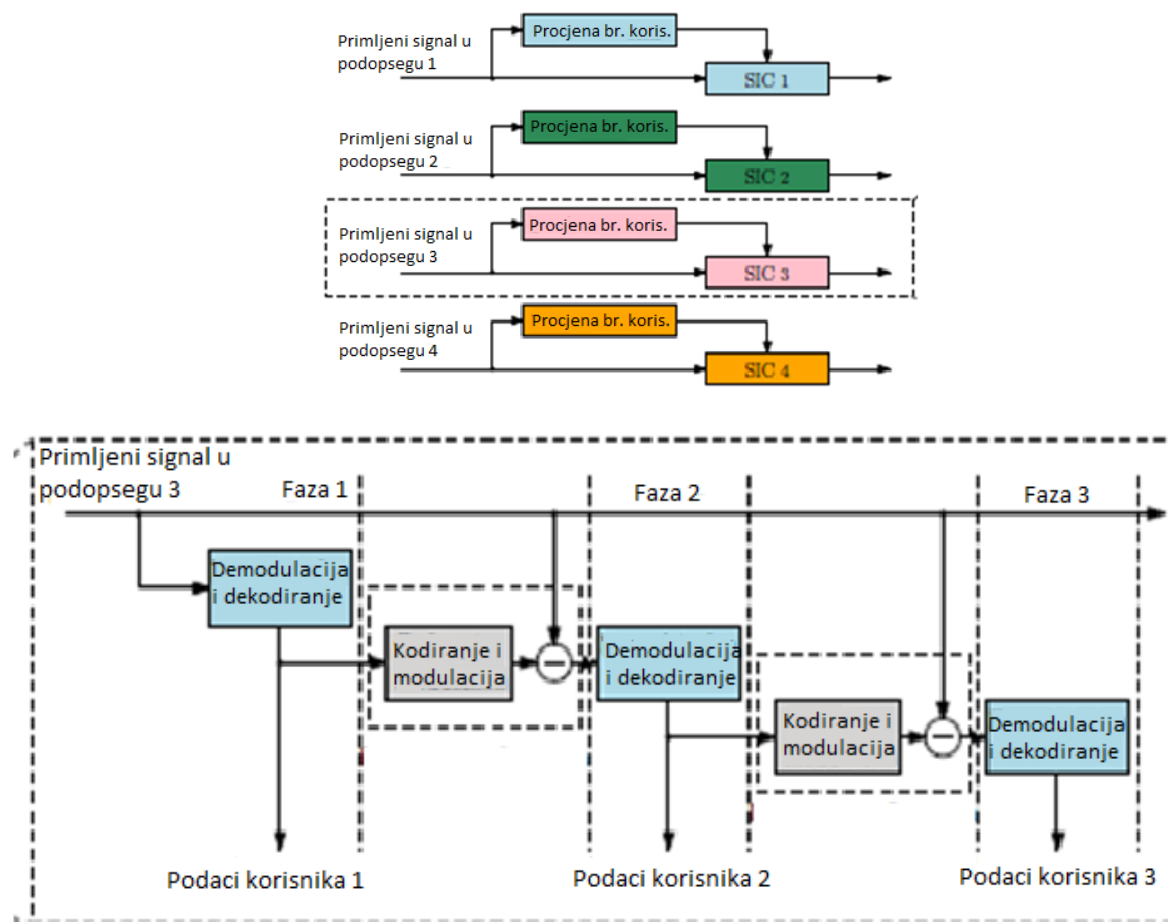


Slika 4.11. Prikaz izbora odgovarajućeg podopsega za prenos

Nakon toga, svaki od korisnika vrši kodiranje ulaznih podataka i vrši prenos ka baznoj stanici pri čemu se informacijski kapacitet korisnika prilagođava u zavisnosti od njihovih potreba. Prilikom kodiranja u kodne riječi se umeću i informacije o samom uređaju sa kojeg se vrši prenos. Bazna stanica dobija superponirane signale koji se sastoje od različitog broja korisničkih signala u svakom od podopsega. Bazna stanica na osnovu ukupne primljene snage procjenjuje broj korisnika u svakom od podopsega. Za dekodiranje signala bazna stanica primjenjuje SIC tehniku. Ovaj proces prikazan je na slici 4.12.

Pretpostavljeno je da bazna stanica šalje pilot signale u svakom od podopsega i da uređaji biraju podopsege na slučajan način. Uređaji mogu za prenos odabrati i kanal sa najboljim karakteristikama i na taj način povećati svoju energetska efikasnost koja je jedan od kritičnih parametara kada se govori o mMTC komunikacijama. Ipak, ovakav način odabira kanala zahtijeva da uređaj estimira kanale u svim podopsezima što može biti primjenjivo samo u situacijama kada se radi o manjem broju kanala. U svakom od podopsega različit broj korisnika može da vrši prenos, što znači da kapacitet kanala ne smije biti fiksni već se mora prilagoditi broju i potrebama korisnika. S obzirom da će dužina kodnih riječi koje se prenose kanalima biti različita u različitim situacijama, pokazuje se da je za kodiranje najpogodnije primjenjivati *Raptor* kodove koji mogu generisati onoliko simbola koliko zahtijeva bazna stanica. *Raptor* kodovi imaju slučajnu strukturu koja se može predstaviti u vidu bipartitivnog grafa koji zavisi od odabrane kodne sekvence. Ukoliko bazna

stanica i mMTC uređaj koriste istu kodnu sekvencu, onda bazna stanica može na prijemnoj strani reprodukovati odgovarajući bipartitivni graf i dekodirati signal. Zato je važna pravilna sinhronizacija između bazne stanice i korisnika. Primjećuje se da se u ovom slučaju kolizija može desiti ako su ispunjena dva uslova. Prvi uslov je da dva uređaja odaberu isti podopseg za prenos, a drugi uslov je da odaberu istu kodnu sekvencu za prenos što za posledicu ima generisanje iste kodne riječi od strane dva uređaja. Ukoliko pretpostavimo da je snaga terminala koji vrše komunikaciju slična, bazna stanica u tom slučaju neće moći pravilno da dekodira i izdvoji poslate signale.



Slika 4.12. Dekodiranje signala na strani bazne stanice

Ipak, jasno je da je vjerovatnoća da se desi kolizija neuporedivo manja u odnosu na slučaj kada se koriste OMA tehnike za višestruki pristup. Jedan od načina da se u potpunosti eliminiše kolizija je da se svakom uređaju dodijeli jedinstvena kodna sekvenca. S obzriom da broj uređaja u mMTC komunikacijama može biti izrazito veliki, ovo rješenje nije praktično jer znatno usložnjava SIC proceduru na strani bazne stanice pa je uobičajeno rješenje da se napravi skup raspoloživih kodnih

sekvenci čija se veličina mijenja u skladu sa brojem uređaja i količinom podataka koju prenose uređaji, [30].

Primjena NOMA tehnika u mMTC komunikacijama donosi brojne prednosti, a to su:

- Veća spektralna efikasnost i veći informacijski kapacitet u sistemu;
- Bolje performanse u slučaju visoke mobilnosti korisnika;
- Kompatibilnost sa OFDMA tehnikama, tako da se mogu implementirati kao nadogradnja postojećih sistema;
- Mogućnost kombinovanja sa MIMO sistemima, kooperativnim mrežama i drugim tehnikama koje se razmatraju za buduće mobilne mreže;
- Smanjenje broja mogućih kolizija i kašnjenja koje nastaje prilikom pristupa korisnika spektru;
- Masivna konektivnost, obzirom da nema ograničenja u broju ortogonalnih resursa;
- Uparivanje korisnika i formiranje *cluster-a*, što omogućava efikasniju komunikaciju u mMTC komunikacijama.

Iako primjena NOMA tehnika u mMTC komunikacijama donosi brojne prednosti, ipak postoje i brojni izazovi koje je potrebno prevazići kada je riječ o praktičnoj implementaciji ovih sistema, a to su prije svega:

- Dobijanje informacije o broju korisnika na strani bazne stanice. Imajući u vidu da korisnici samostalno biraju podopseg za prenos, bazna stanica mora da pronađe mehanizam na osnovu kojeg može da predvidi koliko uređaja vrši prenos u datom podopsegu. Jedan od načina je kontrola snage na strani uređaja, tako da svi uređaji za prenos koriste približno jednaku snagu. Bazna stanica bi tada na osnovu snage superponiranog signala koji dolazi do nje mogla da odredi ukupan broj uređaja koji vrše prenos.
- Dobijanje informacija o stanju kanala i alokacija snage. S obzirom na veliki broj uređaja koji postoji u mMTC sistemima za baznu stanicu bi bilo previše kompleksno da vrši procjenu stanja kanala svih uređaja. Ovaj problem postaje još izraženiji ukoliko na predajnoj i/ili prijemnoj stani postoji veći broj antena. Jedno od rješenja je da svaki korisnik vrši procjenu stanja kanala na bazi pilot sekvenci koje dobija od bazne stanice i da na osnovu toga

prilagođava svoju predajnu snagu tako da primljeni signal na strani bazne stanice bude u okviru predefinisanih vrijednosti. Tako se omogućava da bazna stanica može pravilno da izvrši procjenu broja korisnika u datom podopsegu. Glavna prednost ovakvog pristupa je eliminacija RA procedure koja ograničava broj aktivnih korisnika i dovodi do kašnjenja i zagušenja u mreži. Navedeni pristup daje dobre rezultate ukoliko su direktni i povratni kanal između bazne stanice i korisnika slični.

- Synchronizacija između uređaja. Obzirom da je u mMTC sistemima baziranim na NOMA tehnici jedan od bitnijih problema synchronizacija između uređaja, naročito kada se uzme u obzir broj uređaja i veličina prostora na kojem su raspoređeni. Bazna stanica informaciju o aktivnom korisniku dobija u trenutku kada on odabere podopseg i započne prenos, tako da nije u mogućnosti da synchronizacione parametre uređajima šalje unaprijed. Neki od predloga su da uređaji podatke neophodne za međusobnu synchronizaciju dobijaju na osnovu lokacije ili na osnovu podataka iz predhodnih transmisija. Problem synchronizacije ostaje kao jedna od otvorenih tema za dalje unapređenje i istraživanje.
- Kodiranje. Imajući u vidu da svaki od korisnika na slučajan način bira podopseg za prenos i da u zavisnosti od toga varira i količina podataka koja se prenosi nije moguće vršiti kodiranje podataka kodovima fiksne dužine. Zato se u gotovo svim radovima koji se bave analizom primjene NOMA tehnika u mMTC komunikacijama primjenjuju *Raptor* kodovi koji mogu da generišu neograničen broj bita, sve dok postoji potreba za prenosom. Otežavajuća okolnost za primjenu ovih kodova je što imaju slučajnu strukturu tako da je potrebno da uređaj i bazna stanica pronađu način za razmjenu bipartitivnog grafa kako bi se primljeni signal dekodirao na pravi način.
- Kašnjenje prilikom SIC procedure, kada bazna stanica sprovodi SIC proceduru po unaprijed definisanom kriterijumu, što znači da signali korisnika čekaju svoj red za dalju obradu. Međutim, zahtjevi korisnika mogu biti takvi da ne dozvoljavaju kašnjenje pa se u nekim naučnim radovima razmatraju postupci za paralelno dekodiranje signala na strani bazne stanice. Ovo doprinosi bržem obavljanju SIC procedure ali sa druge strane povećava kompleksnost bazne stanice. S obzirom da su mMTC komunikacije najčešće

tolerantne na kašnjenje u određenoj mjeri, moguće je i ovaj princip primijeniti samo na manji broj korisnika koji zbog očekivanog QoS zahtijevaju prenos bez kašnjenja.

- Opterećenje sistema. Na osnovu procjene broja korisnika u sistemu bazna stanica treba da poveća ili smanji broj kodnih sekvenci koje korisnici biraju prilikom uspostavljanja komunikacije i na taj način kontroliše vjerovatnoću pojave kolizija.

4.4. Standardizacija i budući pravci istraživanja

U prethodnim godinama dešavale su se brojne aktivnosti vezane za standardizaciju NOMA tehnika kojima bi se omogućila njihova implementacija u budućim mrežama. *Downlink* prenos zasnovan na neortogonalnom višestrukome pristupu i unaprijedni dizajn prijemnika se prvi put pominje od strane 3GPP-a u LTE *Release* 13 pod nazivom MUST (*Multi User Superposed Transmission*). U LTE *Release* 14 je predviđeno 15 različitih neortogonalnih tehnika koje se uglavnom tiču *uplink* prenosa i definišu masivnu konektivnost kao i *grant-free* pristup uređaja. Tehnike predviđene u LTE *Release* 14 su: SCMA (*Sparse Code Multiple access*), MUSA (*Multi-User Shared Access*), LCRS (*Low Code Rate Spreading*), FDS (*Frequency Domain Spreading*), NCMA (*Non-Orthogonal Coded Multiple Access*), PD-NOMA, PDMA (*Pattern Division Multiple Access*), RSMA (*Resource Spread Multiple Access*), IGMA (*Interleave-Grid Multiple Access*), LDS-SVE (*Low Density Spreading with Signature Vector Extension*), LSSA (*Low Code Rate and Signature Based Shared Access*), NOCA (*Non-Orthogonal Coded Access*), IDMA (*Interleave Division Multiple Access*), RDMA (*Repetition Division Multiple Access*), GOCA (*Group Orthogonal Coded Access*). U LTE *Release* 15 nastavljen je rad na razvoju i unapređenju performansi neortogonalnih tehnika predviđenih u LTE *Release* 14. Generalno, *Release* 15 pokriva mMTC i eMBB komunikacije i u odnosu na *Release* 14 razmatrana je realističnija primjena neortogonalnih tehnika pa su uzete u obzir greške prilikom dobijanja informacija o kanalu, potencijalne kolizije prilikom pristupa korisnika i sl., [31].

Praktičnu primjenu NOMA tehnika karakterišu i brojni izazovi. Neke od oblasti u kojima su neophodna dodatna istraživanja i unapređenja su navedena u nastavku.

4.4.1. Uparivanje korisnika i kreiranje *cluster-a*

Superpozicija signala i SIC procedure na kojima se zasniva NOMA tehnika uvode jedan novi nivo kompleksnosti u sistem. Kao jedno od rješenja koje bi pojednostavilo implementaciju ovih sistema razmatra se uparivanje korisnika i kreiranje *cluster-a*. Generalno se pokazuje da se bolje performanse u sistemu ostvaruju ukoliko se NOMA tehnike primjenjuju na korisnike sa različitim uslovima na komunikacionim kanalima jer tada do izražaja dolazi razlika u nivou snage između korisnika i može efikasnije da se primijeni SIC procedura. U naučnim radovima analiziraju se brojni algoritmi koje bi na dinamički način omogućili raspoređivanje korisnika u *cluster-e* fiksne ili promjenljive veličine. Sve ovo mora da bude praćeno i tehnikama za optimalnu raspodjelu snage među korisnicima u *cluster-ima* što uvodi dodatni nivo složenosti, [21].

4.4.2 Hibridne tehnike višestrukog pristupa

Smatra se da se buduće tehnike neće zasnivati na jednoj vrsti tehnika višestrukog pristupa (ortogonalnim ili neortogonalnim) već će optimalno rješenje predstavljati kombinacija ovih tehnika. Olakšavajuća okolnost za ovakav pristup je što se NOMA tehnike mogu posmatrati kao dodatak na već postojeće OFDMA sisteme tako da nisu potrebne velike promjene u samoj arhitekturi mreža. Kombinacija OMA i NOMA tehnika naročito je pogodna za MIMO sisteme u kojima bi npr. *beam-ovi* koji se dodjeluju *cluster-ima* bili međusobno ortogonalni dok bi pristup korisnika unutar *cluster-a* bio zasnovan na NOMA principu. Dodatno se pokazuje da OMA tehnike pokazuju jednako dobru ili čak i bolju efikasnost u scenarijima u kojima imamo ograničen broj korisnika sa koreliranim komunikacionim kanalima. Zato se hibridne tehnike višestrukog pristupa smatraju rješenjem koje bi omogućilo sveobuhvatno rješenje u različitim scenarijima i predmet su budućih istraživanja.

4.4.3. Informacije o stanju kanala

U većini radova koji se bave analizom NOMA tehnika se zbog jednostavnosti smatra da na predajnoj strani postoje tačne informacije o stanju na kanalu korisnika. U realnim scenarijama dobijanje informacije o stanju kanala predstavlja veliki izazov, naročito kada se radi o mobilnim korisnicima. Obično se dobijanje CSI zasniva na periodičnim pilot signalima koje šalje bazna stanica, pri čemu je u NOMA sistemima bitno da i na predajnoj strani postoji informacija o stanju kanala. Ukoliko bi se povećao broj pilot signala to bi doprinijelo većoj pouzdanosti u dobijanju CSI, ali bi sa druge strane smanjilo spektralnu efikasnost sistema zbog veličine zaglavlja koja je neophodna u tom slučaju. S obzirom da su CSI veoma važne za pravilnu alokaciju snage u NOMA sistemima, jedna od ključnih stvari je implementacija tehnika koje bi na optimalan način omogućile dobijanje informacija o stanju kanala bez značajnog narušavanja spektralne efikasnosti i bez uvođenja dodatne kompleksnosti u sistem. Takođe, od velike važnosti je ispitati kako funkcionišu realni sistemi u uslovima kada se dobijaju CSI sa određenom greškom.

4.4.4. NOMA bazirana na QoS zahtjevima korisnika

Jedan od zahtjeva koji bi trebalo obezbijediti primjenom NOMA tehnika je podrška za korisnike sa različitim QoS zahtjevima. Zato se određeni naučni radovi baziraju na analiziranju NOMA sistema u kojima bi se razdvajanje korisnika u domenu snage vršilo na osnovu korisničkih QoS zahtjeva. U tom slučaju na klasifikaciju korisnika ne bi dominantan uticaj imale karakteristike komunikacionih kanala. To bi omogućilo dva glavna benefita. Jedan je što bi šeme za alokaciju snage, algoritmi za uparivanje korisnika i SIC tehnika onda bili prilagođeni QoS zahtjevima korisnika, što bi moglo da omogući efikasniju primjenu NOMA tehnika. Drugi benefit se ogleda u činjenici da bi NOMA mogla da se primijeni i u scenarijima u kojima korisnici imaju slične karakteristike komunikacionih kanala, [17].

4.4.5. Greška prilikom SIC procedure

Glavni nedostatak primjene SIC procedure odnosi se na interferenciju koja se stvara između korisnika koja dovodi do problema prilikom dekodiranja i izdvajanja signala.

Osnovni problem je što se greška, koja se desi u dekodiranju signala jednog korisnika i njegovom izdvajanju iz superponiranog signala, dalje prenosi i utiče na signale svih ostalih korisnika. Ukratko, jedna greška prilikom dekodiranja dovodi do akumulacije grešaka. U većini do sada objavljenih naučnih radova polazi se od pretpostavke da na SIC proceduru nema uticaja interferencija i da se kompletan proces odvija u idealnim uslovima. U praksi, navedena pretpostavka ne može biti ispunjena prije svega zbog nedovoljno precizne alokacije snage između korisnika, a zatim i zbog uticaja karakteristika komunikacionog kanala na korisnički signal u toku prenosa. Zbog svega navedenog razmatraju se nove tehnike za unapređenje SIC procedure među kojima su: estimacija kanala u više faza kako bi se dobile preciznije informacije, uzimanje u obzir greške u SIC proceduri prilikom dizajniranja algoritama za dodjelu snage korisnicima. U ovom slučaju bi trebalo dodijeliti dodatnu snagu korisnicima koji kasnije obavljaju SIC proceduru kako bi se kompenzovala greška koja nastaje prilikom SIC procedure. U oba slučaja dodatna unapređenja SIC procedure odvijaju se na račun uvođenja dodatne kompleksnosti i smanjenja kapaciteta sistema.

4.4.6. Energy harvesting

Sa porastom količine podataka koju je potrebno prenositi, poslednjih godina značajno raste i potrošnja energije. U mMTC sistemima naročito je izražen problem energetske efikanosti jer je dostupna energija uređaja najčešće ograničena kapacitetom baterije. Imajući u vidu broj uređaja koji učestvuju u komunikaciji, zamjena baterija predstavlja dugotrajan i skup proces, koji u određenim scenarijima nije ni moguće izvesti. Zato se intezivno radi na pronalaženju alternativnih načina za obezbjeđivanje dovoljne količine energije. Jedno od rješenja koje se razmatra poslednjih godina je *energy harvesting*. *Energy harvesting* komunikacije podrazumijevaju dobijanje energije od različitih obnovljivih izvora iz okruženja, ili se energija za napajanje može prenositi i bežičnim putem od baznih stanica. U tom slučaju govori se o istovremenom prenosu energije i informacija putem RF talasa što je poznato kao SWIPT (*Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*). Za konverziju energije u električnu moguće je koristiti brojne tehnike čija efikasnost zavisi od dostupnosti izvora. Dobijena energija se može trenutno koristiti ili čuvati za buduću upotrebu, što znatno produžava životni vijek mreže. Prenos energije

korišćenjem radio talasa omogućava potpunu mobilnost u celularnim mrežama i rješava problem kratkog trajanja baterije u savremenim uređajima. Ovaj koncept je jedan od polaznih u 5G sistemima jer promovise povezanost 'bilo kada i bilo gdje'. Za omogućavanje bežičnog prenosa energije potrebno je prije svega promijeniti arhitekturu celularnih mreža. Predlažu se brojna rješenja od kojih većina podrazumijeva izgradnju dodatnih stanica koje moraju da obezbijede napajanje energijom korisnicima na ivici ćelije. Poslednjih godina razmatraju se nove kooperativne i kognitivne *energy harvesting* arhitekture koje zahtijevaju primjenu novih tehnika i protokola za upravljanje energijom, rješavanje *near-far* problema i eliminaciju inerferencije. Da bi se ovo ostvarilo neophodno je prevazići neke izazove u realizaciji ovih sistema, poput velikih gubitaka usled propagacije i bezbjedonosnih rizika. Kako bi se obezbijedila sigurnost u MPT (*Microwave Power Transmission*) sistemima brojne tehnike moraju biti adaptirane, među kojima i tehnika za obradu signala koje se koriste prilikom estimacije kanala, tehnike za kontrolu snage kao i adaptivni *beamforming*, [8]. Smatra se da će poslednja rješenja u oblasti bežičnih komunikacija koja uključuju dizajniranje heterogenih mreža, prenos korišćenjem velikih antenskih nizova, kao i komunikaciju milimetarskim talasom smanjiti slabljenje usled propagacije i obezbijediti veću efikasnost pri prenosu. Postojanje takvih tehnologija otvara novu eru *energy harvesting* komunikacija sa brojnim istraživačkim izazovima i mogućnostima. Sa intenzivnim razvojem komunikacija milimetarskim talasom, u bliskoj budućnosti, smatra se da će SWIPT (*Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*) funkcionisati i na frekvenciji od 60 GHz. Ovako visoke frekvencije omogućavaju ultra uzak *beam*, čak i u situacijama kada je veličina antenskog niza mala dovodeći do povećanja efikasnosti prenosa.

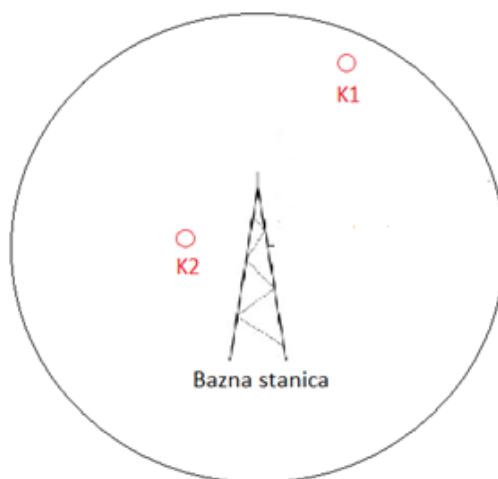
5. POUZDANOST SISTEMA SA NOMA PRISTUPOM

U Poglavlju 4 opisane su brojne karakteristike neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa, njihove prednosti i mane, kao i izazovi u implementaciji. Iz svega navedenog može se uočiti da su performanse sistema baziranog na NOMA tehnici u velikoj mjeri zavisne od dva međusobno povezana faktora: snage koja se dodjeljuje korisnicima u sistemu i karakteristika komunikacionih kanala korisnika.

Navedena dva faktora dominantno određuju uspješnost cjelokupnog procesa, jer od njih zavisi efikasnost same SIC procedure. Cilj ovog Poglavlja je da se kroz simulacije određenih scenarija primjene ispita kako navedeni faktori utiču na vjerovatnoću greške (BER) na strani korisnika, odnosno na pouzdanost, u sistemu baziranom na NOMA tehnici. Simulacije se vrše u Matlab-u, a analizirana su dva scenarija. U prvom scenariju simulirana je *downlink* komunikacija između bazne stanice i dva korisnika, dok je u drugom scenariju simuliran kooperativni prenos. Cilj je ispitati na koji način kooperativni prenos utiče na pouzdanost komunikacije korisnika sa lošijim stanjem na kanalu. Drugim rječima, ispituje se da li se vjerovatnoća greške korisnika sa lošijim stanjem na kanalu može smanjiti ukoliko se korisniku sa boljim stanjem na kanalu dodijeli uloga releja. Tada korisnik koji ima ulogu releja treba da signal korisnika sa lošijim stanjem na kanalu izdvoji prilikom SIC procedure i proslijedi do korisnika kome je namjenjen. Na taj način će se omogućiti korisniku sa lošijim stanjem na kanalu da dobije dvije kopije istog signala i odabere pogodniju. Detaljnije postavke parametara i dobijeni rezultati simulacije su opisani u nastavku rada.

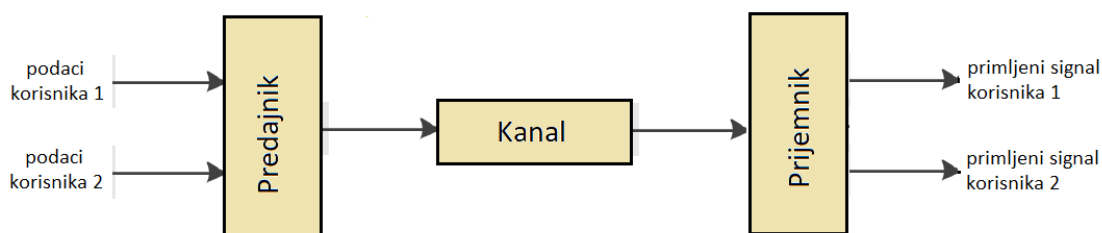
5.1. *Downlink* komunikacija

U prvom scenariju razmatrana je *downlink* komunikacija između bazne stanice i dva korisnika. Korisnik 1 i korisnik 2 nalaze se na različitim lokacijama u okviru ćelije, a samim tim imaju i različite uslove na komunikacionim kanalima. Korisnik 2 (K2) ima bolje uslove na komunikacionom kanalu, a korisnik 1 (K1) je korisnik na ivici ćelije koji ima lošije uslove na komunikacionom kanalu, kao što je prikazano na slici 5.1. Pretpostavljeno je da se radi o izlovanoj ćeliji, tako da na korisnike linka nema uticaja interferencija iz susjednih ćelija.



Slika 5.1. Model sistema

Struktura *downlink*-a, koji je predmet simulacije, sastoji se od 3 glavne komponente: predajnika, komunikacionog kanala i prijemnika, kao što je prikazano na slici 5.2.



Slika 5.2. Prikaz downlink prenosa

U nastavku su detaljnije opisani parametri i karakteristike svake od komponenti sistema.

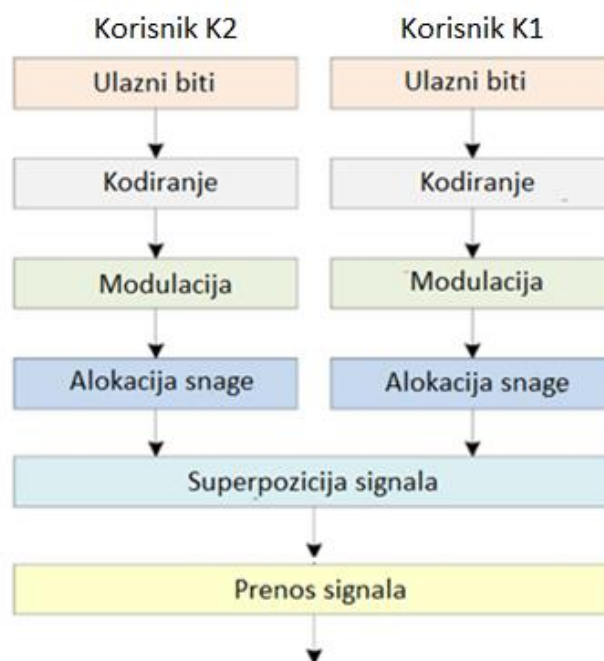
5.1.1. Predajnik

U konkretnom primjeru posmatra se komunikacija između bazne stanice i korisnika K1 i K2. Podaci korisnika K1 i K2 označeni su kao x_1 i x_2 , respektivno, pri čemu je ukupan broj bita koji se prenosi u sistemu definisan kao $N = 10^7$. Prije prenosa vrši se kodiranje i mapiranje podataka. Odabrana je QPSK modulacija. Na predajnoj strani odvija se jedan od ključnih procesa koji karakteriše NOMA sisteme, a to je superpozicija signala. Preduslov za pravilnu superpoziciju signala je dodjela odgovarajućeg nivoa snage korisnicima, tj. pravilna alokacija snage. Ukoliko se

proces alokacije snage na predajnoj strani izvrši na odgovarajući način, na prijemnoj strani je moguće izvršiti pravilno sukcesivno uklanjanje interferencije, što dovodi do pravilnog dekodiranja signala. Zbog jednostavnosti je u konkretnom slučaju pretpostavljeno da su informacije o stanju kanala poznate baznoj stanici i da dominantan uticaj na dodjelu koeficijenata u procesu alokacije snage korisnicima ima lokacija korisnika. Tako se korisnicima K1 i K2 dodjeljuju koeficijenti alokacije snage a_1 i a_2 koji definišu dio ukupne snage bazne stanice P koja im je dodijeljena. Prilikom dodjele snage korisnicima primjenjuje se pravilo da se korisniku sa lošijim uslovima na kanalu dodijeli viši nivo snage, dok se korisniku sa boljim uslovima na kanalu dodjeljuje niži nivo snage. Signal koji šalje bazna stanica ka korisnicima nakon superpozicije može se predstaviti na sledeći način:

$$x = x_1 + x_2 = \sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2) \quad (5.1)$$

Na slici 5.3 prikazan je proces koji se obavlja na strani predajnika.



Slika 5.3. Proces koji se obavlja na strani predajnika

5.1.2. Komunikacioni kanal

Uslovi na razmatranom kanalu zavise od različitih faktora, kao što su udaljenost od bazne stanice, topologija terena, broj i vrste prepreka, mobilnost korisnika. U konkretnom slučaju pretpostavka je da se komunikacija odvija u urbanom okruženju u kojem ne postoji linija direktne vidljivosti pa je signal izložen uticaju *Rayleigh*-evog

fedinga. *Path loss exponent* postavljen je na 4 kako bi se simulirala komunikacija u urbanom području. Osim uticaja *Rayleigh*-evog fedinga, simulacija uzima u obzir i uticaj koji ima bijeli *Gauss*-ov šum (AWGN) na prenos signala.

5.1.3. Prijemnik

Za prijemnu stranu u sistemima baziranim na NOMA tehnici karakterističan je proces sukcesivnog uklanjanja interferencije. U konkretnom slučaju, sukcesivno uklanjanje interferencije odvija se na strani korisnika K2 koji ima bolje uslove na komunikacionom kanalu. Korisnik K1 koji ima lošije uslove na kanalu direktno dekodira svoj signal zahvaljujući činjenici da njegov signal predstavlja dominantnu komponentu u primljenom signalu. Efikasnost procesa sukcesivne interferencije u najvećoj mjeri zavisi od načina na koji je izvršena raspodjela snage na predajnoj strani. U ovom radu, kao i u većini do sada objavljenih radova, simuliran je scenario u kojem ne dolazi do greške prilikom SIC procedure. U realnim sistemima proces sukcesivnog uklanjanja interferencije ne odvija se u idealnim uslovima već na njega utiču brojni faktori, od kojih je najznačajniji interferencija među korisnicima. Generalno, primljeni signali korisnika K1 i K2 mogu se predstaviti na sledeći način:

$$y_1 = h_1x + n_1 = h_1\sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2) + n_1 \quad (5.2)$$

$$y_2 = h_2x + n_2 = h_2\sqrt{P}(\sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2) + n_2 \quad (5.3)$$

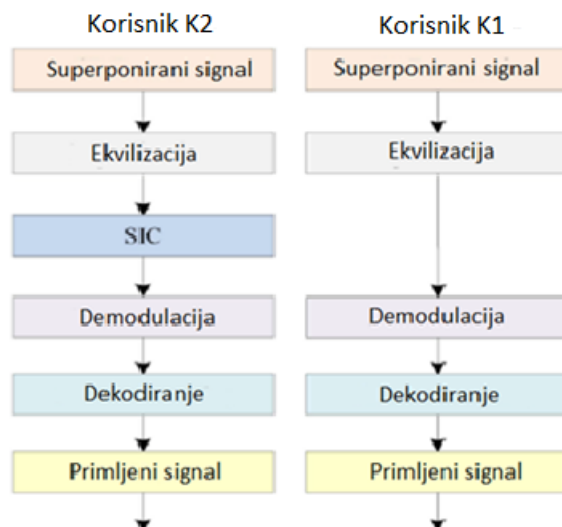
SNR korisnika K1 i K2 definisan je sledećim relacijama:

$$SNR_1 = \frac{|h_1|^2 P a_1}{n_1^2} \quad (5.4)$$

$$SNR_2 = \frac{|h_2|^2 P a_2}{|h_2|^2 P a_1 + n_2^2} \quad (5.5)$$

Na slici 5.4 prikazan je proces koji se odvija na prijemnoj strani kod korisnika K1 i K2.

Nakon prijema vrši se poređenje primljenih signala sa poslatim signalom kako bi se odredila vjerovatnoća greške po bitu. U tabeli 5.1 prikazani su parametri koji su korišćeni prilikom simulacije.



Slika 5.4. Proces koji se obavlja na prijemnoj strani korisnika K1 i K2

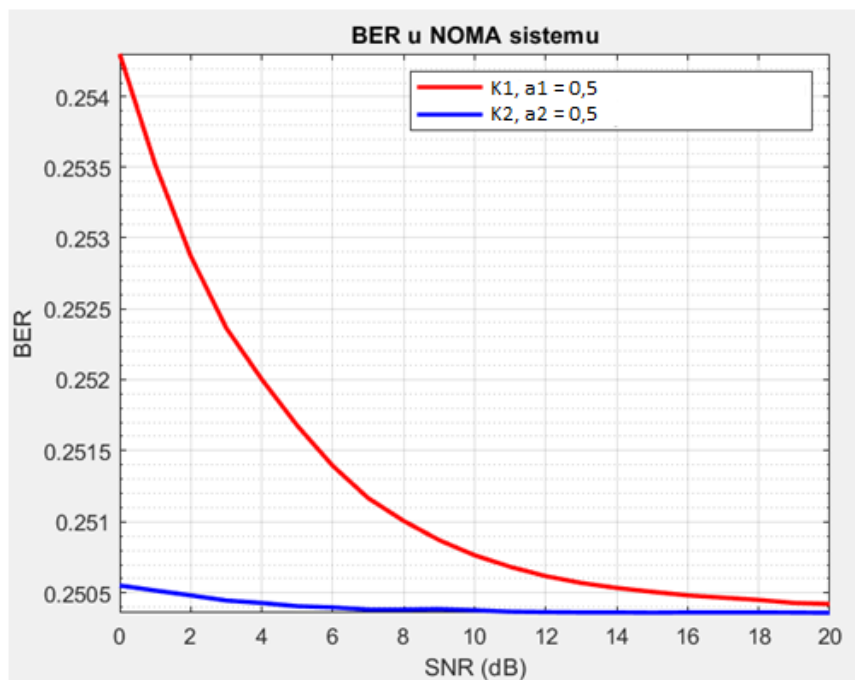
Tabela 5.1. Simulacioni parametri

Broj bita koji je prenosi	10^7
Širina kanala	1MHz
Predajna snaga	0–20dBm
Šum	AWGN
Okruženje	Urbano, NLOS
Feding	<i>Rayleigh-ev</i>
Alokacija snage	Fiksna
Tip modulacije	QPSK

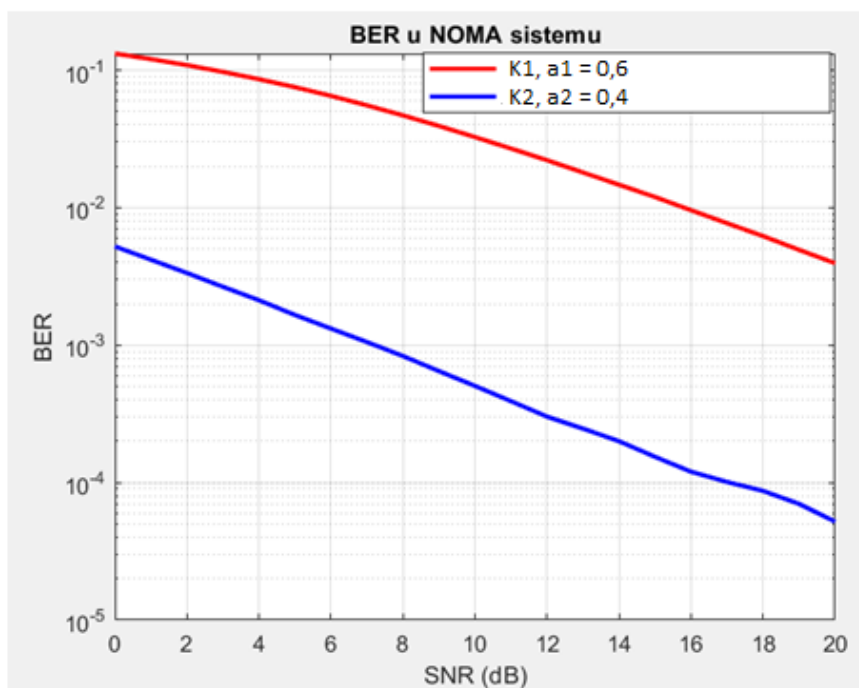
Lokacije korisnika K1 i K2 su odabrane tako da korisnik K1 ima lošije uslove na komunikacionom kanalu, a korisnik K2 je korisnik sa boljim uslovima na komunikacionom kanalu.

U realnim scenarijima na vrijednost koeficijenta alokacije snage uticaj imaju brojni faktori, prvenstveno vezani za lokaciju, uslove na komunikacionom kanalu korisnika i sl. U ovom slučaju, zbog jednostavnosti, pretpostavljeno je da je vrijednost ovog koeficijenta fiksna. Cilj je prikazati kako promjena koeficijenta alokacije snage utiče na vjerovatnoću greške na prijemu.

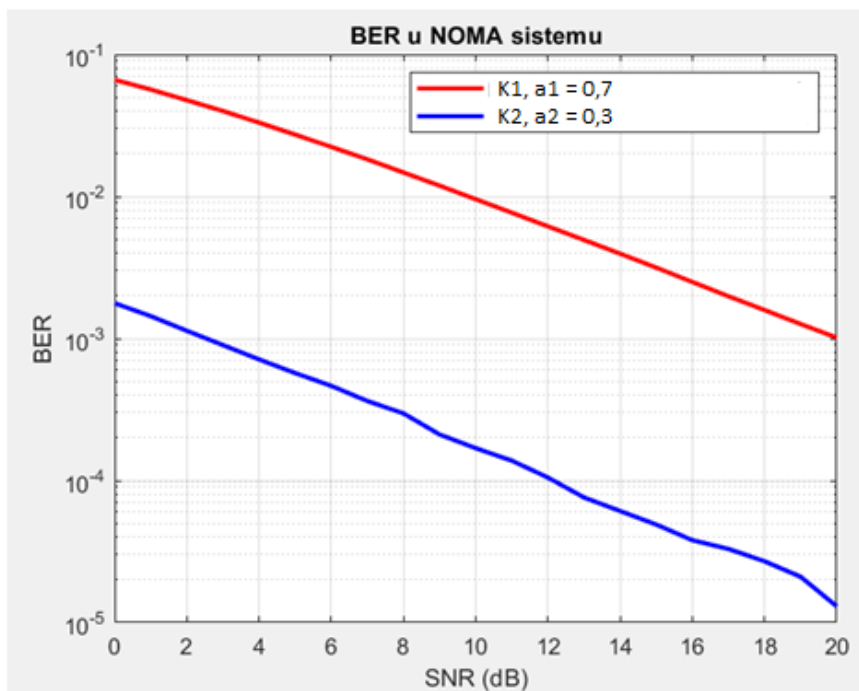
Na narednim graficima prikazane su različite vrijednosti vjerovatnoće greške po bitu za prethodno navedene parametre.



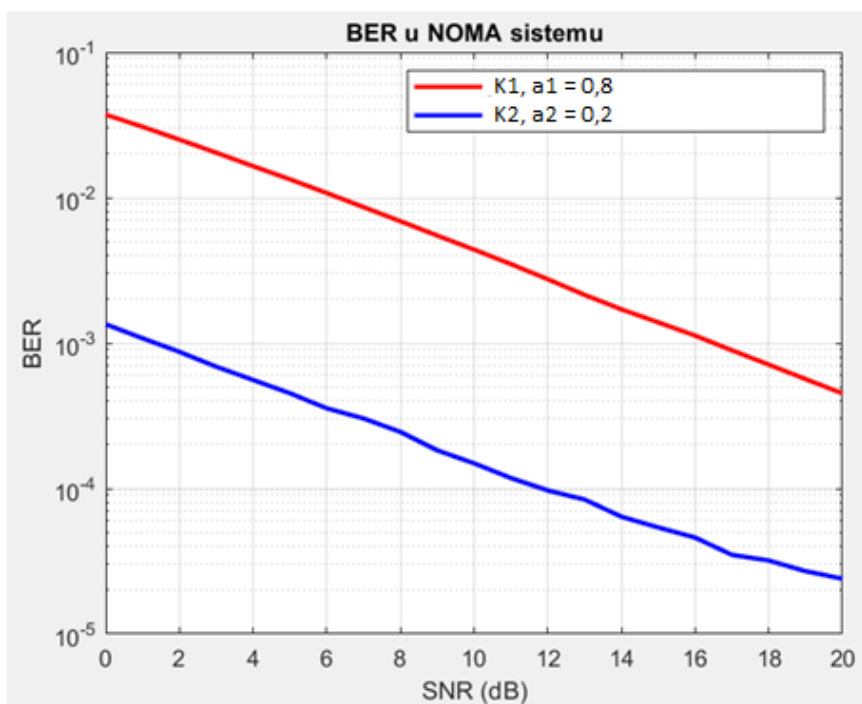
Slika 5.5. Vjerovatnoća greške po bitu na prijemu za $a_1 = 0,5$ i $a_2 = 0,5$



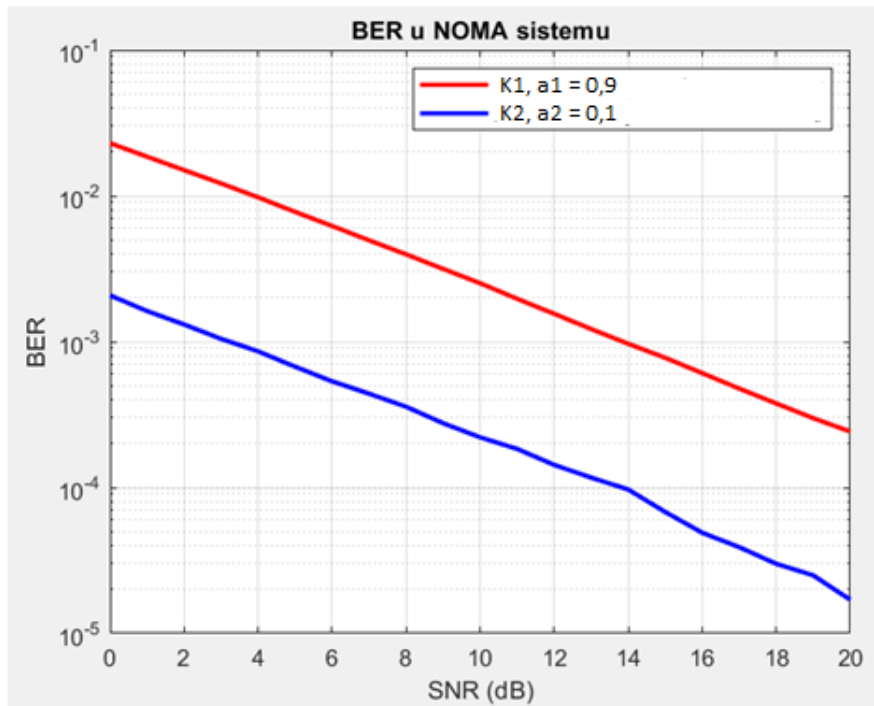
Slika 5.6. Vjerovatnoća greške po bitu na prijemu za $a_1 = 0,6$ i $a_2 = 0,4$



Slika 5.7. Vjerovatnoća greške po bitu na prijemu za $a_1 = 0,7$ i $a_2 = 0,3$



Slika 5.8. Vjerovatnoća greške po bitu na prijemu za $a_1 = 0,8$ i $a_2 = 0,2$



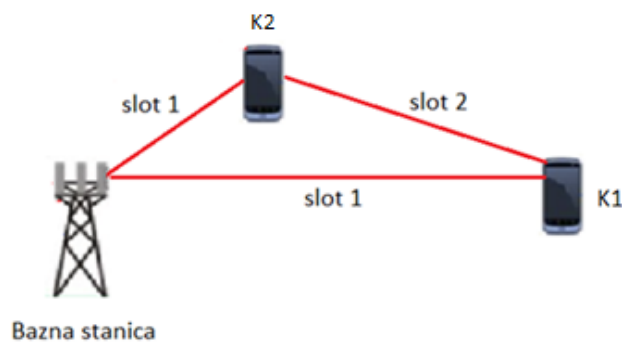
Slika 5.9. Vjerovatnoća greške po bitu na prijemu za $a_1 = 0,9$ i $a_2 = 0,1$

Sa prikazanih grafika se uočava da je kritičan parametar BER korisnika K1 koji ima lošije uslove na svom komunikacionom kanalu. Zato je odabir koeficijenata alokacije snage potrebno vršiti tako da se ovom korisniku dodijeli viši nivo snage što mu omogućava da direktno dekodira svoj signal i tako zadrži svoj nivo vjerovatnoće greške, odnosno pouzdanosti, u okviru prihvatljivih granica, čak i u situacijama kada se nalazi na ivici ćelije. Korisnik K2 ima bolje uslove na svom komunikacionom kanalu i zato dobija manji nivo snage. Nivo snage koji mu se dodjeljuje omogućava ovom korisniku da primijeni SIC proceduru i tako dekodira svoj signal, pri čemu se signal korisnika K1 posmatra kao interferencija. Sa grafika se takođe uočava da se u situaciji kada se korisnicima dodijeli jednak nivo snage, pouzdanost komunikacije oba korisnika se značajno narušava. Svi ovi primjeri pokazuju koliko je optimalna alokacija snage važna u NOMA sistemima. Optimalna alokacija podrazumijeva raspodjelu snage koja omogućava svim korisnicima u sistemu da ostvare najbolje performanse kako u pogledu pouzdanosti, tako i u pogledu brzine prenosa, kašnjenja, QoS-a i sl.

Kao jedan od mogućih načina za unapređenje opisanog sistema u nastavku rada predložen je koncept kooperativnog prenosa u kojem bi korisnik koji ima bolje uslove na komunikacionom kanalu služio kao relej za prenos informacija do korisnika sa lošijim uslovima na kanalu.

5.2. Kooperativni prenos

U ovom dijelu rada posmatra se kooperativni prenos između prethodno opisane bazne stanice i dva korisnika. Cilj je simulacija kooperativnog sistema u kojem se korisnik sa boljim uslovima na komunikacionom kanalu (K2) ponaša kao relej za prenos informacija do korisnika sa lošijim uslovima na kanalu (K1). Model opisanog sistema prikazan je na slici 5.10. Ideja kooperativnog prenosa u konkretnom slučaju je da se signal koji korisnik K2 izdvoji prilikom SIC procedure proslijedi ka korisniku K1. Na taj način će korisnik K1, osim signala koji dobija od strane bazne stanice, dobiti kopiju svog signala i od strane korisnika K2. Ideja je ispitati da li kooperativni prenos dovodi do smanjenja vjerovatnoće greške na strani korisnika sa lošijim stanjem na kanalu i u kojoj mjeri?



Slika 5.10. Model sistema za kooperativni prenos

Kooperativni prenos odvija se u dvije faze, pa su za njegovu implementaciju neophodna dva vremenska slota. U prvom slotu odvija se direktna komunikacija između bazne stanice i korisnika K1 i K2, kojima bazna stanica šalje superponirani signal. Dakle, prenos u prvom slotu je identičan *downlink* komunikaciji koja je opisana u prethodno analiziranom scenariju. SNR korisnika K1 nakon direktne faze može se prikazati relacijom:

$$SNR_{1d} = \frac{|h_1|^2 P a_1}{|h_1|^2 P a_2 + n_1^2} \quad (5.6)$$

U drugom slotu odvija se kooperativna faza u kojoj korisnik K2 korisniku K1 prosleđuje signal koji je izdvojen SIC procedurom. SNR korisnika nakon kooperativne faze može se predstaviti na sledeći način:

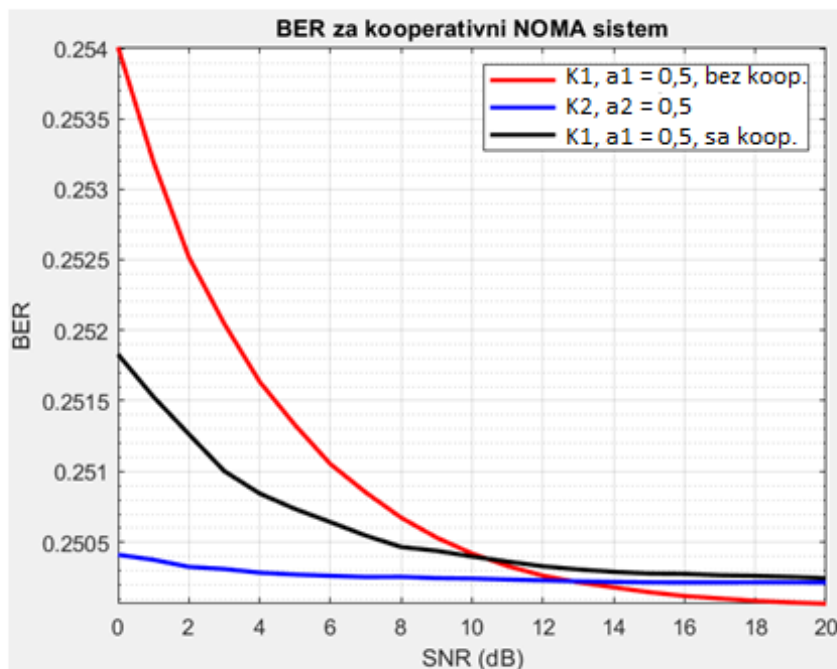
$$SNR_{1k} = \frac{|h_{21}|^2 P}{n_{21}^2} \quad (5.7)$$

Na kraju kooperativne faze korisnik K1 nakon dobijanja dvije kopije signala može izabrati po unaprijed definisanim kriterijumima onaj koji mu je pogodniji. U konkretnom slučaju je cilj smanjenje vjerovatnoće greške za korisnika sa lošijim uslovima na komunikacionom kanalu, pa se kao kriterijum za odabir odgovarajućeg signala uzima manji BER.

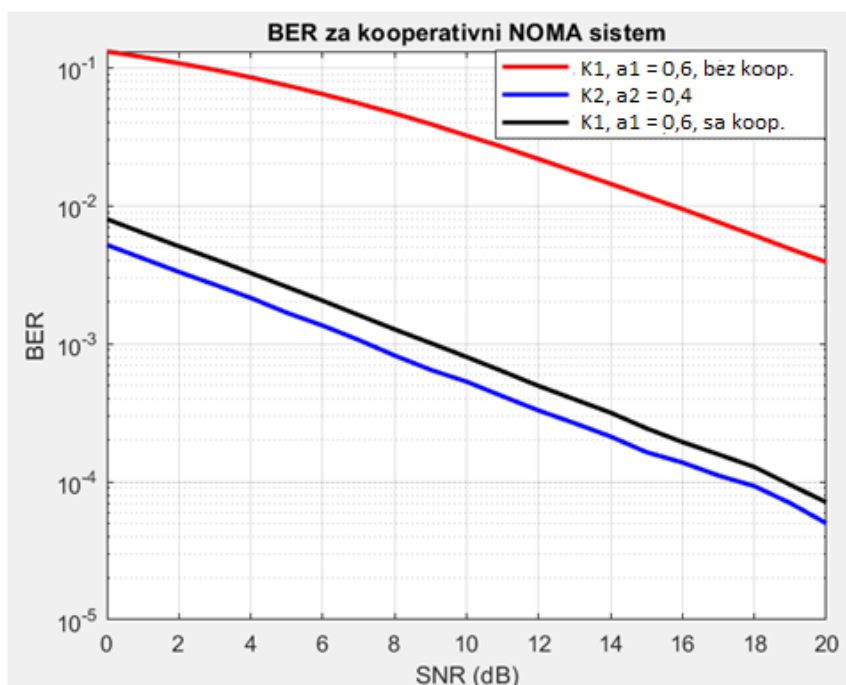
Prilikom simulacije kooperativnog prenosa svi parametri iz prethodnog scenarija i dalje važe. Pretpostavka je da je kanal između korisnika K2 koji ima ulogu relejnog čvorišta i destinacionog čvorišta K1 izložen uticaju *Rayleigh*-evog fedinga i AWGN šuma. Relejno čvorište prosleđuje izdvojeni signal prilikom SIC procedure ka destinacionom čvorištu K1 prilikom čega se koristi isti tip modulacije kao i u ostatku sistema.

Prilikom analize kooperativnog sistema raspodjela snage među korisnicima vrši se na isti način kao i u slučaju *downlink* komunikacije.

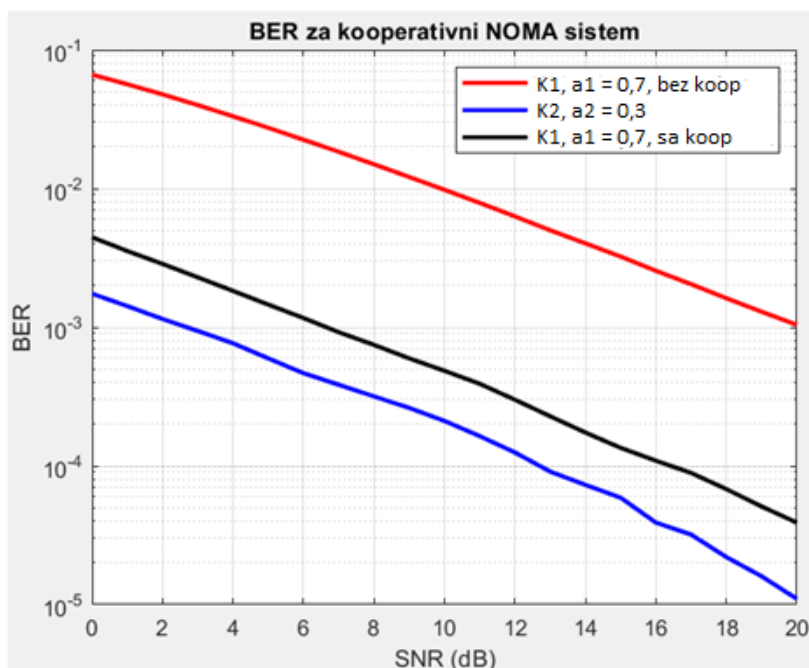
U nastavku rada su prikazani grafici koji pokazuju na koji način kooperativni prenos utiče na poboljšanje pouzdanosti komunikacije korisnika sa lošijim stanjem na kanalu. Simulirani su scenariji u kojima se korisnici nalaze na različitim lokacijama u oblasti pokrivanja bazne stanice. U zavisnosti od uslova na njihovim komunikacionim kanalima na datoj lokaciji vrši se fiksna alokacija snage.



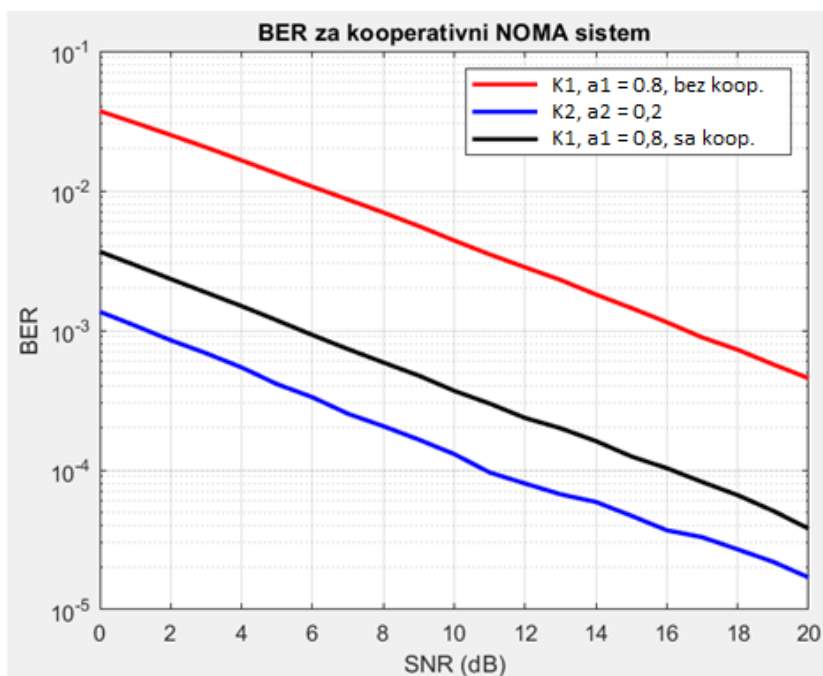
Slika 5.11. Vjerovatnoća greške po bitu na prijemu za kooperativni sistem kada je $a_1 = 0,5$ i $a_2 = 0,5$



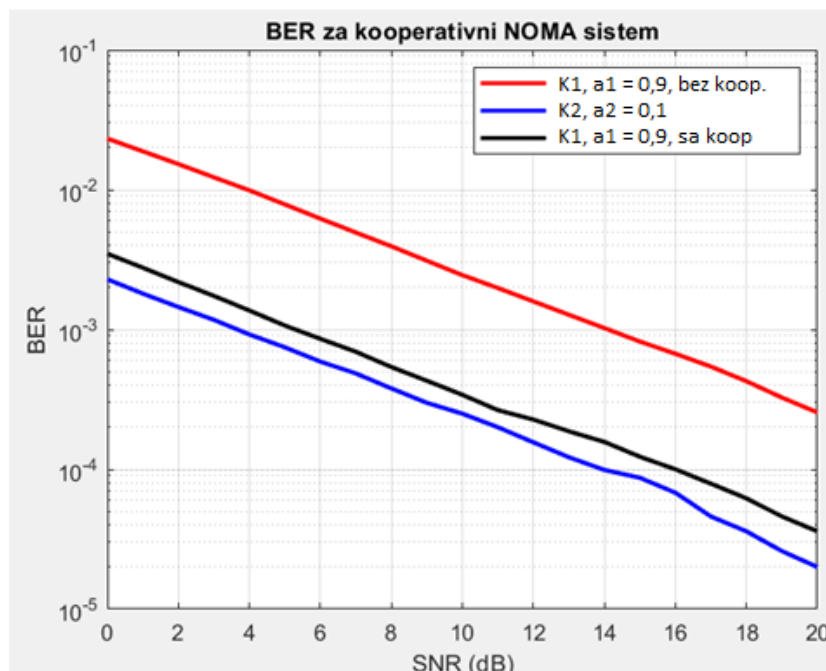
Slika 5.12. Vjerovatnoća greške po bitu na prijemu za kooperativni sistem kada je $a_1 = 0,6$ i $a_2 = 0,4$



Slika 5.13. Vjerovatnoća greške po bitu na prijemu za kooperativni sistem kada je $a_1 = 0,7$ i $a_2 = 0,3$



Slika 5.14. Vjerovatnoća greške po bitu na prijemu za kooperativni sistem kada je $a_1 = 0,8$ i $a_2 = 0,2$



Slika 5.15. Vjerovatnoća greške po bitu na prijemu za kooperativni sistem kada je $a_1 = 0,9$ i $a_2 = 0,1$

Generalni zaključak nakon izvršenih simulacija je da se primjenom kooperativnog prenosa, u kojem se korisniku sa boljim stanjem na kanalu dodjeljuje uloga releja, može poboljšati pouzdanost komunikacije korisnika sa lošijim stanjem na kanalu. Takođe, pokazuje se da je u sistemima beziranim na NOMA tehnici, optimalna raspodjela snage ključna za ostvarivanje boljih performansi sistema. Pravilnom raspodjelom snage moguće je u velikoj mjeri popraviti generalne karakteristike prenosa vezane za korisnika sa lošijim stanjem na kanalu, bez značajnijeg narušavanja karakteristika korisnika koji ima bolje uslove na kanalu. U ovom radu simuliran je slučaj komunikacije u kojem učestvuju dva korisnika i u kojem je pretpostavljeno da su informacije o stanju kanala poznate na strani bazne stanice, pa se u skladu sa tim vrši i raspodjela snage među korisnicima. U realnim sistemima dobijanje informacija o stanju kanala je dosta složen proces koji je uglavnom baziran na pilot sekvencama. S obzirom da je glavni cilj primjene NOMA sistema omogućavanje masivne konektivnosti, pored ranije navedenih izazova ključni izazovi ostaju problemi vezani za uparivanje i grupisanje korisnika u *cluster*-e, kašnjenje prilikom SIC procedure, tehnike za kognitivnu dodjelu snage i sl.

6. ZAKLJUČAK

Masivne komunikacije mašinskog tipa doživljavaju ekspanziju poslednjih godina i najčešće se definišu kao komunikacije u kojima učestvuje veliki broj različitih vrsta senzora, bez učešća ili sa minimalnim učešćem čovjeka. Masivne komunikacije mašinskog tipa su i dalje u jednoj od ranih faza razvoja, u smislu broja povezanih uređaja koji trenutno komuniciraju. Razlog za veliki porast broja povezanih uređaja koji se očekuje u budućnosti je prelazak u loE domen u kojem će biti povezani ljudi, uređaji, procesi, objekti i slično. Od budućih mobilnih mreža se očekuje da obezbijede efikasnu platformu za uspješno postojanje masivnih komunikacija mašinskog tipa, kao i za njihov dalji rast i razvoj. Da bi to bilo moguće prije svega je potrebno implementirati tehnike višestrukog pristupa koje mogu da podrže specifične zahtjeve koje nameće sama priroda masivnih komunikacija mašinskog tipa i koji između ostalog uključuju: masivnu konektivnost, stalan porast broja uređaja, različite zahtjeve po pitanju kvaliteta servisa, energetska efikasnost, jednostavan hardver.

Trenutno aktuelne generacije mobilnih mreža zasnovane su na ortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa. U radu je pokazano da u slučaju velikog broja korisnika, ortogonalni način pristupa spektru stvara kolizije i zagušenja jer su resursi koji se dodjeljuju korisnicima ograničeni, kao posledica njihove ortogonalnosti. To dovodi do tipičnih problema kada je riječ o primjeni ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa u masivnim komunikacijama mašinskog tipa koje se ogledaju u kašnjenju, gubitku paketa, neiskorišćenosti radio resursa i maloj spektralnoj efikasnosti. Zato se smatra da su ortogonalne tehnike višestrukog pristupa jedna od glavnih prepreka za primjenu masivnih komunikacija mašinskog tipa u postojećim mobilnim mrežama i javlja se potreba za stvaranjem novih tehnika višestrukog pristupa, koje bi podržale ubrzan rast broja korisnika u budućim mrežama. Trenutno se kao najpogodnije rješenje vide neortogonalne tehnike višestrukog pristupa koje bi bile bazirane na neortogonalnoj dodjeli resursa korisnicima, čime bi se izgubilo ograničenje broja korisnika uslovljeno dostupnošću ortogonalnih resursa.

Postoji više vrsta i načina realizacije neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa, a u ovom radu analizirana je primjena neortogonalnih tehnika u domenu snage na

masivne komunikacije mašinskog tipa. Osnovna ideja na kojoj se zasniva PD-NOMA je da korisnici međusobno budu razdvojeni u domenu snage, pri čemu mogu koristiti iste vremenske i frekvencijske resurse za komunikaciju. Razdvajanje u domenu snage zapravo znači dodjeljivanje različitog nivoa snage korisnicima u zavisnosti od karakteristika njihovih komunikacionih kanala. Korisnici koji imaju bolje uslove na komunikacionom kanalu dobijaju niži nivo snage, dok korisnici koji imaju slabije uslove na kanalu dobijaju viši nivo snage. Navedeni princip omogućava veću spektralnu efikasnost, masivnu konektivnost, manje kašnjenje i veću mogućnost prilagođavanja korisnicima na osnovu zahtijevanog kvaliteta servisa, u poređenju sa ortogonalnim tehnikama. Razmatrana je i kompatibilnost PD-NOMA tehnika sa drugim transmisionim tehnikama u prenosu signala poput MIMO sistema, kooperativnih mreža, kogitivnih mreža i sl.

U petom poglavlju ovog rada izvršene su simulacije određenih praktičnih scenarija, analiziran je uticaj dodjele snage korisnicima i karakteristika komunikacionih kanala na vjerovatnoću greške na strani korisnika, tj. na pouzdanost sistema zasnovanog na NOMA tehnici. Pokazano je da je u sistemima baziranim na NOMA tehnici pravilna raspodjela snage, pored karakteristika komunikacionog kanala, najvažnija za smanjenje vjerovatnoće greške. Takođe se pokazuje da se primjenom kooperativnog prenosa, u kojem korisnik sa boljim karakteristikama komunikacionog kanala ima ulogu releja, može značajno povećati pouzdanost komunikacije korisnika sa lošijim stanjem na kanalu.

Dalja istraživanja vezana za primjenu NOMA tehnika u masivnim komunikacijama mašinskog tipa mogu obuhvatati:

- Razvoj tehnika koje bi omogućile dobijanje informacija o stanju kanala bez značajnog narušavanja spektralne efikasnosti i bez uvođenja dodatne kompleksnosti u sistem;
- Razvoj tehnika za unapređenje SIC procedure zasnovanih na estimaciji kanala u više faza, kako bi se dobile preciznije informacije i uzele u obzir greške u SIC proceduri prilikom dizajniranja algoritama za dodjelu snage korisnicima;
- Kreiranje algoritama koji bi na dinamički način omogućili raspoređivanje korisnika u *cluster*-e fiksne ili promjenljive veličine. Sve ovo mora da bude

praćeno i tehnikama za optimalnu raspodjelu snage među korisnicima u *cluster*-ima što uvodi dodatni nivo složenosti;

- Razvoj hibridnih tehnika višestrukog pristupa baziranih na kombinaciji ortogonalnih i neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa.

LITERATURA

- [1] Mahyar Shirvanimoghaddam, Mischa Dohler, Sarah J. Johnson: „*Massive Non Orthogonal Multiple Access for Cellular IoT: Potentials and Limitations*”, arXiv: 1612.00552v1, Dec. 2016.
- [2] Shree Krishna Sharma, Xianbin Wang: „*Towards Massive Machine Type Communications in Ultra-Dense Cellular IoT Networks: Current Issues and Machine Learning-Assisted Solutions*”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, arXiv: 1808.02924v1, Aug. 2018.
- [3] Affif Osseiran, Jose F. Monserrat, Patrick Marsch, Olav Queseth: „*5G Mobile and Wireless Communications Tehnology*”, Cambridge University Press, Jun 2016.
- [4] Mahyar Shirvanimoghaddam, Sarah J. Johnson: „*Multiple Access Technologies for cellular M2M Communications: An Overview*”, arXiv: 1611.05548v1, Nov. 2016.
- [5] Lai, Xiaochen, et al.: "A Survey of Body Sensor Networks", *Sensors* 13.5, May 2013.
- [6] Rana Abbas: „*Multiple Access for Massive Machine Type Communications*”, University of Sidney, Oct. 2017.
- [7] Hoult, Neil, et al.: „*Wireless sensor networks: creating smart infrastructure*”, Proceedings of the ICE-Civil Engineering. Vol. 162. No. 3. Ice Virtual Library, Aug. 2009.
- [8] Oliveira, Luís M., and Joel J. Rodrigues: "Wireless sensor networks: a survey on environmental monitoring" *Journal of communications* 6.2, Apr. 2011.
- [9] <https://www.atim.com/en/lte-m-nb-iot/>
- [10] Yongpeng Wu, Xiqi Gao, Shidong Zhou, Wei Yang, Yury Polyanskiy i Giuseppe Caire: „*Massive access for future communications systems*”, arXiv:1910.12678v5, Feb. 2020.
- [11] Muhammad Ayoub Kamal, HafizWahab Raza, Muhammad Mansoor Alam, Mazliham Mohd Su'ud i Aznida binti Abu Bakar Sajak: „*Resource Allocation Schemes for 5G Network: A Systematic Review*”, *Sensors*, Oct. 2021.
- [12] Selah Faruque: „*Radio Frequency Multiple Access Techniques Made Easy*”, Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering, Sep. 2019.

- [13] https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_12705/objava_109511/fajlovi/GLAVA%206.doc
- [14] Public Safety Radio Frequency Spectrum: „*A Comparison of Multiple Access Techniques*”, Nov. 2016.
- [15] Michele Morelli, C.C. Jay Kuo, Man-On Pun: „*Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA): A Tutorial Review*“, Vol. 95, No.7, Jul 2007.
- [16] Hesham Moussa: „*Channel Access Management for Massive Cellular IoT Applications*”, May 2020.
- [17] Zhiqiang Wei, Jinhong Yuan, Derrick Wing Kwan Ng, Maged ElKashlan and Zhiguo Ding: „*A Survey of Downlink Non-orthogonal Multiple Access for 5G Wireless Communication Networks*”, arXiv:1609.01856v1, Sep. 2016.
- [18] M. R. Bhatia: „*Multiple access techniques for 5G networks*”, International Journal of Engineering Technologies and Management Research, vol. 5, no.2, pp. 305–314, Feb. 2018.
- [19] Yuanwei Liu, Zhijin Qin, Maged ElKashlan, Zhiguo Ding, Arumugam Nallanathan and Lajos Hanzo: „*Non-Orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond*”, arXiv:1808.00277, Aug. 2018.
- [20] Dragana Bulatović, Uglješa Urošević, Zoran Veljović, Enis Kočan: „*Analiza informacionog kapaciteta u NOMA sistemima*”, Telfor, Nov. 2021.
- [21] Z. Ding et al.: „*Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks*,” IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 2, pp. 185-191, Feb. 2017.
- [22] Mohamed Rihan, Lei Huang and Peichang Zhang: „*Joint interference alignment and power allocation for NOMA-based multi-user MIMO systems*”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Sep. 2018.
- [23] <http://telekomsvet.blogspot.com/2013/03/heterogene-mobilne-mreze.html>
- [24] Aleksandra Lopušina: „*Analiza performansi komunikacionih sistema na opsezima milimetarskih talasa u 5G scenarijima*”, Master rad, Elektrotehnički fakultet Podgorica, feb. 2018.

- [25] Yuanwei Liu, Zhijin Qin, Maged Elkaslan, Arumugam Nallanathan, Julie A. McCann: „*Non-Orthogonal Multiple Access in Large-Scale Heterogeneous Networks*”, IEEE Journal, Dec. 2017.
- [26] Uglješa Urošević: „Rješenja za poboljšanje performansi kooperativnih relejnih sistema sa distribuiranim MIMO tehnikama”, Doktorska disertacija, Elektroteh. fakultet Podgorica, mar. 2018.
- [27] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan and V. K. Bhargava: "A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 10, pp. 2181-2195, Oct. 2017.
- [28] Sumita Majhi and Pinaki Mitra: „A Review of Cognitive Radio Inspired NOMA Techniques”, Indian Institute of Tehnology, Feb. 2020.
- [29] F. Zhou, Y. Wu, Y. C. Liang, Z. Li, Y. Wang and K. K. Wong: "State of the Art, Taxonomy, and Open Issues on Cognitive Radio Networks with NOMA," IEEE Wireless Communications, vol. 25, no. 2, pp. 100-108, Apr. 2018.
- [30] Mahyar Shirvanimoghaddam, Massimo Condoluci, Mischa Dohler, Sarah J. Johnson: „On the Fundamental Limits of Random Non-orthogonal Multiple Access in Cellular Massive IoT”, arXiv:1705.10471v1, May 2017.
- [31] Y. Chen et al.: "Toward the Standardization of Non-Orthogonal Multiple Access for Next Generation Wireless Networks," IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 3, pp. 19-27, Mar. 2018.

LISTA SKRAĆENICA

AF – *Amplify and Forward*
AMPS - *Advanced Mobile Phone system*
AWGN – *Additive White Gaussian Noise*
BER – *Bit Error Rate*
CDMA – *Code Division Multiple Access*
CD-NOMA – *Code Division Non-Orthogonal Multiple Access*
CEPT - *The European Conference of Postal and Telecommunications*
CR – *Cognitive Radio*
CSI – *Channel State Information*
DS – CDMA - *Direct Sequence Code Division Multiple Access*
DF – *Decode and Forward*
EC-GSM – *Extended Coverage Global System for Mobile Communication*
eMBB - *enhanced Mobile Broadband*
FDMA – *Frequency Division Multiple Access*
FDD – *Frequency Division Duplex*
FDS - *Frequency Domain Spreading*
FH-CDMA – *Frequency Hopping Code Division Multiple Access*
FFT - *Fast Fourier Transform*
GOCA - *Group Orthogonal Coded Access*
GPRS – *General Packet Radio Services*
GSM - *Global System for Mobile Communication*
HSDPA - *High-Speed Downlink Packet Access*
HTC – *Hyman Type Communications*
H2H – *Hyman – to – Hyman*
IDMA - *Interleave Division Multiple Access*
IGMA - *Interleave-Grid Multiple Access*
IoT – *Internet of Things*
IoE – *Internet of Everything*
IoP – *Internet of People*
iFFT – *Inverse Fast Fourier Transform*
LCRS - *Low Code Rate Spreading*

LDS-SVE - Low Density Spreading with Signature Vector Extension

LSSA - Low Code Rate and Signature Based Shared Access

LTE - Long Term Evolution

LTE-A - Long Term Evolution Advanced

LTE-M - Long Term Evolution for Machine Type Communication

MIMO – Multiple Input Multiple Output

mMTC – massive Machine Type Communications

MPT - Microwave Power Transmission

MUD – Multi User Detection

MUSA - Multi-User Shared Access

NB-IoT – Narrow Band Internet of Things

NCMA - Non-Orthogonal Coded Multiple Access

NOCA - Non-Orthogonal Coded Access

NOMA – Non-Orthogonal Multiple Access

NMT - Nordic Mobile Telephone

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OMA – Orthogonal Multiple Access

PA-NOMA - Power Allocation Non-Orthogonal Multiple Access

PDMA - Pattern Division Multiple Access

PD-NOMA – Power Domain Non-Orthogonal Multiple Access

QoS – Quality of Service

QPSK – Quadrature Phase Shift Keying

RA – Random Access

RAR - Random Access Response

RDMA - Repetition Division Multiple Access

RF – Radio Frequency

RSMA - Resource Spread Multiple Access

SCMA - Sparse Code Multiple Access

SDN – Software Defined Networks

SIC – Successive Interference Cancellation

SNR – Signal to Noise Ratio

SWIPT - Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

TACS - Total Access Communications System

TDD – Time Division Multiple Access

TDMA - Time Division Multiple Access

uMTC - ultra-reliable Machine Type Communication

UMTS - Universal Mobile Telecommunications System

uRRLC - Ultra Reliable Low Latency Communications

ZF – Zero Forcing

3GPP - Third Generation Partnership Project