

Komparacija tehnika pristupa kod mobilnih mreža

Šimić, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:103731>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

KOMPARACIJA TEHNIKA PRISTUPA KOD MOBILNIH MREŽA COMPARISON OF MULTIPLE ACCESS TECHNIQUES IN MOBILE NETWORKS

Mentor: prof. dr. sc. Štefica Mrvelj

Student: Marin Šimić
JMBAG: 0135245683

Zagreb, rujan 2024.

Zagreb, 2. travnja 2024.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Tehnologija telekomunikacijskog prometa I**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7594

Pristupnik: **Marin Šimić (0135245683)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Komparacija tehnika pristupa kod mobilnih mreža**

Opis zadatka:

Prikazati značajke mobilnih mreža različitih generacija koje se odnose na korištene tehnologije i skupove slučajeva korištenja. Analizirati značajke tehnika pristupa korištene za raspodjelu raspoložive širine pojasa kod mobilnih mreža od prve do četvrte generacije. Povezati zahtjeve višestrukih budućih 5G scenarija (uključujući eMBB, URLLC i mMTC) sa značajkama 5G pristupne tehnologije. Usporediti performanse tehnika pristupa korištenih u mobilnim mrežama različitih generacija.

Mentor:



prof. dr. sc. Štefica Mrvelj

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



KOMPARACIJA TEHNIKA PRISTUPA KOD MOBILNIH MREŽA

SAŽETAK

U 5. generaciji (5G) bežičnih komunikacijskih sustava, očekuje se ispunjavanje zahtjeva koji nadmašuju mogućnosti prethodnih tehnologija. U tom kontekstu, neortogonalni višestruki pristup (NOMA) izdvaja se kao obećavajuća tehnika za rješavanje tih izazova. NOMA omogućuje podršku većem broju korisnika nego što je broj ortogonalnih resursnih slotova, koristeći neortogonalnu raspodjelu resursa. Ova sposobnost poboljšava efikasnost korištenja spektralnih resursa i povećava kapacitet mreže, čime se omogućuje veći broj istovremenih korisnika. U usporedbi s konvencionalnim ortogonalnim pristupima (OMA), NOMA pokazuje značajne prednosti u skalabilnosti i učinkovitosti, što je ključno za zadovoljenje globalnih potreba za brzinom i kvalitetom komunikacije u 5G mrežama. Rad analizira i uspoređuje tehnike višestrukog pristupa specifične za različite generacije mobilnih mreža, s naglaskom na njihove prednosti i izazove. Razumijevanje ovih tehnika i njihova pravilna primjena ključni su za optimizaciju performansi i učinkovitosti mreža, a NOMA će igrati ključnu ulogu u daljnjem razvoju i poboljšanju 5G mreža.

KLJUČNE RIJEČI: generacije mobilnih mreža; tehnike višestrukog pristupa; OMA; NOMA

SUMMARY

In the 5th generation (5G) wireless communication systems, it is expected that requirements will exceed the capabilities of previous technologies. In this context, Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) stands out as a promising technique to address these challenges. NOMA enables support for a larger number of users than there are orthogonal resource slots by using non-orthogonal resource allocation. This capability enhances spectral efficiency and increases network capacity, allowing for a higher number of simultaneous users. Compared to conventional Orthogonal Multiple Access (OMA) methods, NOMA shows significant advantages in scalability and efficiency, which are crucial for meeting global demands for speed and quality of communication in 5G networks. The paper analyzes and compares multiple access techniques specific to different generations of mobile networks, focusing on their advantages and challenges. Understanding these techniques and their proper implementation is crucial for optimizing network performance and efficiency, and NOMA will play a key role in the continued development and enhancement of 5G networks.

KEYWORDS: generations of mobile networks; multiple access techniques; OMA; NOMA

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. GENERACIJE MOBILNIH MREŽA	2
2.1. Prva generacija mobilnih mreža	2
2.2. Druga generacija mobilnih mreža	3
2.3. Treća generacija mobilnih mreža	4
2.4. Četvrta generacija mobilnih mreža	6
2.5. Peta generacija mobilnih mreža	7
3. TEHNIKE PRISTUPA KOD MOBILNIH MREŽA RAZLIČITIH GENERACIJA... 9	9
3.1. Tehnike ortogonalnog višestrukog pristupa	11
3.1.1. Tehnika višestrukog pristupa s frekvencijskom raspodjelom	12
3.1.2. Tehnika višestrukog pristupa s vremenskom raspodjelom	12
3.1.3. Tehnika višestrukog pristupa s kodnom raspodjelom	12
3.1.4. Tehnika ortogonalnog višestrukog pristupa s frekvencijskom raspodjelom	13
3.2. Tehnike neortogonalnog višestrukog pristupa	15
3.2.1. NOMA u domeni snage.....	16
3.2.1.1. Alokacija snage u NOMA-i.....	16
3.2.1.2. NOMA baziran na višestrukim antenama	17
3.2.1.3. NOMA temeljena na suradnji	17
3.2.1.4. NOMA inspirirana kognitivnim radiom.....	18
3.2.2. NOMA u kodnoj domeni.....	18
3.2.2.1. LDS-CDMA	19
3.2.2.2. LDS-OFDM	19
3.2.2.3. SCMA.....	20
3.2.2.4. MUSA	22
3.2.2.5. SAMA	23
3.2.3. Druge tehnike višestrukog pristupa NOMA.....	23
3.2.3.1. PDMA	23
3.2.3.2. BOMA	24
3.2.3.3. LPMA.....	24
3.2.3.4. S-NOMA	24
3.2.3.5. NOMA temeljena na interleaverima	25
3.2.3.6. NOMA temeljenu na širenju	26
3.2.3.7. NOMA s podjelom snopova.....	27

4. ANALIZA ZNAČAJKI TEHNIKA VIŠESTRUKOG PRISTUPA U 5G MOBILNOJ MREŽI	27
4.1. Značajke 5G mobilne mreže	27
4.2. Implementacija NOMA sustava u 5G	30
4.2.1. Problemi s dodjelom resursa u NOMA sustavu	32
4.2.2. Problemi s dodjelom snaga u NOMA sustavu	33
4.2.3. Problemi sa signalizacijom u NOMA sustavu	34
4.2.4. Sigurnosni problemi u NOMA sustavu	35
5. USPOREDBA ZNAČAJKI TEHNIKA PRISTUPA U 5G MOBILNOJ MREŽI S PRETHODNIM GENERACIJAMA MOBILNIH MREŽA.....	37
6. ZAKLJUČAK.....	44
POPIS LITERATURE.....	45
POPIS KRATICA I AKRONIMA.....	49
POPIS SLIKA.....	53
POPIS TABLICA.....	53

1. UVOD

Budućnost čovječanstva usmjerena je prema umreženom društvu s neograničenim pristupom informacijama i podacima u svakom trenutku i na svakom mjestu. Da bi se ostvarili ovi ciljevi, potrebno je istražiti nove tehnološke komponente koje će nadopuniti postojeće bežične tehnologije. Eksplozivni porast mobilnog podatkovnog prometa i stalni zahtjevi za većim brzinama i manjom latencijom vrše pritisak na operatere da poboljšaju usluge, što čini prijelaz na suvremene generacije mobilnih mreža nužnim.

Svrha ovog završnog rada je pružiti sveobuhvatnu analizu i usporedbu različitih tehnika višestrukog pristupa korištenih u mobilnim mrežama različitih generacija. Rad će istražiti evoluciju ovih tehnika od prve generacije do pete generacije, s posebnim naglaskom na njihove karakteristike, prednosti i ograničenja. Posebna pažnja bit će posvećena neortogonalnom višestrukome pristupu kao inovativnoj tehnici koja se koristi u mobilnim mrežama pete generacije za poboljšanje spektralne učinkovitosti i kapaciteta mreže. Naslov završnog rada jest: Komparacija tehnika pristupa kod mobilnih mreža. Rad je podijeljen u šest cjelina:

1. Uvod
2. Generacije mobilnih mreža
3. Tehnike pristupa kod mobilnih mreža različitih generacija
4. Analiza značajki tehnika višestrukog pristupa u 5G mobilnoj mreži
5. Usporedba značajki tehnika pristupa u 5G mobilnoj mreži s prethodnim generacijama mobilnih mreža
6. Zaključak.

U drugom je poglavlju sažeto prikazan razvoj mobilnih mreža kroz generacije. U trećem poglavlju navedene su tehnike višestrukog pristupa korištene kod mobilnih mreža različitih generacija, a klasificiraju se kao ortogonalne višestruke tehnike i neortogonalne višestruke tehnike. Analiza značajki tehnika višestrukog pristupa u 5G mobilnoj mreži prikazana je u četvrtom poglavlju. U petom poglavlju dana je komparativna analiza značajki tehnika pristupa u 5G mobilnoj mreži s prethodnim generacijama mobilnih mreža.

2. GENERACIJE MOBILNIH MREŽA

Povijest mobilnih uređaja i mreža obično se dijeli na generacije (prva, druga, treća itd.) kako bi se označili ključni koraci u promjenama mogućnosti i tehnologija tijekom godina. "Generacija" se odnosi na određeni skup standarda uspostavljenih za mobilne mreže, pri čemu svaka generacija donosi povećanje brzine tih mreža. Svaka nova generacija mobilnih mreža donosi značajna poboljšanja u odnosu na prethodnu, nastojeći zadovoljiti rastuće potrebe korisnika te otvoriti prostor za nove ideje, vrste upotrebe i napredak mobilnih mreža. Mobilne mreže evoluirale su kroz nekoliko generacija od svojih početaka u ranim 1980-ima. Svaka generacija donosi naprednije tehnologije, veće brzine prijenosa podataka, bolje performanse i nove mogućnosti za korisnike. U sljedećim potpoglavljima dan je pregled glavnih karakteristika svake generacije mobilnih mreža.

2.1. Prva generacija mobilnih mreža

Razvoj mobilnih bežičnih mreža započeo je 1979. godine s pojavom prvih mobilnih telefona i uvođenjem prve generacije mobilnih mreža (1G), koje su se temeljile na analognim telekomunikacijskim standardima. Tijekom ranih 80-ih, 1G mreže su postajale sve popularnije širom svijeta, a uvedena je i prva komercijalna ćelijska mreža koja je koristila analogne signale, podržavajući samo glasovne usluge s brzinom prijenosa podataka od oko 2,4 kbit/s, [1].

Značajan tehnološki napredak koji je razlikovao prvu generaciju mobilnih uređaja bila je upotreba višestrukih ćelija i mogućnost prijenosa poziva između ćelija tijekom kretanja korisnika kroz područje pokriveno s više ćelija. Ova generacija koristila je ćelijske mreže s brojnim odašiljačima male snage (100 W ili manje). Područja su bila podijeljena na ćelije s ograničenim rasponom, pri čemu je svaka ćelija djelovala kao bazna stanica. Prvu komercijalnu automatiziranu ćelijsku mrežu realizirala je tvrtka NTT (engl. *Nippon Telegraph and Telephone Corporation*) u Japanu 1979. godine. Isprva je mreža pokrivala Tokio, grad s preko 20 milijuna stanovnika, s 23 bazne stanice. Unutar pet godina, NTT mreža proširila se na cijeli Japan, postavši prva nacionalna 1G mreža. Tehnologija je unaprijeđena 1981. godine i implementirana u Danskoj, Finskoj, Norveškoj i Švedskoj kroz NMT (engl. *Nordic Mobile Telephone*). U Sjedinjenim Američkim Državama, prva generacija mreže pojavila se 1983. godine, nakon čega su uslijedile mreže u Ujedinjenom Kraljevstvu, Meksiku i Kanadi. Pojavom analognih sustava poput AMPS (engl. *Advanced Mobile Phone System*) i NMT 1979. godine, koji su postali standardi za mobilne mreže prve generacije, omogućeno je korištenje mobilnih telefona razvijenih specifično za te mreže.

U različitim regijama korišteni su različiti sustavi: AMPS u Sjevernoj Americi i Rusiji, RTMI u Italiji, TACS (engl. *Total Access Communication System*) u Ujedinjenom Kraljevstvu, Radiocom 2000 u Francuskoj, te C-450 u Njemačkoj, Portugalu i državama južne Afrike.

Iako inovativna i revolucionarna za svoje vrijeme, prva generacija suočila se s nizom problema, uključujući loše trajanje baterije, nisku kvalitetu glasa i prekidanja veza i preklapanja poziva, što je rezultiralo prisustvom treće osobe u razgovoru. Također, uređaji su bili glomazni i nepraktični za korištenje. Nadalje, problemi su bili i slaba zaštita komunikacije te nemogućnost korištenja roaminga. Ograničena na analognu glasovnu komunikaciju, 1G je bila nepouzdana i nespretna u usporedbi s današnjim standardima, ali je predstavljala ključan korak u razvoju telekomunikacija, [2], [3].

2.2. Druga generacija mobilnih mreža

Kako bi se poboljšala kvaliteta prijenosa, kapacitet sustava i pokrivenost signalom, razvijena je druga generacija mobilnih mreža, poznata kao 2G. Početkom 1990-ih, 2G je ostvarila značajan uspjeh u odnosu na 1G sustav. Ključna razlika između prve i druge generacije mobilnih mreža je ta što prva generacija koristi analognu tehnologiju, dok druga generacija koristi digitalni prijenos podataka. 2G telefonski sustavi uveli su naprednu i brzu telefon-prema-mreži (engl. *phone-to-network*) signalizaciju te su koristili digitalne signale umjesto analognih.

Godine 1991. uvedene su 2G digitalne mobilne mreže koje su donijele brojne novosti i prednosti digitalne telekomunikacije. Prvu digitalnu mrežu lansirao je operator Radiolinija (danas Elisa) u Finskoj, a zasnivala se na novom digitalnom standardu za bežični prijenos podataka, poznat kao GSM (engl. *Global System for Mobile Communications*), koji je tijekom godina dodatno unaprijeđen. U Europi je ETSI (engl. *European Telecommunications Standards Institute*) primijenio GSM tehnologiju kako bi podržao međunarodni roaming, što je značajno doprinijelo prevladavanju 2G tehnologije nad 1G. Frekvencije koje koriste 2G sustavi u Europi su općenito više nego one u Americi. Na primjer, frekvenciju od 900 MHz koristili su 1G i 2G sustavi u Europi. U Americi su frekvencije bile niže uz nešto preklapanja s europskim.

Kasnije se pojavio standard GPRS (engl. *General Packet Radio Service*), koji koristi komutaciju paketa umjesto komutacije kanala kakvu koristi obični GSM, što je smanjilo cijene usluga prijenosa podataka i označilo prelazak na takozvanu 2.5G tehnologiju. GPRS tehnologija zahtijevala je promjene u postojećoj infrastrukturi kako bi se omogućile veće brzine prijenosa paketnim modom u pristupnom dijelu mreže. Uvedena su tri nova uređaja koja su omogućila efikasnije korištenje frekvencijskog spektra i usklađivanje rada s GSM mrežama. Korištenjem svih osam vremenskih odsječaka, GPRS je teoretski omogućavao brzine prijenosa

do 160 kbit/s. Godine 2003. predstavljena je EDGE (engl. *Enhanced Data Rates for Global Evolution*) tehnologija, koja je nadogradila GPRS i temeljila se na GSM standardu. EDGE je implementirao 8-PSK (engl. *Phase shift keying*) modulaciju i metode inkrementalne redundancije za učinkovitije ispravljanje pogrešaka, povećao frekvencijski opseg i omogućio četiri puta veći podatkovni promet u odnosu na GPRS, i to do 384 kbit/s.

Porast upotrebe mobilnih telefona bio je eksplozivan. Tijekom ovog razdoblja počeli su se koristiti unaprijed plaćeni mobilni telefoni (engl. *prepaid mobile phone*). Unaprijed plaćeni mobilni telefon, zapravo je unaprijed plaćena mobilna usluga za koji korisnik kupuje bonove koje troši svaki put kada nekome upućuje poziv. Uvođenjem 2G sustava mobilni uređaji postali su manji i lakši (100 – 200 grama) te su zamijenili popularne "cigle". Ovu pozitivnu promjenu u masi omogućili su napredak u tehnologiji, naprednije baterije, učinkovitija elektronika te uvođenje većeg broja ćelija i odašiljača.

Glavni cilj 2G tehnologije bio je pružiti pouzdanu i sigurnu komunikaciju. 2G je omogućila kvalitetniji prijenos signala i zvuka te poboljšanu spektralnu učinkovitost, koristeći digitalni signal za prijenos glasa brzinom do 13 kbit/s i omogućila mnoge podatkovne usluge poput VMS-a (engl. *Voice Mail Service*) i SMS-a (engl. *Short Message Service*). Uvedene su značajke poput MMS-a (engl. *Multimedia Messaging Service*), konferencijskih poziva, zadržavanja poziva i internog roaminga. Povećana brzina prijenosa podataka omogućila je slanje e-pošte. Nove vrste komunikacije prvotno su radile samo na GSM mrežama, a kasnije i na svim digitalnim mrežama.

Prva SMS poruka poslana je između dviju osoba u Finskoj 1993. godine. 2G tehnologija omogućila je pristup multimedijalnom sadržaju na mobilnim telefonima, uključujući prijenos melodije zvona na mobilni uređaj kao sadržaj koji se plaća. Finska je bila prva država koja je uvela oglašavanje putem mobilnih telefona 2000. godine, uz besplatnu uslugu slanja dnevnih vijesti SMS-om. Prve usluge prijenosa podataka započele su SMS porukama, a prva internetska usluga uvedena je u Japanu 1999. godine, [2], [3].

2.3. Treća generacija mobilnih mreža

Kako je upotreba 2G telefona rasla, posebice u svakodnevnom životu, postala je očita povećana potražnja za prijenosom podataka, kao što je Internet, te potreba za većim brzinama prijenosa podataka. 2G tehnologija nije mogla zadovoljiti te potrebe, što je dovelo do razvoja treće generacije (3G) mobilnih mreža početkom 2000-ih godina, koja omogućava paketni prijenos podataka brzinom do 3,6 Mbit/s uz poboljšanu kvalitetu usluge. Ova generacija se ističe upotrebom komutacije paketa (engl. *packet switching*) za prijenos podataka i fokusira se

na brzinu i količinu prijenosa podataka, što je rezultiralo različitim konkurentskim standardima. 3G omogućuje zadatke poput preuzimanja videozapisa, pretraživanja, dijeljenja fotografija, obavljanja video poziva, igranja igara i pristupa društvenim mrežama, poboljšavajući kapacitet i brzinu prijenosa podataka uz niske troškove. Ključne značajke uključuju podršku velikom broju korisnika i visoke brzine prijenosa te poboljšanu kvalitetu glasa. Sustavi 3G mobilne mreže zahtijevaju više energije od većine 2G sustava, što ih čini skupljima od svojih prethodnika, [1], [2], [3].

Standardi treće generacije mobilnih tehnologija omogućili su razvoj VoIP (engl. *Voice over Internet Protocol*) tehnologije, koja digitalizira i prenosi glasovne podatke putem Interneta i drugih podatkovnih mreža čiji rad se temelji na IP (engl. *Internet Protocol*) protokolu. VoIP smanjuje troškove telefoniranja i pruža veću fleksibilnost jer omogućava obavljanje telefonskih razgovora preko postojećih mrežnih konekcija, umjesto korištenja tradicionalnih telefonskih mreža. Ova tehnologija omogućava komunikaciju s mobilnim i fiksnim pretplatnicima te međunarodne pozive po povoljnijim cijenama.

Tijekom razvoja 3G sustava, 2.5G i GPRS su uvedeni kao produžeci 2G mreža, nudeći slične usluge bez brzog prijenosa podataka i potpune multimedijalne podrške. EDGE, poboljšanje GPRS tehnologije, pruža do tri puta veći kapacitet prijenosa podataka. 3G tehnologija omogućila je prijenos multimedijalnog sadržaja poput radija i televizije na mobilne uređaje. GPRS standard je kontinuirano nadograđivan, a prva nekomercijalna 3G mreža, s brzinama prijenosa od 200 kbit/s do nekoliko Mbit/s, pokrenuta je 2001. godine u Tokiju od strane tvrtke NTT DoCoMo.

Godine 2001. uveden je UMTS (engl. *Universal Mobile Telecommunications System*) standard, nasljednik GSM-a, koji omogućuje veće brzine prijenosa podataka do 2 Mbit/s i globalni roaming. UMTS je razvijen kako bi zadovoljio rastuće potrebe za mobilnim i internetskim aplikacijama, pružajući veću spektralnu učinkovitost i podršku za prijenos govora, slika, video sadržaja i podataka. Ovaj sustav zahtijeva nove bazne stanice i dodjelu novih frekvencija. Uključuje zemaljske i satelitske komponente koje omogućuju pristup uslugama u širokom pojasu frekvencija (makro, mikro i pikoćelije) te osigurava univerzalnu pokrivenost velikih geografskih područja, s terminalima koji podržavaju sve potrebne usluge. UMTS značajno poboljšava kapacitet, brzinu i mogućnosti komunikacije u 3G mrežama.

Nakon 2000. godine, pojavili su se standardi HSPA (engl. *High-Speed Packet Access*) i HSPA+, koji omogućuju brzine prijenosa do 42 Mbit/s i unapređuju multimedijску podršku, uključujući GPS, video pozive i mobilnu televiziju. HSPA+ uveo je napredne tehnologije antenskih nizova poput *beamforminga* i MIMO-a (engl. *Multiple Input Multiple Output*),

ključne za razvoj telekomunikacija. Protokol HSDPA (engl. *High-Speed Downlink Packet Access*), poznat i kao 3.5G ili turbo 3G, poboljšava komunikaciju u UMTS mrežama s brzinama od 1,8 do 14 Mbit/s, dok HSPA+ pruža brzine do 42 Mbit/s i 84 Mbit/s. U Japanu i Južnoj Koreji više ne postoje mobiteli koji ne podržavaju 3G tehnologiju, a iPhone je postao vrlo popularan uređaj ove generacije, [2], [3], [4].

Hrvatski Telekom započeo je proces postupnog gašenja 3G mobilne mreže, u skladu s globalnim trendovima u telekomunikacijskoj industriji. Nakon gašenja 3G mreže u Osijeku i okolnim područjima, planira se isključenje na području Grada Zagreba i njegove okolice u razdoblju od 8. do 12. srpnja 2024. Prema informacijama iz HT-a, gašenje 3G mreže ključno je za optimizaciju spektralnih resursa, što omogućava daljnji razvoj i povećanje kapaciteta za 4G i 5G tehnologije. Ovaj korak pridonosi učinkovitijem iskorištavanju frekvencijskog spektra te podržava tehnološku modernizaciju. Kada je riječ o drugim mobilnim operaterima, slični procesi bit će neizbježni. Telemach Hrvatska trenutno ne planira gašenje 3G mreže, dok A1 Hrvatska provodi pripreme za postupno isključivanje, [5].

2.4. Četvrta generacija mobilnih mreža

Iako su korisnici putem mobilnih telefona već imali pristup Internetu, korištenje „mobilnog interneta“ postalo je uobičajeno tek s pojavom 3G mreža i specijaliziranih uređaja za pristup Internetu. Prvi takvi uređaji bili su *dongles*, koji su se spajali na računalo preko USB priključka, te kompaktni bežični usmjerivači (engl. *compact wireless router*) poput Novatel MiFi (engl. *Mobile WiFi*), koji su omogućili spajanje više računala na 3G internet putem WiFi mreže. Kako su ti uređaji postali popularni, proizvođači računala počeli su integrirati mobilne mrežne funkcionalnosti direktno u računala, što je omogućilo korištenje SIM kartica umjesto *donglesa* ili MiFi-a. Ovi uređaji, poznati kao *netbookovi*, pružili su lakši pristup mobilnom internetu. Do početka 2010-ih, pojavili su se uređaji s ugrađenim bežičnim internetom, poput E-reader-a, Amazon Kindle-a i Nook-a, što je potaknulo razvoj četvrte generacije mobilne tehnologije.

Do 2009. godine postalo je jasno da će 3G mreže biti preopterećene zbog rasta broja korisnika i potreba za bržim prijenosom podataka. Kao odgovor, počeo je razvoj četvrte generacije mobilnih tehnologija, poznate kao 4G, koja se pojavila krajem 2010-ih. 4G nudi veće brzine pristupa Internetu, poboljšanu kvalitetu usluge, bolju sigurnost i smanjene troškove u usporedbi s 3G, omogućujući značajna poboljšanja u prijenosu podataka i multimedijским zadacima. Sustav bežične mreže 4G standarda unapređuje postojeće komunikacijske mreže pružajući sveobuhvatno i pouzdano rješenje temeljeno na IP-u. U usporedbi s prethodnim

generacijama, glasovne, podatakovne i multimedijalne usluge isporučuju se korisnicima „u bilo koje vrijeme i s bilo kojeg mjesta“ uz visoke brzine prijenosa podataka. Korisnici također mogu koristiti usluge multimedijalnih poruka, videoprijenosa i *videochata*, te mobilne televizije sa sadržajima visoke definicije (engl. *HDTV-High-definition television*), [1].

Prve komercijalne 4G tehnologije bile su WiMAX u SAD-u i LTE (engl. *Long Term Evolution*) u skandinavskim državama. 4G se razlikuje od 3G po tome što koristi IP mrežu umjesto komutacije kanala između čvorova i terminala. LTE je međunarodni standard koji predstavlja potpunu IP tehnologiju za bežičnu komunikaciju i nadogradnju na UMTS mrežu (3G). LTE koristi *all-IP* arhitekturu i paketnu komutaciju (engl. *Packet Switched*) za prijenos podataka, dok VoLTE (engl. *Voice over Long-Term Evolution*) omogućuje prijenos telefonskih poziva preko IMS (engl. *IP Multimedia Subsystem*). LTE nudi značajna poboljšanja, uključujući veće brzine prijenosa i smanjenu latenciju, [2], [3].

Četvrta generacija mobilnih mreža teži pružanju kvalitetne, jednostavne i cjenovno pristupačne komunikacije, posebno u područjima s malo komercijalnog interesa. Ključne značajke 4G uključuju veće brzine prijenosa podataka i široku dostupnost. Za veliku mobilnost, 4G sustavi mogu podržavati brzine prijenosa podataka do 100 Mbit/s, a za malu mobilnost brzine do 1 Gbit/s. Budući da su mreže dosegle svoje teoretske granice, 4G mreža trenutno ne može zadovoljiti očekivani budući promet. Razvijanjem LTE-A standarda, temeljenog na prethodnim GSM i HSPA tehnologijama, postignute su norme 4G, koje omogućavaju brzine do 1 Gbit/s, širokopojasni bežični internet, IP pozive, mobilnu televiziju visoke rezolucije, video pozive visoke kvalitete i povezivanje više uređaja, uključujući koncept interneta stvari (engl. *Internet of Things*, IoT). U LTE-A standardu uveden je koncept višestrukih releja unutar i izvan opsega, što pomaže u povećanju područja pokrivenosti. Glavno ograničenje 4G sustava je korištenje referentnih signala specifičnih za ćelije, što smanjuje energetska učinkovitost mreže uzrokujući preveliko opterećenje. Zbog velike potrošnje energije i nedostatka spektra, potreban je novi standard mobilne komunikacije poznat kao 5G, [1].

2.5. Peta generacija mobilnih mreža

Glavni razlog za prelazak na 5G je rješavanje potreba koje 4G ne može učinkovito zadovoljiti. To su povećana brzina prijenosa podataka, smanjena kašnjenja od kraja do kraja, masovna povezivost uređaja, niži troškovi i dosljedna kvaliteta usluge. 5G tehnologija, odnosno peta generacija mobilne tehnologije, nudi izvanredne mogućnosti prijenosa podataka i može podržati neograničen broj povezanih uređaja, s potencijalom za dominaciju globalnim tržištem. Cilj je osigurati potpunu povezivost i postići sveprisutne i neprekidne komunikacije između

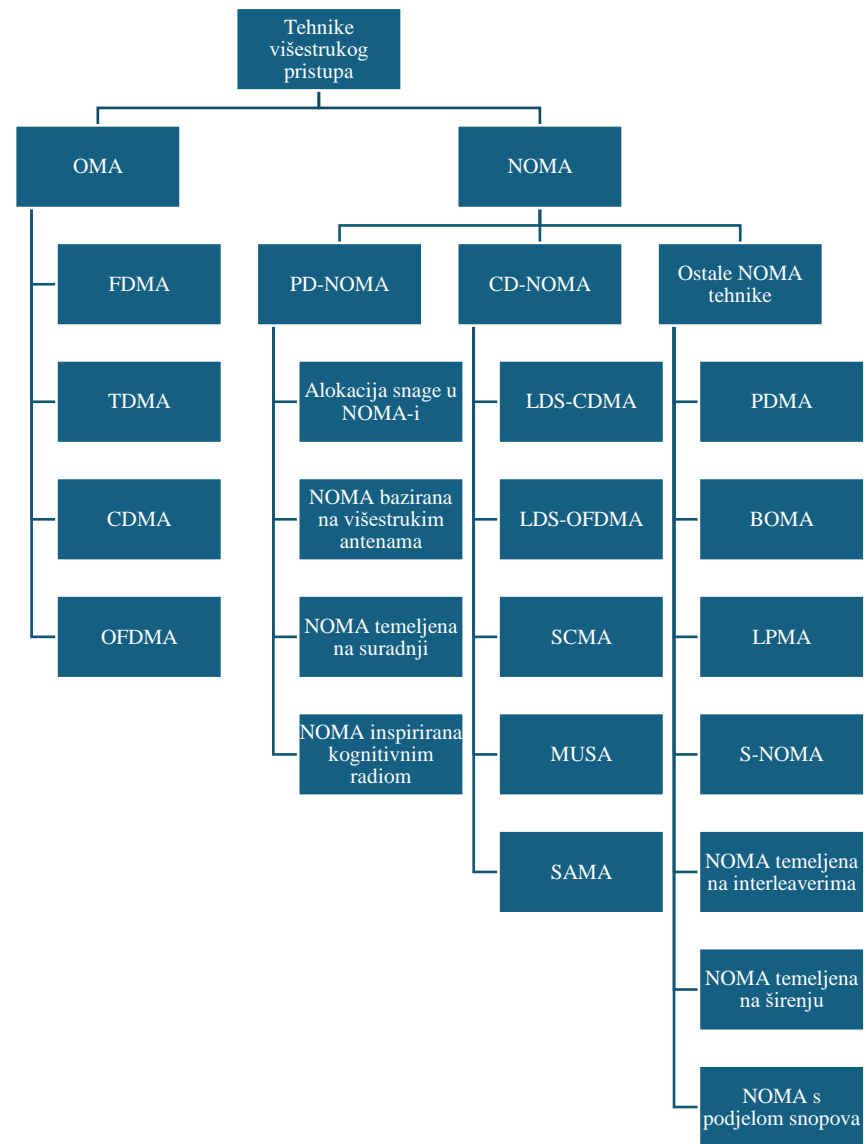
ljudi i strojeva, u bilo kojem trenutku, na bilo kojem mjestu i s bilo kojom uslugom. Omogućava visoku povezanost putem usmjerivača i prekidača te se može koristiti uz žičane i bežične veze. U budućnosti, 5G bi mogao omogućiti brzi prijenos HD filmova i pružiti izuzetno kvalitetne video razgovore, [1], [6].

Uvođenje 5G mreže donosi značajne tehnološke prednosti u vidu većih brzina prijenosa podataka, ultra niske latencije te sposobnosti povezivanja velikog broja uređaja. Vodeći globalni pružatelji 5G usluga u 2023. godini uključuju AT&T, Verizon i T-Mobile u SAD-u, Telefonicu u Španjolskoj, China Mobile u Kini, Deutsche Telekom u Njemačkoj, NTT DoCoMo u Japanu, Orange u Europi, Vodafone Group u Ujedinjenom Kraljevstvu te SK Telecom u Južnoj Koreji. Ove kompanije igraju ključnu ulogu u razvoju i širenju 5G mreža, omogućujući širu primjenu tehnologija poput autonomnih vozila, pametnih gradova, daljinske zdravstvene skrbi i proširene stvarnosti. Širenje 5G tehnologije predstavlja bitan korak prema digitalnoj transformaciji, s brojnim koristima za gospodarstvo i društvo, čime postaje temeljna komponenta modernog tehnološkog okruženja, [7].

5G je još uvijek u razvoju i nedostaju joj standardi, no ima potencijal radikalno promijeniti komunikaciju i povezivanje uređaja, s novom arhitekturom koja uključuje više malih baznih stanica, poboljšanu povezanost i višu kvalitetu usluga, [6].

3. TEHNIKE PRISTUPA KOD MOBILNIH MREŽA RAZLIČITIH GENERACIJA

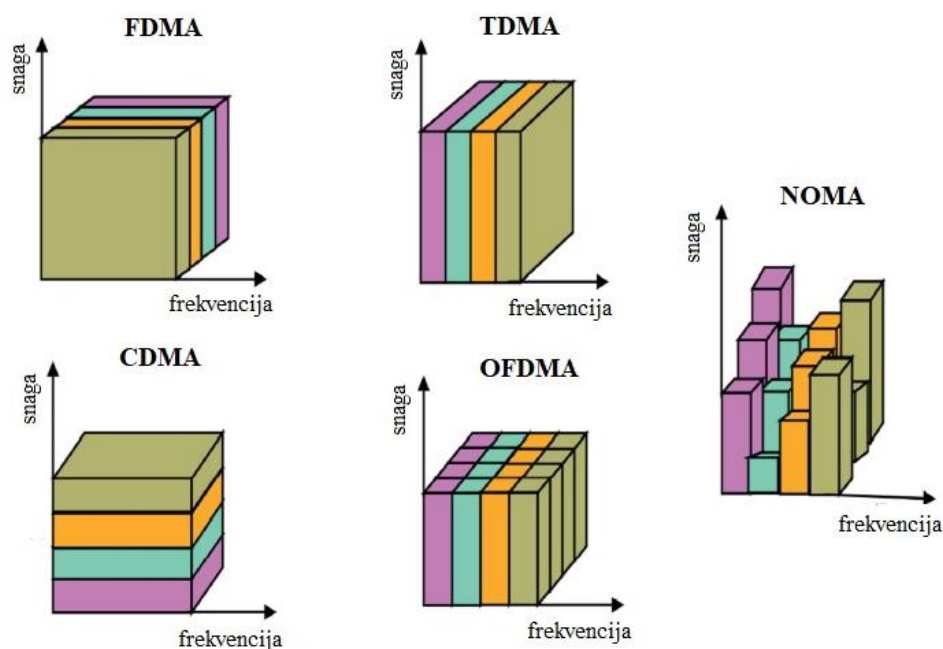
Telekomunikacijska mreža ima ograničene resurse, najčešće mjerene u propusnosti. Kada više korisnika pokuša pristupiti ovoj ograničenoj propusnosti, koristi se tehnika višestrukog pristupa (engl. *multiple access*, MA), kako bi se kontrolirao udio propusnosti među korisnicima, omogućujući svima pristup mrežnim uslugama bez prekomjernog trošenja resursa. Višestruki pristup u komunikacijskim mrežama omogućuje učinkovito dijeljenje ograničenih resursa među korisnicima. Osnovni načini dijeljenja propusnosti, frekvencije i vremenske separacije korišteni su kao početna točka za višestruki pristup. Mobilne radio mreže se razlikuju po načinima rada, uslugama, aplikacijama i tehnikama višestrukog pristupa. Nedostatak dostupnog radio spektra značajno utječe na rast komercijalnih radio komunikacijskih tehnologija, stoga je cilj dodijeliti što više korisnika svakom dostupnom segmentu radio frekvencije. Ovo se postiže korištenjem različitih tehnika višestrukog pristupa koje dijele resurse u smislu vremena, frekvencije ili koda, smanjujući interferenciju među korisnicima. Tehnike višestrukog pristupa mogu se klasificirati kao ortogonalni višestruki pristup (engl. *orthogonal multiple access*, OMA) i neortogonalni višestruki pristup (engl. *non-orthogonal multiple access*, NOMA), [1]. Na slici 1. prikazana je shema tehnika višestrukog pristupa koje su objašnjene u nastavku.



Slika 1. Shema tehnika višestrukog pristupa

3.1. Tehnike ortogonalnog višestrukog pristupa

Tradicionalna metoda višestrukog pristupa, nazvana OMA, omogućuje da više korisnika dijele resurse ortogonalno u odnosu na vrijeme, frekvenciju ili kod. Najčešće OMA tehnike dijele se na tehniku višestrukog pristupa s frekvencijskom raspodjelom (engl. *frequency division multiple access*, FDMA), tehniku višestrukog pristupa s vremenskom raspodjelom (engl. *time division multiple access*, TDMA), tehniku višestrukog pristupa s kodnom raspodjelom (engl. *code division multiple access*, CDMA) i tehniku ortogonalnog višestrukog pristupa s frekvencijskom raspodjelom (engl. *orthogonal frequency division multiple access*, OFDMA). Navedene tehnike korištene su u mobilnim mrežama od prve do četvrte generacije (slika 2.).



Slika 2. Usporedba tehnika višestrukog pristupa

Izvor: [8]

OMA sustavi, iako teoretski bez smetnji zbog ortogonalne dodjele resursa, ograničeni su brojem dostupnih ortogonalnih resursa, što ograničava broj podržanih korisnika. Kanalne smetnje često narušavaju ortogonalnost, čak i uz ortogonalne resurse, što zahtijeva složene mjere za "obnavljanje ortogonalnosti" poput višekorisničkih ekvilajzera. To predstavlja izazov za masivnu povezanost potrebnu za 5G. Također, OMA sustavi ne mogu dosljedno postići maksimalnu ukupnu brzinu koju omogućuju višekorisnički mobilni sustavi, čineći postizanje ekstremne spektralne učinkovitosti i masivne povezanosti za 5G izazovom za OMA, [1].

3.1.1. Tehnika višestrukog pristupa s frekvencijskom raspodjelom

Od početka modernih mobilnih sustava, istraživači su tražili tehnike MA za učinkovito dijeljenje resursa među više korisnika. Višestruki pristup koristi propusnost, frekvenciju i vremensku separaciju za dijeljenje resursa. Prve MA mobilne mreže koristile su frekvencijsku modulaciju (engl. *frequency modulation*, FM) za podjelu frekvencijskog spektra na nekoliko kanala, gdje je svaki kanal dodijeljen jednom korisniku, poznato kao FDMA. FDMA omogućuje korisnicima pristup bez značajne interferencije, a propusnost po korisniku određena je brzinom prijenosa podataka i shemom modulacije. Međutim, FDMA ima ograničenja poput izazovnog dodjeljivanja više nositelja u istom kanalu, preferencije za uskopojasne kanale, potrebe za zaštitnim trakama u frekvencijskoj domeni i ograničenog broja ortogonalnih resursa, [1].

3.1.2. Tehnika višestrukog pristupa s vremenskom raspodjelom

TDMA tehnika, razvijena u digitalnim komunikacijama, dijeli vremensku os na dijelove ili vremenske slotove, od kojih je svaki dodijeljen jednom korisniku za prijenos podataka. Principi rada TDMA tehnike uključuju okvire i višestruke okvire, što omogućuje korisnicima slanje velike datoteke unutar periodičnih vremenskih slotova. Podaci od jednog korisnika uvijek se nalaze u istom vremenskom slotu okvira, tako da se na prijammniku sve informacije iz tog dijela mogu prikupiti i agregirati kako bi se oblikovao izvorni poslani paket. Tijekom prijenosa u TDMA sustavu, svaki odašiljač koristi cijelu širinu pojasa, a bitna stopa sustava određena je stopom kojom korisnici odašilju kad pristupaju kanalu. TDMA je, zajedno s pulsno-kodnom modulacijom (engl. *pulse code modulation*, PCM), postao učinkovit način dijeljenja dostupnih resursa sustava i zadržao svoju dominaciju u žičanim i bežičnim sustavima dugi niz godina. Mnogi standardi druge generacije poput 2G GSM-a i 2.5G GPRS-a usvojili su TDMA kao svoju shemu višestrukog pristupa, [8]. Prednosti TDMA sustava uključuju, [1]:

- brzina prijenosa podataka ne ovisi o broju pristupa
- pojačala snage rade u saturacijskom načinu, povećavajući kapacitet
- veća fleksibilnost zahvaljujući logičkim sklopovima velike brzine
- niži troškovi u odnosu na FDMA zbog jednostavnijeg multipleksiranja i lakšeg povezivanja s terestrijalnim uslugama
- veća tolerancija na interferencijski šum.

3.1.3. Tehnika višestrukog pristupa s kodnom raspodjelom

Kod FDMA i TDMA strategija, broj kanala ili vremenskih slotova je fiksna i svaki kanal je dodijeljen jednom korisniku za cijelo vrijeme komunikacije, što osigurava kvalitetu usluge

za aplikacije u stvarnom vremenu poput glasovne telefonije. Međutim, zbog širenja usluga od govora do prijenosa podataka, fiksna dodjela kanala postaje neučinkovita, posebno s rastom broja korisnika. Zbog toga je razvijen CDMA, temeljen na tehnikama proširenja spektra, koji omogućuje dinamičnu dodjelu kanala bez fiksnih ograničenja. U CDMA sustavu, informacije više korisnika mogu se slati na istom frekvencijskom spektru pomoću različitih nekoreliranih kodova. CDMA omogućuje dodavanje novih korisnika u bilo kojem trenutku, a maksimalni broj korisnika ovisi o ukupnoj snazi interferencije. CDMA je postao glavna tehnika MA za 3G zbog poboljšanja kapaciteta. U CDMA sustavima, više korisnika koristi različite ortogonalne kodove na istom nositelju, a prijenosi su ortogonalni u silaznoj vezi. No, višestruka propagacija može uzrokovati međukorisničko i međusimboličko ometanje, posebno u uzlaznoj vezi zbog različitih vremena propagacije od mobilnih uređaja do bazne stanice, što narušava ortogonalnost kodova. Signal od svakog korisnika ima vrlo nisku snagu i viđen je od drugih kao pozadinska buka, što omogućuje detekciju željenog signala sve dok ukupna snaga buke ostaje ispod praga, [1], [9].

3.1.4. Tehnika ortogonalnog višestrukog pristupa s frekvencijskom raspodjelom

OFDMA se koristi u LTE bežičnim kanalima silazne veze, dijeleći podatke u paralelne podtokove. Kao FDMA, OFDM dijeli širinu pojasa signala na paralelne podnositelje ili uske pojaseve. OFDMA, uz FDMA s jednim nosiocem (engl. *single-carrier* FDMA, SC-FDMA) za uzlaznu vezu, zamjenjuje CDMA u 4G zbog svoje visoke fleksibilnosti, otpornosti na prigušenje kanala, jednostavnosti izjednačavanja i visoke spektralne učinkovitosti, što ga čini idealnim za brzi prijenos podataka.

OFDMA dijeli cijeli frekvencijski pojas u ortogonalne podnositelje. Unatoč svojim prednostima, OFDM ima ograničenja, uključujući visok omjer vršne i srednje snage (engl. *peak to average power ratio*, PAPR), interferencija među nositeljima (engl. *inter-carrier interference*, ICI) i visoku osjetljivost na frekvencijske pogreške. Visok PAPR je manji problem u silaznoj vezi, ali predstavlja izazov u uzlaznoj vezi gdje je trajanje baterije važno. Tehnike smanjenja PAPR-a uključuju selektivno mapiranje i filtriranje.

SC-FDMA, s dodatnim prekodiranjem diskretnom Fourierovom transformacijom (engl. *Discrete Fourier Transform*, DFT) prije OFDM modulacije, razvijen je za smanjenje PAPR-a. Omogućuje visoku brzinu prijenosa podataka u uzlaznoj vezi uz niži PAPR, čineći ga pogodnim za uplink prijenos od strane korisničkih terminala.

Analiza performansi OFDMA sustava uključuje nekoliko ključnih parametara navedenih u nastavku:

1. Stopa pogreške bitova (engl. *Bit Error Rate*, BER): Omjer bitova u pogrešci prema ukupnom broju prenesenih bitova tijekom određenog vremenskog intervala. BER se povećava zbog smetnji, šuma i pogrešaka sinkronizacije, a mjeri se uspoređivanjem poslanih i primljenih signala.
2. Omjer signala i šuma (engl. *Signal to Noise Ratio*, SNR): Odnos energije bita prema spektralnoj gustoći snage šuma. SNR je obrnuto proporcionalan BER-u; viši BER uzrokuje gubitak paketa i smanjuje propusnost, dok viši SNR smanjuje BER. SC-FDMA sustavi pokazuju niži BER u usporedbi s OFDMA sustavima.
3. Vjerojatnost pogreške: Stopa pogrešaka u primljenom signalu, ovisna o gustoći šuma i prosječnoj energiji prenesenog simbola.
4. Spektralna gustoća snage (engl. *Power Spectral Density*, PSD): Raspodjela snage signala u odnosu na frekvenciju, važna za upravljanje radio resursima u bežičnim komunikacijskim sustavima, posebice pri dodjeli modulacije i širine pojasa.
5. Kapacitet ograničen snagom: Kapacitet bežičnog kanala s konstantnom snagom prijenosa ne raste linearno s povećanjem širine pojasa. Za linearni rast kapaciteta potrebna su širokopojasna pojačala visoke snage. Više istovremenih prijenosa na uzlaznoj vezi može maksimizirati ukupni kapacitet.
6. PAPR: Odnos maksimalne trenutne snage i prosječne snage OFDM simbola. Visok PAPR uzrokuje izobličenje i gubitak ortogonalnosti među OFDM podnositeljima.

Ovi parametri ključni su za procjenu učinkovitosti i performansi OFDMA sustava u bežičnoj komunikaciji.

U OFDMA sustavu, ukupni resursi sustava dijele se među korisnicima tako da svaki korisnik dobije dio ukupne širine pojasa. To omogućava istovremeni prijenos podataka od više korisnika na ortogonalnim podnositeljima. Prijenosi ostaju ortogonalni ako je relativno kašnjenje između njih manje od duljine cikličkog prefiksa (engl. *cyclic prefix*, CP), koji traje nekoliko mikrosekundi kako bi se kompenziralo višestruko kašnjenje.

U CDMA sustavima, za postizanje ortogonalnih prijenosa u uzlaznoj vezi potrebna je precizna sinkronizacija na razini subčipa, što je teško postići u praksi. Asinkroni prijenosi u CDMA sustavu uzrokuju međusobno ometanje korisnika. U 3G CDMA sustavima, više korisnika koristi iste kodove s različitim PN (engl. *Pseudo-Noise*) nizovima, što rezultira neortogonalnim prijenosima uzlazne veze, [1].

3.2. Tehnike neortogonalnog višestrukog pristupa

Kako bi se prevladala ograničenja OMA, NOMA se istražuje kao opcija za dizajn 5G mreža. NOMA podržava više korisnika nego broj ortogonalnih resursnih slotova zahvaljujući neortogonalnoj dodjeli resursa. Pri razvoju novih modulacijskih shema za 5G, važno je osigurati kompatibilnost s konvencionalnim OFDM sustavima. Ključne karakteristike novih modulacijskih tehnika uključuju:

1. Visoku spektralnu učinkovitost: Poboljšanje spektralne učinkovitosti smanjenjem zaštitnog pojasa ili vremena, te ograničavanjem propuštanja signala izvan dozvoljenog frekvencijskog opsega između korisnika.
2. Labavi zahtjevi za sinkronizaciju: Podrška za mnoge korisnike, posebno u IoT scenarijima, uz upravljanje asinkronim uvjetima.
3. Fleksibilnost: Prilagodba parametara modulacije za različite zahtjeve korisnika.

Ove karakteristike omogućuju NOMA shemama da poboljšaju spektralnu učinkovitost i kapacitet pristupa u 5G sustavima, [1], [10]. Ključne značajke NOMA-e mogu se sažeti na sljedeći način, [11]:

1. Poboljšana spektralna učinkovitost (engl. *spectral efficiency*, SE): NOMA omogućuje višestrukim korisnicima da dijele svaki resursni blok (engl. *resource block*, RB) (npr. vrijeme, frekvencija, kod), čime se značajno povećava SE.
2. Ultra visoka povezanost: NOMA može podržati masivan broj korisnika unutar jednog resursnog bloka, što je ključno za IoT scenarije s mnogo korisnika koji zahtijevaju niske brzine prijenosa podataka.
3. Opušteni povrat kanala: NOMA ne zahtijeva savršenu povratnu informaciju o stanju kanalu silazne veze na baznoj stanici. Dovoljno je da povratna informacija sadrži samo jačinu primljenog signala.
4. Niska latencija prijenosa: Kod prijenosa na uzlaznoj vezi (engl. *uplink*) NOMA-e, nema potrebe za zakazivanjem zahtjeva korisnika prema baznoj stanici, što omogućava prijenos na uzlaznoj vezi bez odobrenja (*grant-free*) i znatno smanjuje latenciju prijenosa.

NOMA tehnike mogu se klasificirati kao NOMA u domeni snage (engl. *power domain* NOMA, PD-NOMA), NOMA u kodnoj domeni (engl. *code domain* NOMA, CD-NOMA) i druge tehnike višestrukog pristupa NOMA u različitim područjima.

3.2.1. NOMA u domeni snage

NOMA se implementira u domeni snage, gdje se korisnicima dodjeljuju različiti koeficijenti snage prema uvjetima kanala. Nakon kodiranja i modulacije, signali više korisnika se preklapaju i dijele iste resurse vremena-frekvencije. Na prijemnicima, algoritmi poput sukcesivnog otkazivanja smetnji (engl. *sequential interference cancellation*, SIC) prepoznaju ove signale, poboljšavajući spektralnu učinkovitost uz veću složenost prijemnika. NOMA nadmašuje tradicionalne OMA sheme u kapacitetu kanala. Korisnici unutar istog resursnog bloka diferenciraju se po razinama snage, gdje se prijenosna snaga prilagođava za svakog korisnika radi olakšavanja SIC-a.

U silaznoj vezi, bazna stanica šalje superponirani signal s različitim razinama snage za korisnike, osiguravajući pravednost i iskorištavanje raznolikosti. Korisnik s manjim pojačanjem kanala i većom snagom dekodira se prvi, dok se signal drugog korisnika tretira kao šum. Greška u detekciji prvog korisnika utječe na druge korisnike, pa je važno dodijeliti dovoljno snage za njegovu detekciju. Performanse NOMA-e poboljšavaju se kombinacijom s metodama poput masivnog MIMO-a, koordiniranog višepunktnog pristupa (engl. *coordinated multi-point*, CoMP) i kognitivnog radija (engl. *cognitive radio*, CR), [1], [11].

Za razliku od tradicionalnih višestrukih pristupa koji se oslanjaju na vremensku, frekvencijsku ili kodnu domenu, NOMA se realizira u domeni snage. Ovdje se signali različitih korisnika izravno preklapaju nakon kodiranja kanala i modulacije, dijeleći iste vremensko-frekvencijske resurse. Na prijemnicima se ti signali detektiraju pomoću algoritama višekorisničke detekcije (engl. *multiuser detection*, MUD) kao što je SIC, što poboljšava spektralnu učinkovitost uz povećanu složenost prijemnika. Teorija informacija potvrđuje da nenormativno multipleksiranje, koristeći kodiranje superpozicije na odašiljaču i SIC na prijemniku, nadmašuje ortogonalno multipleksiranje i optimalno postiže kapacitetnu regiju kanala u dolaznoj komunikaciji, [12].

NOMA u domeni snage je obećavajuća shema višestrukog pristupa za 5G mreže. Konkretno, verzija NOMA za silaznu vezu, nazvana višekorisnička superpozicijska transmisija (engl. *multiuser superposition transmission*, MUST), predložena je za 3GPP napredne LTE (3GPP-LTE-A) mreže i pokazalo se da može poboljšati kapacitet sustava i korisničko iskustvo. Osnovna načela raznih tehnika povezanih s PD-NOMA uključuju alokaciju snage u NOMA, NOMA baziran na višestrukim antenama, i NOMA temeljen na suradnji, [10].

3.2.1.1. Alokacija snage u NOMA-i

PD-NOMA podržava više korisnika unutar istog vremenskog, frekvencijskog ili kodnog bloka resursa dodjelom različitih razina snage. Za razliku od CDMA ili MIMO sustava koji

imaju različita opažanja na prijemniku, PD-NOMA obično ima jedno opažanje. Snaga signala za svakog korisnika se pažljivo prilagođava kako bi omogućila SIC na prijemniku i osigurala visoku točnost prepoznavanja korisnika s većim snagama. Na prijemniku, korisnik s najboljom CSI se dekodira prvi putem SIC-a, a njegov signal se uklanja iz primljenog signala. SIC prijemnik dekodira signale prema opadajućem redosljediu snage, pri čemu NOMA prilagođava razine prijenosne snage korisnicima na temelju njihovog CSI-a. Korisnicima s lošijom CSI dodjeljuje se više snage kako bi se smanjile smetnje od korisnika s boljom CSI i poboljšala detekcija. Optimizacija prijenosa u NOMA sustavu temelji se na stanju CSI-a, pri čemu se savršena i nesavršena CSI razmatraju zasebno. Kada je CSI dostupan, fokus je na povećanju brzine uz pravednost među korisnicima, dok s prosječnim CSI-om optimizacija teži smanjenju vjerojatnosti prekida signala, [10].

Kod savršene CSI, optimizacija se usmjerava na maksimiziranje individualne ili ukupne brzine uz pravednost među korisnicima. Kod prosječne CSI, cilj je minimizirati maksimalnu vjerojatnost prekida. Glavni izazov u dodjeli snage u NOMA proizlazi iz nekonveksne prirode ograničenja snage, što čini optimizaciju složenom. Daljnja istraživanja potrebna su za optimalan dizajn redosljeda dodjele snage, [11].

3.2.1.2. NOMA baziran na višestrukim antenama

Tehnike s više antena donose dodatnu razinu slobode u prostornoj domeni, poboljšavajući izvedbu NOMA sustava. Nedavno su različite tehnike NOMA temeljenog na više antena privukle pažnju. Za razliku od NOMA temeljenog na jednoj anteni i jednom prijemniku (engl. *single-input-single-output*, SISO), gdje se kanali predstavljaju skalarima, kod višestrukih antena kanali su u obliku vektora ili matrica, što predstavlja izazov u istraživanju.

Dvije glavne kategorije dizajna NOMA tehnika temeljenih na više antena uključuju korištenje jednog vektora za oblikovanje snopa za jednog ili više korisnika. Korištenjem različitih snopova u istom resursnom bloku omogućuje se usmjeravanje snopova prema individualnim zahtjevima korisnika, čime se poboljšava kvaliteta usluge. Višestruke antene u NOMA sustavima donose dodatni stupanj slobode u prostornoj domeni, što povećava složenost korisničkog redosljeda u usporedbi s jednostavnijim SISO NOMA sustavima koji koriste skalarne kanale, [10]. Ova vrsta NOMA sheme s višestrukim antenama predložena je radi optimizacije snage za maksimiziranje ergodičkog kapaciteta i pokazala je značajno poboljšanje performansi u usporedbi s konvencionalnim OMA shemama, [11].

3.2.1.3. NOMA temeljena na suradnji

U mobilnim mrežama korisnici na rubu mreže obično imaju slabiji prijem signala i niže brzine prijenosa podataka u usporedbi s korisnicima bližima baznoj stanici. Tehnike poput

preusmjeravanja i CoMP transmisije koriste se za povećanje brzina prijenosa za korisnike na rubu mreže. Situacija u kojoj korisnici šalju podatke različitim brzinama često se primjenjuje u NOMA. NOMA temeljena na preusmjeravanju koristi korisnike s boljim kanalnim uvjetima kao korisnike koji koriste metodu dekodiraj i proslijedi (engl. *decode-and-forward*, DF) ili pojačaj i proslijedi (engl. *amplify-and-forward*, AF) kako bi poboljšala brzine prijenosa za korisnike s lošijim kanalnim uvjetima.

Predložen je model NOMA koji se temelji na suradnji koji podržava M korisnika u M vremenskih intervala. U prvom vremenskom intervalu provodi se klasični NOMA bez suradnje. U sljedećim intervalima, korisnik s najboljim kanalnim uvjetima služi kao posrednik za korisnika s nešto lošijim uvjetima, i tako redom, kako bi se poboljšale brzine prijenosa.

CoMP transmisija, gdje više baznih stanica zajedno podržavaju korisnike na rubu mreže, može značajno poboljšati performanse tih korisnika, [10], [11], [13].

3.2.1.4. NOMA inspirirana kognitivnim radiom

CR je predložen kao rješenje za problem nedostatka spektra u bežičnim komunikacijama, omogućavajući neovlaštenim korisnicima korištenje licenciranog spektra bez uzrokovanja smetnji licenciranim korisnicima. Ključna tehnika za CR je detekcija spektra, s metodama prilagodbe detekcije i propusnosti CR-a koje su istražene. Kada je neovlašten korisnik udaljen od licenciranog korisnika, smetnje su obično male, pa se CR u ovom slučaju može smatrati specifičnim oblikom NOMA-e u prostornoj domeni.

Komunikacije uređaj-uređaj (engl. *device-to-device*, D2D), također istraživane, mogu se smatrati specijaliziranim CR-om ako se oba korisnika tretiraju kao osnovna CR mreža. Osim prostorne domene, CR može koristiti i prostorno frekvencijsku domenu, [10], [11].

3.2.2. NOMA u kodnoj domeni

CD-NOMA omogućuje višestruke prijenose unutar istog vremensko-frekvencijskog resursnog bloka dodjeljivanjem različitih kodova korisnicima, a temelji se na klasičnim CDMA sustavima. Ključna razlika je da NOMA koristi rijetke ili neortogonalne nizove s niskom međukorelacijom, za razliku od ortogonalnih nizova u CDMA, [12]. Ima određene prednosti u širenju i oblikovanju signala u odnosu na PD-NOMA, ali uz dodatne zahtjeve za propusnost signala. Postojeća rješenja za CD-NOMA uglavnom uključuju raspršivanje niske gustoće kod CDMA (engl. *low-density spreading* CDMA, LDS-CDMA), raspršivanje niske gustoće kod OFDM (engl. *low-density spreading* OFDM, LDS-OFDM) i sparsno kodirani višestruki pristup (engl. *sparse code multiple access*, SCMA). Poboljšani mehanizmi i različiti oblici CDMA uključuju tehniku zajedničkog pristupa za više korisnika (engl. *Multi-User Shared Access*,

MUSA) i tehniku višestrukog pristupa potpomognutu sukcesivnim otkazivanjem smetnji (engl. *Successive Interference Cancellation Aided Multiple Access, SAMA*), [1], [14].

Prednosti CD-NOMA-e uključuju poboljšane performanse detekcije, smanjenu složenost prijemnika i bolju spektralnu učinkovitost, dok kombinacija SIC-a i algoritma prijenosa poruka (engl. *message-passing calculation, MPA*) smanjuje složenost prijemnika, čineći CD-NOMA učinkovitom metodom za podršku masovne povezanosti u 5G mrežama, [1], [10].

3.2.2.1. LDS-CDMA

LDS-CDMA je novi oblik CDMA koji koristi niskopropusne kodove slične niskopropusnim paritetnim provjerama (engl. *low-thickness equality check, LDPC*) za stvaranje kodnih knjiga, omogućujući učinkovito višekorisničko prepoznavanje uz nižu složenost putem MPA algoritma. LDS-CDMA koristi rijetke strukture potpisa, što omogućava višekorisničko otkrivanje niske složenosti, poboljšavajući performanse sustava, [1], [10], [11].

LDS-CDMA je razvijen iz klasičnog CDMA koncepta kako bi ograničio smetnje na svaki čip korištenjem LDS-a, umjesto konvencionalnih nizova proširenja. Performanse LDS-CDMA-a analizirane su u bezmemorijskim Gaussovima kanalima koristeći BPSK (engl. *Binary Phase Shift Keying*) modulaciju, pokazujući da LDS-CDMA može doseći performanse jednog korisnika pri opterećenju do 200 %. Međutim, istraživanje u kanalima s više putanja je još u tijeku jer oni uništavaju LDS strukturu. Predložen je strukturirani pristup dizajniranju LDS kodova, a teorijska analiza kapaciteta LDS-CDMA pokazuje da kapacitet ovisi o gustoći niza proširenja i maksimalnom broju korisnika povezanih sa svakim čipom, pružajući smjernice za praktične dizajne LDS sustava, [12].

U LDS-CDMA sustavu, svi preneseni simboli modulirani su na rijetke nizove proširenja, što znači da svaki korisnik širi svoje podatke samo preko malog broja čipova. To rezultira smanjenjem broja superponiranih signala na svakom čipu, čime se učinkovito smanjuju smetnje između korisnika. Algoritam prijenosa poruka koristi faktorski graf za predstavljanje problema i vraća marginalnu distribuciju svih varijantnih čvorova. Poruke koje se prenose između čvorova predstavljaju pouzdanost varijabli povezanih s vezama, a marginalna distribucija varijantnog čvora ovisi o porukama koje taj čvor prima, [12], [15].

3.2.2.2. LDS-OFDM

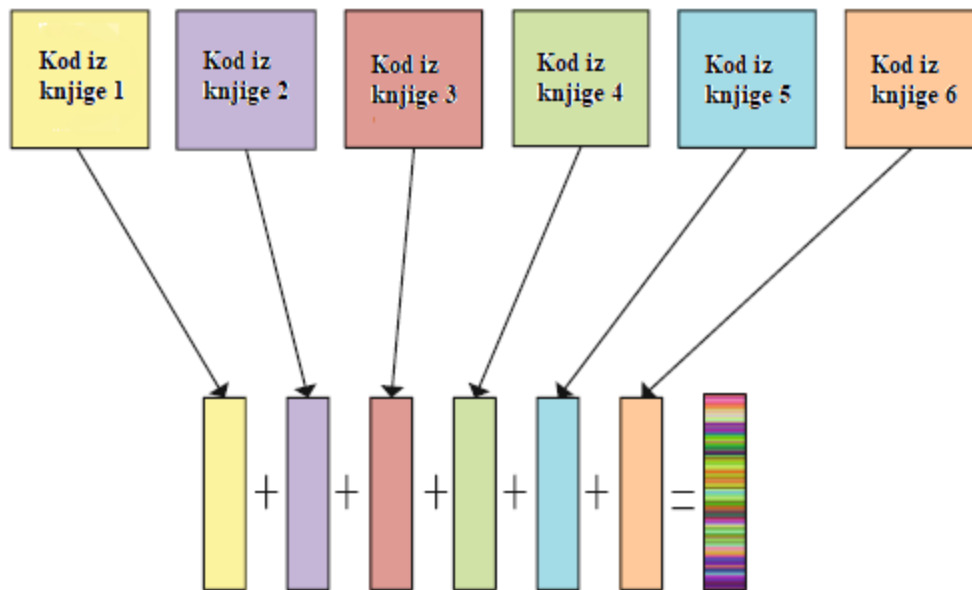
LDS-OFDM kombinira karakteristike LDS-CDMA i OFDM-a, šireći simbol svakog korisnika preko pažljivo odabranog broja podnositelja, što rezultira preklapanjem u frekvencijskoj domeni. U konvencionalnom OFDMA sustavu, svaki podnositelj prenosi jedan simbol, bez međusobnog ometanja zahvaljujući ortogonalnosti podnositelja, što ograničava broj

simbola na broj podnositelja. Nasuprot tome, u LDS-OFDM sustavu, simboli se množe s LDS nizovima i šire preko specifičnih podnositelja, pri čemu svaki podnositelj nosi dijelove različitih simbola. Ovo širenje u frekvencijskoj domeni je korisno u frekvencijski selektiranim kanalima, gdje izbrisani podnositelji utječu samo na dio čipova, omogućujući oporavak originalnih simbola. Algoritmi MUD-a zasnovani na prijenosu poruka, korišteni u LDS-CDMA, također se mogu primijeniti u LDS-OFDM za odvajanje preklapanih simbola na prijemu, [12], [16].

LDS-OFDM koristi OFDM podnositelje za kodiranje, čineći ga pogodnim za širokopojasne kanale i kompatibilnim s OFDM-om. Kao LDS-CDMA, LDS-OFDM koristi MPA za detekciju, ali mapira izlaz potpisa u OFDM podnositelje umjesto CDMA vremenskih uzoraka. Ova metoda omogućava fleksibilnu raspodjelu resursa i poboljšava učinkovitost u širokopojasnim kanalima zahvaljujući prijenosu s više nositelja, [1], [10], [11].

3.2.2.3. SCMA

U SCMA, rijetke kodne knjige omogućuju da više korisnika dijele iste resursne blokove, primjerice šest korisnika može koristiti četiri bloka. Tehnika koristi višedimenzionalne konstelacije za smanjenje složenosti prijema i poboljšanje spektralne učinkovitosti. Nedavna SCMA tehnika, koja se temelji na multipleksiranju u kodnoj domeni iz LDS-CDMA sheme, predstavlja napredak u NOMA shemama, kombinirajući bitne tokove s rijetkim kodnim riječima putem integriranog mapiranja i širenja, čime svaki korisnik koristi vlastitu knjigu kodova (Slika 3.). U literaturi je predstavljen Log-MPA, algoritam prijema poruka u logaritamskoj domeni, koji nudi značajno smanjenje složenosti (preko 50%) u odnosu na standardni MPA, uz zanemarivu degradaciju performansi. Log-MPA značajno smanjuje složenost izračuna uvjetne vjerojatnosti kanala, koja čini do 60% ukupne složenosti. Razvijen je i dinamički algoritam pretraživanja za eliminaciju nepotrebnih izračuna bez gubitka performansi dekodiranja. Za poboljšanje BER-a SCMA, koristi se turbo-princip za razmjenu informacija između SCMA detektora i dekodera kanala te za balansiranje performansi i složenosti kroz iterativnu detekciju i dekodiranje, [11], [12], [17].



Slika 3. Multipleksiranje koda u SCMA

Izvor: [18]

U uzlaznoj vezi SCMA sustava, pristup bez dodjele resursa može se ostvariti dodjelom knjiga kodova i pilota korisnicima, bez potrebe za zahtjevima za raspored što smanjuje latenciju. Korisnicima se dodjeljuju unaprijed konfigurirani resursi nazvani jedinicama prijenosa s konkurencijom (engl. *contention transmission units*, CTU). Ako više korisnika koristi istu CTU, mreža otkriva pakete koristeći sve moguće kodove u toj regiji i primjenjuje nasumični postupak povlačenja u slučaju sudara. Na prijemu se koriste tehnike slijepog detektiranja i kompresivnog senzora za zajedničko otkrivanje aktivnosti i podataka, često uz pomoć zajedničkog algoritma prijenosa poruka (engl. *joint message passing algorithm*, JMPA), [12].

SCMA se može koristiti i u silaznoj vezi za poboljšanje propusnog opsega kroz koncept višekorisničkog SCMA (engl. *multi-user SCMA*, MU-SCMA). U ovoj shemi, bazna stanica spaja korisnike i dijeli prijenosnu snagu među njima, slično NOMA shemama, ali bez potrebe za trenutnom CSI povratnom informacijom. Koncept MU-SCMA proširen je na CoMP u silaznoj vezi u MU-SCMA-CoMP shemu, koja se pokazala robusnom prema mobilnosti korisnika i starenju kanala, [12].

Zbog rijetke strukture matrice širenja i velike minimalne udaljenosti višedimenzionalne konstelacije, SCMA postiže izvrsne performanse detekcije čak i pri preopterećenju resursnih blokova. MPA, koji se koristi u dekodiranju LDPC-a, primjenjuje se u SCMA detekciji i postiže gotovo optimalne performanse uz manju složenost u usporedbi s ML i BCJR algoritmima. Iako

složenost MPA ostaje visoka za uređaje korisnika, SCMA razmatra grupiranje korisnika na temelju CSI-a i dodjeljivanje različitih snaga grupama, što omogućuje korištenje SIC-a za detekciju signala unutar grupa. Kombinacija SIC-a i MPA može značajno smanjiti složenost prijemnika, [11].

SCMA koristi oskudne kodove i višedimenzionalne konstelacije za smanjenje složenosti prijemnika i povećanje spektralne učinkovitosti. SCMA također omogućuje diferencijaciju korisnika unutar istih resursnih blokova putem višedimenzionalnih projekcija i MPA algoritma, [10]. Učinkovitost SCMA potvrđena je simulacijama i prototipiranjem u stvarnom vremenu, koje su pokazale da SCMA može podržati do tri puta više korisnika od broja resursnih slotova, uz održavanje integriteta veze sličnog ortogonalnim prijenosima, [12]. Višedimenzionalne konstelacije omogućuju projekciju konstelacija u potprostore, što smanjuje složenost prijema i poboljšava performanse detekcije, npr. korištenjem rotacije konstelacije i preplitanja za bolje BER performanse u odnosu na jednostavan LDS-OFDM, [11].

3.2.2.4. MUSA

MUSA predstavlja naprednu NOMA shemu koja se temelji na višekanalnom umnožavanju u kodnoj domeni, pružajući poboljšanja u odnosu na klasične CDMA sustave. U MUSA sustavu, u uzlaznoj vezi, simboli korisnika množe se s istim nizom proširenja (ili različitim nizovima za različite simbole), a zatim se prenose preko istih vremensko-frekvencijskih resursa, poput OFDM podnositelja. Sustav može upravljati scenarijima s više korisnika nego što je dostupnih podnositelja, što uzrokuje interferenciju. Na prijemniku se koristi linearna obrada i SIC za odvajanje podataka korisnika prema uvjetima njihovih kanala.

U silaznoj vezi MUSA sustava, korisnici su raspoređeni u grupe. Simboli unutar svake grupe su ponderirani različitim koeficijentima snage i superponirani, dok se ortogonalni nizovi duljine grupe koriste za proširenje tih simboličkih skupina. Svaka grupa koristi isti niz proširenja, dok su nizovi ortogonalni među različitim grupama, omogućavajući eliminaciju interferencija između grupa na prijemniku. Unutar svake grupe, SIC se koristi za obradu međugrupne interferencije koristeći razliku u snazi.

U MUSA sustavu, nizovi širenja trebaju imati nisku međusobnu korelaciju kako bi se omogućilo učinkovito otklanjanje interferencije na prijemniku. MUSA poboljšava kapacitet silazne veze zahvaljujući razlici u SINR-u (engl. *Signal-to-interference-and-noise ratio*) i SIC-u, te osigurava pravednost među korisnicima bez gubitka kapaciteta. Moderni algoritmi proširenja i napredne SIC tehnike omogućavaju značajne dobitke, čak i pri velikom broju korisnika, kao što je prikazano u simulacijama s normalnim opterećenjem korisnika od 300 %, [12], [19].

3.2.2.5. SAMA

U uzlaznoj vezi u SAMA sustavu s većim brojem korisnika u odnosu na ortogonalne OFDM podnositelje, koristi se model sličan MUSA. U SAMA, nizovi širenja imaju nenulirane elemente jednake jedan, a matrica širenja dizajnirana je tako da maksimizira broj grupa s različitim brojem jedinica i minimizira broj preklapljenih nizova s istim brojem jedinica. Na prijemu, algoritam prijenosa poruka razdvaja signale korisnika. Cilj dizajna matrica širenja u SAMA je olakšati obradu interferencija što omogućuje pouzdano određivanje simbola prvog korisnika i pomaže u konvergenciji detekcije simbola za druge korisnike, [12].

3.2.3. Druge tehnike višestrukog pristupa NOMA

Pored multipleksiranja signala u prostoru snage ili kodnom prostoru, neka NOMA rješenja koriste multipleksiranje u različitim domenama kako bi se omogućila veća dostupnost za 5G mreže. Tri dodatna uobičajena NOMA rješenja koja koriste multipleksiranje u više domena su PDMA (engl. *Pattern Division Multiple Access*) koje koristi dijeljenje obrazaca različitih pristupa kako bi se omogućilo višestruko korištenje resursa među korisnicima, BOMA (engl. *Block-Orthogonal Multiple Access*) koja primjenjuje blokove temeljene na rijetkim konstelacijama (engl. *sparse-constellation*) kao gradivnim elementima u simetričnom pristupu za učinkovito iskorištavanje resursa te LPMA (engl. *Layered Permutation Multiple Access*) koji koristi mrežni segment različitih pristupa kako bi se osiguralo bolje iskorištavanje resursa i podržalo više korisnika. Ova rješenja integriraju multipleksiranje u prostorima snage, kodnog prostora i prostornoj domeni kako bi se postigla veća dostupnost i učinkovitost u 5G mrežama, [10]. Alternativne NOMA sheme uključuju i NOMA temeljenu na interleaverima, NOMA temeljenu na proširenju (engl. *Spreading-based NOMA*) te NOMA s podjelom snopova (engl. *beam division multiple access*, BDMA).

3.2.3.1. PDMA

PDMA sustav predstavlja obećavajuću NOMA klasu koja se može primijeniti u različitim domenama. U PDMA, nesimetrični obrasci dodijeljeni su različitim korisnicima za multipleksiranje u kodnoj, i prostornoj domeni te domeni snage, s ciljem postizanja kompatibilnosti s SIC-om. Ovi obrasci omogućuju projektiranje nisko složenog SIC-baziranog MPA za učinkovito višekorisničko prepoznavanje na strani prijemnika. Na strani odašiljača, korisnici u PDMA koriste neortogonalne uzorke za maksimiziranje raznolikosti i minimiziranje korelacija među korisnicima te oskudne matrice oznaka, ali broj resursnih blokova po korisniku može varirati, što omogućuje fleksibilno multipleksiranje, kao u primjeru gdje sedam korisnika koristi tri resursna bloka. PDMA može povećati kapacitet sustava kroz preopterećenje i

omogućava multipleksiranje korisnika u različitim domenama, uključujući snagu i prostor. U kodnoj domeni, PDMA je sličan SAMA. U domeni snage, potrebno je uzeti u obzir skaliranje snage. Prostorni PDMA koristi tehnike s više antena i ne zahtijeva zajedničko predkodiranje, što smanjuje složenost dizajna. Na prijemniku, MPA se koristi za prepoznavanje korisnika unutar iste matrice oznaka, dok se SIC primjenjuje za smanjenje složenosti između različitih grupa u domenama snage i prostora. Integracija detektora s dekoderom dodatno poboljšava izvedbu sustava. Simulacijski rezultati pokazali su da PDMA može postići do 200 % povećanje normaliziranog protoka u uzlaznoj vezi i više od 50% povećanja u silaznoj vezi u odnosu na LTE, [10], [11], [12].

3.2.3.2. BOMA

BOMA poboljšava kapacitet višekorisničkog sustava kombiniranjem podataka korisnika s dobrom CSI s onima s lošijom CSI. Korisnici s lošijom CSI koriste grubu matricu s velikim minimalnim razmakom, dok se mala struktura bloka s korisnicima s dobrom CSI postavlja unutar te matrice. Ako je veličina bloka manja od minimalnog razmaka matrice, performanse prepoznavanja ostaju visoke. BOMA omogućava jednostavnu implementaciju uz minimalne softverske promjene i visoku kompatibilnost s 4G i 5G sustavima, ne zahtijevajući složenu alokaciju snage i SIC prijemnike koji su prisutni u drugim NOMA shemama, [10], [11].

3.2.3.3. LPMA

LPMA kombinira snagu i kodni prostor za višestruko pristupanje korisnicima. Kao i u PD-NOMA, LPMA koristi kompleksni mrežni pristup za dodjelu različitih razina kodova korisnicima s različitim CSI. Koriste se različite vrste kodova, pri čemu korisnici s lošim CSI dobivaju kodove s većim minimalnim udaljenostima za poboljšanje performansi detekcije, dok korisnici s boljim CSI dobivaju kodove s manjim minimalnim udaljenostima bez pogoršanja performansi. Na prijemniku se koristi SIC dekoder, sličan onom u PD-NOMA.

LPMA također primjenjuje multipleksiranje snage za poboljšanje performansi korisnika s lošim CSI. Korištenjem dvaju nivoa slobode (snage i kodnog prostora) u višestrukome pristupanju, dizajn LPMA postaje fleksibilniji u usporedbi s PD-NOMA. Čak i korisnici sa sličnim CSI mogu se multipleksirati promjenom razina dodijeljenih kodova i snage, čime se eliminira potreba za složenim komponentama grupiranja korisnika prisutnim u PD-NOMA shemama, [10], [11].

3.2.3.4. S-NOMA

NOMA rješenja su istraživana kako bi se podržala masovna povezanost u IoT-u s ograničenim brojem resursa. U [20] autori su se fokusirali na tehniku NOMA temeljenu na potpisu (engl. *Siganture-Based* NOMA, S-NOMA) kao potencijalne kandidate za IoT. U S-

NOMA, potpis predstavlja način na koji se podaci aktivnog uređaja šire preko dostupnih resursa na neortogonalan način, što omogućava učinkovit višekorisnički pristup. Potpisi se mogu dizajnirati na temelju različitih struktura kao što su kodne knjige, obrasci kašnjenja, nizovi proširenja, obrasci međuslojanja i nizovi *scramblinga*. Algoritmi za otkrivanje koriste se za dekodiranje podataka svakog uređaja iz neortogonalno superponiranih signala na prijemniku. Simulacije pokazuju da se performanse S-NOMA shema pogoršavaju u impulsivnim šumskim okruženjima, što je značajno za MTC (engl. *Machine-Type communications*) komunikacije.

S-NOMA omogućava visoki faktor preopterećenja koristeći unaprijed definirane potpise za širenje podataka aktivnih uređaja na neortogonalan način. Napredni algoritmi za detekciju aktivnosti i višekorisničku detekciju koriste se za dekodiranje podataka iz superponiranih signala na baznoj stanici, što poboljšava otpornost na višekorisničke smetnje i smanjuje složenost prijemnika, [20].

NOMA sustav temeljen na potpisima, poput pristupa s niskim kodnim omjerom i potpisima (engl. *signature based shared access*, LSSA), predstavlja obećavajuću tehnologiju za 5G. U LSSA sustavu, podaci svakog korisnika multipleksiraju se pomoću specifičnih potpisnih uzoraka, uključujući referentne signale, složene/binarne nizove i permutacijske uzorke kratkog vektora. Svi korisnici dijele istu duljinu vektora, koji može biti nasumično odabran ili dodijeljen od strane mreže. LSSA može imati varijante s više nosilaca za veću frekvencijsku raznolikost i smanjenje latencije te podržava asinkrone uzlazne prijenose, omogućujući baznoj stanici razlikovanje i detekciju preklapljenih signala korisnika unatoč različitim vremenima prijensa, [12].

Slično LSSA, pristup multipleksiranja raspodijeljenih resursa (engl. *resource spread multiple access*, RSMA) koristi jedinstvene potpise za razlikovanje korisnika i širenje njihovih signala preko svih dostupnih vremenskih i frekvencijskih resursa. Ovi potpisi mogu uključivati snagu, kodove za širenje, *interleave* ili njihove kombinacije, te omogućuju korištenje prijavnika za poništavanje interferencije. RSMA se može primijeniti s jednim nositeljem koji je optimiziran za nisku potrošnju energije i proširenje proračuna veze, koristi modulacije s niskim PAPR-om i omogućuje prijenos bez odobrenja i asinkroni pristup. S druge strane, može se primijeniti i RSMA s više nositelja koji su optimizirani za nisku latenciju i omogućuje prijenose bez odobrenja, [12].

3.2.3.5. NOMA temeljena na interleaverima

Multipleksiranje temeljen na interleaverima s mrežnim rasporedom (engl. *Interleave-grid multiple access*, IGMA) koristi različite interleavere i obrasce mrežnog mapiranja za razlikovanje korisnika na razini bita. Ova shema omogućuje skalabilnost u podršci različitim

gustoćama povezivanja i balansira dobitak od kodiranja kanala s prednostima rijetkog mapiranja resursa.

Struktura odašiljača IGMA može uključivati kodiranje kanala i mrežno mapiranje. Kodiranje kanala uključuje jednostavno ponavljanje kodiranja umjerenog kodnog omjera za klasičnu korekciju grešaka (engl. *forward error correction*, FEC) ili FEC niske brzine. Mrežno mapiranje može varirati od rijetkog mapiranja temeljenog na nulti popunjavanju, tehnici u kojoj se određeni dijelovi signala postavljaju na nulu, do preplitanja na razini simbola. Preplitanje na razini simbola može pomoći u borbi protiv selektivnog slabljenja frekvencije i interferencije između ćelija, dok rijetki obrasci mrežnog mapiranja mogu smanjiti složenost detekcije. IGMA omogućuje primjenu niskokompleksnih MUD-ova i pruža fleksibilnost za optimizaciju performansi u različitim uvjetima.

Multipleksiranje temeljeno na podjeli *interleaver* s (engl. *interleave-division multiple access*, IDMA) predstavlja shemu koja prepliće čipove nakon što su simboli pomnoženi sa nizovima za širenje, čime se učinkovito stvara CDMA s preplitanjem na razini čipa. U usporedbi s CDMA, IDMA postiže približno 1 dB dobitka u sustavima s visokim opterećenjem i normalnim korisničkim opterećenjem od 200 %. Ova prednost uglavnom proizlazi iz povećanja dobitka od raznolikosti koje donosi preplitanje na razini čipa u usporedbi s konvencionalnim preplitanjem na razini bita, [12].

3.2.3.6. NOMA temeljenu na širenju

NOMA sheme temeljene na kodovima za širenje uključuju višestruki pristup s neortogonalnim kodovima (engl. *non-orthogonal coded multiple access*, NCMA), koji koristi neortogonalne kodove za proširenje s niskom korelacijom, dobivene rješavanjem problema pakiranja Grassmannove linije. NCMA može povećati propusnost i poboljšati povezanost uvođenjem dodatnih slojeva putem kodiranja superpozicije, uz održavanje niske stope grešaka u blokovima. Prijamnik koristi paralelnu eliminaciju smetnji, čime se postiže skalabilna izvedba u odnosu na složenost. NCMA je posebno prikladan za masovnu komunikaciju strojnog tipa (engl. *massive machine-type communication*, mMTC) i smanjenje vjerojatnosti sudara u pristupu temeljenom na natjecanju.

Neortogonalni kodirani pristup (engl. *non-orthogonal coded access*, NOCA) je shema multipleksiranja temeljena na proširenju, gdje se podatkovni simboli proširuju koristeći neortogonalne nizove prije prijenosa. Ovaj pristup može se primijeniti u frekvencijskoj i vremenskoj domeni. U osnovnoj strukturi odašiljača faktori proširenja i nizovi proširenja za svakog korisnika koriste se za pretvaranje izvornih moduliranih podatkovnih nizova u paralelne

nizove. Svaka od tih nizova se zatim širi preko brojnih podnositelja. Adaptivno mijenjanje faktora proširenja omogućava prilagodbu različitim scenarijima primjene, [12].

3.2.3.7. NOMA s podjelom snopova

Predložena je nova tehnika višestrukog pristupa, BDMA, koja poboljšava kapacitet i podržava veći broj korisnika u 5G sustavima. BDMA koristi antene s faznim nizom i tehnologiju usmjeravanja snopova za stvaranje više tankih snopova koji omogućuju višestruki pristup korisnicima, čime se povećava kapacitet sustava. Postupak BDMA uključuje:

1. Detekcija i prijenos informacija: Mobilna stanica detektira svoju poziciju i brzinu, zatim te podatke šalje baznoj stanici.
2. Generiranje i usmjeravanje snopova: Bazna stanica koristi ove informacije za izračunavanje i generiranje silaznog snopa prema mobilnoj stanici te zatim usmjerava uzlazni snop natrag prema baznoj stanici.
3. Praćenje i usmjeravanje: Bazna stanica periodično prima informacije o kretanju mobilne stanice i prilagođava usmjerenje snopa kako bi održala kvalitetnu komunikaciju.

U slučaju da su mobilne stanice blizu jedna drugoj, mogu dijeliti jedan snop koristeći multipleksiranje s podjelom vremena. BDMA može pomoći u rješavanju problema degradacije signala za korisnike na rubu ćelije i poboljšati ukupnu učinkovitost komunikacije u 5G mrežama, [10].

4. ANALIZA ZNAČAJKI TEHNIKA VIŠESTRUKOG PRISTUPA U 5G MOBILNOJ MREŽI

4.1. Značajke 5G mobilne mreže

Za optimalan učinak 5G bežičnih mreža, identificirani su ključni zahtjevi uključujući: brzinu prijenosa podataka koja treba dostići vršne brzine od 10 Gbit/s (uzlazni kanal) i 20 Gbit/s (silazni kanal), što je deset puta više od LTE mreža; kašnjenje koje treba biti manje od 1 ms, poboljšavajući trenutnih 10 ms u 4G mrežama; širinu pojasa koja mora biti tisuću puta veća po jedinici površine kako bi podržala veliki broj uređaja; korištenje energije, gdje se očekuje stotruka energetska učinkovitost uz implementaciju zelenih tehnologija za smanjenje potrošnje; trajnost baterije koja treba trajati do deset godina; masovnu povezanost koja omogućava povezivanje milijardi uređaja za podršku IoT tehnologijama; dostupnost mreže koja treba biti potpuna bez obzira na lokaciju; iskustvenu kvalitetu usluga koja treba poboljšati korisničko zadovoljstvo; te sigurnost s višim standardima u autentifikaciji, autorizaciji i bilježenju aktivnosti, [1].

5G je napredna bežična komunikacijska tehnologija za mobilne mreže koja nudi poboljšanu pokrivenost, ultra-pouzdanu nisku latenciju, visoke brzine prijenosa podataka, masovnu povezanost i bolju podršku mobilnosti. Poboljšana pokrivenost predstavlja glavni izazov, jer povećanje broja baznih stanica može uzrokovati smetnje između korisnika na rubu ćelije, negativno utječući na ukupnu pokrivenost. Istraživanje tehnika za poboljšanje pokrivenosti ključno je za unapređenje sustava, uključujući propusnost, kapacitet, spektralnu učinkovitost, vjerojatnost prekida, brzine prijenosa podataka i latenciju. S porastom upotrebe bežičnih uređaja i korištenja podataka, 5G tehnologija nastoji zadovoljiti ove potrebe uvodeći optimizirane i poboljšane usluge, suočavajući se s izazovima visokih brzina prijenosa podataka, izuzetno pouzdana komunikacija s niskom latencijom (engl. *ultra-reliable low-latency communication*, URLLC), visoke povezanosti, veće propusnosti i bolje podrške mobilnosti, [21].

Trenutne tehnologije poput LTE (4G) nemaju dovoljno kapaciteta za podršku velikom broju novih uređaja na tržištu, zbog čega je 5G mobilni sustav ključan za budućnost. 5G će omogućiti brojne primjene, uključujući povezivanje automobila, industrijsku automatizaciju i daljinske operacije, pružajući značajna poboljšanja u brzini, kapacitetu, pouzdanosti i energetske učinkovitosti. Konkretno, 5G će omogućiti prijenos podataka 10 do 100 puta brži, podržavati oko 50 milijardi povezanih uređaja, omogućiti 1000 puta veću količinu podataka, smanjiti potrošnju energije za 10 % i produžiti trajanje baterije 10 puta. Smanjit će kašnjenje na oko 1 ms i podržati 3000 uređaja po pristupnom čvoru s kapacitetom od 36 TB mjesečno po korisniku. 5G će koristiti široki raspon frekvencijskih pojaseva i napredne tehnologije antena poput MIMO za poboljšanje performansi i smanjenje potrošnje energije. S obzirom na ograničenost trenutnih shema višestrukog pristupa (FDMA, TDMA, OFDMA), za 5G će biti potrebne nove sheme koje mogu povećati kapacitet sustava, [10].

U posljednjih nekoliko godina, bežične mreže pete generacije (5G) privukle su značajnu istraživačku pažnju. Prema 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), 5G mreže trebale bi podržavati tri glavne kategorije aplikacija: poboljšane mobilne širokopojasne komunikacije (engl. *enhanced mobile broadband*, eMBB), mMTC i URLLC. Također, poboljšane komunikacije vozilo-sve (engl. *enhanced vehicle-to-everything*, eV2X) smatraju se važnom uslugom koju bi 5G mreže trebale podržavati.

eMBB je arhitektura koja nudi visok brzi pristup Internetu s velikim propusnim opsegom i umjerenom latencijom. Omogućuje UltraHD *streaming* video sadržaja, te podržava medije virtualne stvarnosti i proširene stvarnosti, kao i brojne druge usluge. mMTC, predstavljena u 13. specifikaciji 3GPP-a, omogućuje dugometražnu i povoljnu komunikaciju

između uređaja s niskom potrošnjom energije. mMTC u 5G pruža visoke brzine prijenosa podataka, proširenu pokrivenost i smanjenu složenost uređaja, podržavajući IoT aplikacije kroz mobilne operatore. Ova tehnologija omogućuje masivne komunikacije između strojeva, poznate kao IoT, koje povezuju brojne uređaje bez ljudske intervencije, poboljšavajući primjenu 5G u poljoprivredi, građevinarstvu i industriji.

URLLC pruža nisku latenciju i visoku pouzdanost, nadmašujući mogućnosti tradicionalnih mreža i omogućujući naprednu kvalitetu usluge. Ova tehnologija posebno je dizajnirana za aplikacije u stvarnom vremenu, uključujući daljinsku kirurgiju, komunikaciju između vozila, industriju 4.0, pametne mreže i inteligentne transportne sustave. Omogućuje učinkovito upravljanje strojevima, brzu povezanost vozila, industrijsku povezanost, visoku sigurnost u transportu, kao i autonomne operacije poput daljinske medicinske skrbi i operacija [22]. 5G, s frekvencijama od 24 do 100 GHz, pruža fleksibilnu internetsku vezu za brojne uređaje, omogućujući razvoj pametnih kuća, škola, laboratorija, automobila i centara za zdravstvenu skrb. Kako bi se zadovoljili ovi zahtjevi, istražuju se nove sheme modulacije i tehnike višestrukog pristupa.

Kako bi se zadovoljili ključni parametri 5G-a i budućih generacija, predložene su nove tehnologije: milimetarski valovi (mmWave) za velike propusnosti, MIMO za masivnu povezanost, te eMBB za visoke brzine prijenosa podataka i nisku latenciju, [21].

5G se dijeli na dva glavna dijela: 6 GHz 5G i milimetarsku valnu 5G. 6 GHz nudi uravnotežen kapacitet i pokrivenost, pružajući visoki propusni opseg i poboljšane performanse mreže s kontinuiranim kanalima, što smanjuje potrebu za dodatnom gustoćom mreže. mmWave, s druge strane, omogućuje vrlo brzu bežičnu komunikaciju i ultra-široki propusni opseg, što je ključno za izgradnju visokoučinkovitih 5G mreža. Obe tehnologije su bitne za implementaciju 5G, s 6 GHz pružajući širu pokrivenost, dok mmWave nudi vrhunski kapacitet i brzinu, [22].

Međunarodna telekomunikacijska unija identificirala je frekvencijske opsege za međunarodne mobilne telekomunikacije iz mmWave opsega i dodatne opsege za 5G implementaciju na Svjetskoj konferenciji o radiokomunikacijama 2019 (WRC-19), ukupno 17,25 GHz spektra. Frekvencijski opsezi koje je odredio 3GPP za 5G su frekvencijski raspon 1 (FR1) od 450 MHz do 6 GHz i frekvencijski raspon 2 (FR2) od 24,25 GHz do 52,6 GHz. FR1 uključuje opsege n78 (3,3 GHz – 3,8 GHz), n79 (4,4 GHz – 5,0 GHz) i n77 (3,3 GHz – 4,2 GHz), dok FR2 uključuje n256 (24,25 GHz – 27 GHz), n257 (26,6 GHz – 29 GHz), n260 (37 GHz – 40 GHz) i n261 (27 GHz – 28 GHz). FR1 koristi TDD (engl. *time-division duplexing*) i FDD (engl. *frequency-division duplexing*) načine, dok FR2 koristi samo TDD. Maksimalna

frekvencija nositelja za FR1 je 100 MHz, a za FR2 je 200 MHz i 400 MHz, s razmakom između podnositelja od 15 kHz do 240 kHz. Frekvencijski opsezi milimetarskih valova suočavaju se s velikim slabljenjem signala zbog svojih kanalnih uvjeta i visokog gubitka na putu, što pogoršava kvalitetu signala.

Iako buduće mobilne mreže zahtijevaju visoke brzine prijenosa podataka, poboljšanu pokrivenost, veću propusnost, bolju povezanost i masivnu mobilnost, ovi zahtjevi se ne mogu ispuniti bez adekvatne kvalitete signala. mmWave signali, koji putuju na visokim frekvencijama, sudaraju se s preprekama, što uzrokuje gubitak energije signala. Zbog nižih gubitaka penetracije, mmWave signali mogu putovati samo na kraćim udaljenostima, što rezultira manjim područjem pokrivenosti u usporedbi s konvencionalnim frekvencijskim opsezima. Stoga, pokrivenost predstavlja jedan od najvećih izazova za buduće mobilne mreže, [21].

4.2. Implementacija NOMA sustava u 5G

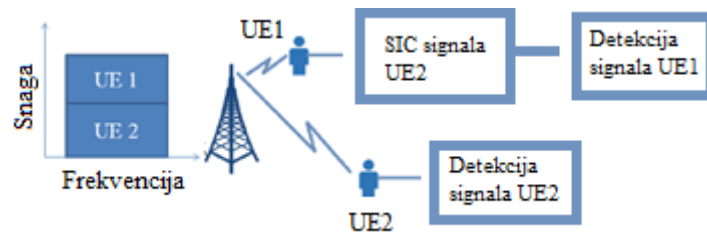
Konvencionalne tehnike višestrukog pristupa neće zadovoljiti buduće izazove 5G-a, kao što su visoke brzine prijenosa podataka, niska latencija, masivna povezanost i visoka spektralna učinkovitost. S povećanjem broja korisnika mobilnih mreža, složenost prijemnika raste. Međutim, tehnike NOMA mogu smanjiti tu složenost, omogućujući dodjelu više korisnika jednom resursnom bloku i dekodiranje korisnika na prijemu. Ova metoda poboljšava stopu grešaka na bitovima, propusnost i kapacitet sustava. Tehnologija D2D također smanjuje složenost sustava, pruža sigurnost od zlonamjernih korisnika i poboljšava pouzdanost. Širina pojasa mobilne mreže može se povećati korištenjem tehnika agregacije nositelja (engl. *carrier aggregation*, CA). Masivni MIMO u 5G-u i izvan njega nudi dodatne mogućnosti i izazove, [21].

NOMA je tehnologija koja se koristi u jednoj ćeliji za poboljšanje spektralne učinkovitosti povećanjem broja korisnika koji istovremeno koriste jedan kanal s različitim dobitnicima kanala. NOMA se dijeli na dva osnovna tipa: NOMA u domeni snage (PD-NOMA), gdje je višestruki pristup temeljen na prenesenoj snazi, i NOMA u kodnoj domeni (CD-NOMA), gdje je pristup temeljen na kodu. Osim ovih, postoje i druge NOMA tehnike opisane u poglavlju 3.2.3. NOMA se integrira s tehnologijama poput MIMO-a, kognitivnog radija, HetNets-a, milimetarskih valova i računarstva na rubu mobilne mreže, kako bi se poboljšala spektralna učinkovitost, postigle velike brzine prijenosa i omogućila masovna povezanost uz smanjenje ometanja. Energetska učinkovitost se postiže dodjeljivanjem manje snage korisnicima s jakim kanalima i više snage korisnicima sa slabijim kanalima. Iako se NOMA može implementirati s

jednom ili više ćelija, višćelijska implementacija može uzrokovati dodatne probleme. Integracija NOMA-e u 5G i šire donosi izazove kao što su raspodjela resursa, uparivanje, dekodiranje, sigurnost i signalizacija, no ovi problemi mogu se riješiti optimizacijskim i analitičkim tehnikama, teorijom igara i algoritmima strojnog učenja. Iako NOMA tehnologija nudi mnoge prednosti, suočava se s nekoliko ključnih izazova koji trebaju biti riješeni kako je navedeno u [21]:

- Uparivanje korisnika: S rastućom potražnjom za povezanim uređajima, potrebno je razviti nove tehnike za uparivanje velikog broja korisnika unutar jednog RB-a). Također, praktična implementacija uparivanja u NOMA sustavima treba biti unaprijeđena.
- Složenost prijemnika: Kako se broj korisnika u NOMA sustavima povećava, složenost u raspodjeli snage i dekodiranju signala pomoću SIC prijemnika raste. Ovo može uzrokovati povećanje latencije i smetnje, što predstavlja izazov za smanjenje tih problema i razvoj učinkovitih SIC prijemnika.
- Sustavi s više ćelija: Rješavanje problema međusobnih smetnji između ćelija, osobito za slabije korisnike na rubovima ćelije, predstavlja izazov. Integracija malih ćelija iz 5G mreža u višestanične NOMA sustave može pomoći u rješavanju ovih problema.
- Mobilnost korisnika: Trenutna istraživanja često se baziraju na statičkim korisnicima, dok bi buduće komunikacije zahtijevale dinamične algoritme za raspodjelu snage, uparivanje i SIC. Potrebno je razviti algoritme koji uzimaju u obzir varijacije u dobitku kanala zbog mobilnosti korisnika.
- Procjena CSI-ja: Većina istraživanja pretpostavlja savršen CSI, dok je u stvarnosti CSI često nesavršen. Razvijanje metoda za procjenu CSI, uključujući algoritme strojnog učenja i teoriju igara, ključno je za poboljšanje učinkovitosti i spektralne učinkovitosti NOMA sustava.

Korištenjem principa korisnika s visokim i niskim dobitkom, NOMA povećava propusnost i spektralnu učinkovitost smanjenjem ometanja putem SIC-a. SIC prijemnik je ključni element NOMA prijenosa prikazan na slici 4. Kvaliteta detekcije signala najsnažnijeg korisnika postiže se oduzimanjem signala ostalih korisnika. Slabiji korisnici detektiraju svoj signal na sličan način, uzimajući u obzir buku ili ometanje, čime se poboljšavaju performanse sustava. Međutim, implementacija SIC-a u NOMA sustavima donosi sigurnosne izazove, uključujući pitanja dodjele resursa, signalizacije i sigurnosti, koja se razmatraju u sljedećim pododjeljcima.



Slika 4. NOMA sa SIC-om [21]

Dodjela resursa u NOMA sustavima može se modelirati prema klasičnim strukturama usklađivanja: jedan-na-jedan, mnogo-na-jedan i mnogo-na-mnogo. U modelu jedan-na-jedan, svaki korisnik iz jednog skupa može se uskladiti s najviše jednim korisnikom iz suprotnog skupa, što se koristi za optimizaciju parova korisnika i poboljšanje propusnosti sustava. U mnogo-na-jedan modelu, koristi se za dodjelu spektra u heterogenim mrežama, omogućava se operaciju zamjene kako bi mala bazna stanica bila usklađena s odgovarajućim blokom resursa, čime se maksimizira broj korisnika malih ćelija. Model mnogo-na-mnogo omogućuje da barem jedan korisnik iz jednog skupa bude usklađen s više korisnika iz suprotnog skupa, a koristi se za formulaciju dodjele podkanala s ciljem maksimiziranja ukupne brzine sustava, [12].

SE i energetska učinkovitost (engl. *energy efficiency*, EE) su ključni pokazatelji performansi u dizajnu 5G mreža. NOMA nudi poboljšanja u SE zbog svoje slobode u domeni snage, što je posebno korisno za IoT mreže koje zahtijevaju masivnu povezanost uz nisku potrošnju energije. Osim toga, istražena je i EE u NOMA mrežama, gdje je predložen sub-optimalan algoritam za alokaciju resursa radi maksimiziranja EE sustava. U NOMA mrežama, SE i EE se ne mogu postići istovremeno, što ukazuje na potrebu za daljnjim istraživanjima o kompromisima između njih, [11].

4.2.1. Problemi s dodjelom resursa u NOMA sustavu

U NOMA-u, jedan RB se koristi za više korisnika, a SIC prijemnik dekodira informacije na temelju dobitka kanala korisnika. Da bi se izbjeglo ometanje, potrebno je primijeniti odgovarajuće algoritme za dodjelu snage. Problemi s dodjelom resursa uključuju uparivanje korisnika i dodjelu snage (engl. *power allocation*, PA). U uparivanju korisnika, korisnici s većim dobitkom kanala dobivaju manju snagu, dok korisnici s manjim dobitkom kanala dobivaju veću snagu, čime se nastoji postići pravednost. Međutim, kako broj korisnika raste, složenost dekodiranja također se povećava. Također, ako se korisnici s visokim i niskim dobitkom kanala transformiraju u korisnike srednjeg dobitka, to može smanjiti kapacitet kanala zbog neprikladnog uparivanja korisnika srednjeg dobitka.

Kako bi se riješili problemi s uparivanjem korisnika u NOMA-u, predložene su različite metode optimizacije, teorija igara i algoritmi strojne obrade. Metode optimizacije, kao što je algoritam CSS-PA (engl. *channel pairing algorithm*), fokusiraju se na uparivanje korisnika tako da dobitak kanala bude iznad određene granice, čime se poboljšava kapacitet i pravednost. Drugi pristup uključuje uparivanje korisnika s najvišim dobitkom kanala s onima s sljedećim najvišim dobitkom, što pomaže u ravnoteži. Teorija igara i algoritmi strojne obrade također se koriste za poboljšanje uparivanja i dodjele resursa, smanjujući probleme s kapacitetom i pokrivenošću u 5G mrežama, [21].

4.2.2. Problemi s dodjelom snaga u NOMA sustavu

U shemi dodjele snage u NOMA-u, korisnici s većim dobitkom kanala dobivaju manju snagu, dok oni s manjim dobitkom primaju veću snagu. Ova strategija omogućava veću učinkovitost sustava, ali neučinkovite metode dodjele snage mogu uzrokovati ometanje i smanjiti performanse. Pravilna selekcija metoda dodjele snage ključna je i ovisi o parametrima kao što su CSI, QoS (engl. *quality of service*), ukupna snaga sustava i uvjeti kanala. Predložene su različite tehnike optimizacije, uključujući maksimiziranje brzina prijenosa korištenjem QoS, minimiziranje potrošnje energije, te maksimiziranje kapaciteta i ukupne snage. Također su razmatrane metode temeljene na teoriji grafova i algoritmi optimizacije kao što je simulirano žarenje i aukcijski dizajn igre za dodjelu snage. Probleme s nedostatkom spektra u licenciranim i nelicenciranim pojasevima također su raspravljali istraživači.

Problemi zajedničke PA i uparivanja korisnika u NOMA-u rješavaju se različitim algoritmima optimizacije. Pohlepni algoritam (engl. *greedy algorithm*) koristi se za identifikaciju najboljih multipleksiranih korisnika, dok algoritam optimizacije pomaže u optimizaciji PA. Metode za optimizaciju PA i uparivanja korisnika usmjerene su na maksimiziranje prenesene snage i smanjenje složenosti sustava. Proporcionalno pošten (engl. *proportional fair*) algoritam raspoređivanja koristi se za smanjenje složenosti sustava s jednim kanalom. Dinamički PA sustav optimizira PA u uzlaznoj i silaznoj vezi za maksimiziranje propusnosti sustava. Metoda s faktorom frakcijskog pogreške poboljšava energetske učinkovitost i performanse korisničke opreme. Algoritam optimizacije rojeva (engl. *swarm optimization algorithm*) pomaže u pronalaženju stope prekida i prosječne brzine prijenosa svih korisnika.

Korištenjem metode uparivanja korisnika temeljene na sortiraju poboljšana je spektralna učinkovitost i smanjena vjerojatnost pogrešaka, čime se maksimizira kapacitet sustava i smanjuje ometanje. Dinamičko variranje uparivanja korisnika i dodjele snage

omogućilo je bolji kapacitet za uparene korisnike u usporedbi s pojedinačnima. Također, uzimanje u obzir BER-a zajedno s kapacitetima korisnika poboljšava performanse. Različiti algoritmi za dodjelu snage i zajedničko uparivanje korisnika predloženi su kako bi se riješili problemi pokrivenosti i kapaciteta u 5G mrežama, [21].

4.2.3. Problemi sa signalizacijom u NOMA sustavu

S porastom broja korisnika u 5G mrežama, učinkovito iskorištavanje spektra postaje ključno. NOMA je predložena za poboljšanje spektralne učinkovitosti tako da omogućuje dodjeljivanje više korisnika jednom RB. Međutim, ovo dovodi do problema sa signalizacijom kao što su nesavršenosti u CSI-ju, latencija, složenost SIC prijamnika i upravljanje smetnjama.

Koncept SIC-a u NOMA-i koristi se za dekodiranje signala uparenih korisnika na prijamniku, no njegova implementacija je složena, posebno pri visokim snagama. Performanse NOMA-e ovise o karakteristikama SIC-a, uključujući složenost prijamnika, redoslijed dekodiranja i nesavršenu procjenu kanala. Ako redoslijed dekodiranja ne odgovara slijedu multipleksiranih korisnika, može doći do nesavršenog SIC-a, što zahtijeva ponavljanje procesa dekodiranja i dodatno vrijeme za ispravnu obradu podataka. Mnogi autori u literaturi primjenjuju optimizacijske i analitičke tehnike kako bi riješili ove izazove.

Kako bi se izbjegle nesavršenosti u SIC-u, predloženi su različiti optimizacijski algoritmi, kao što je učinkoviti algoritam za alokaciju snage u MC-NOMA (engl. *multi-carrier NOMA*) koji koristi komplementarno geometrijsko programiranje (engl. *Complementary Geometric Programming*, CGP) i aproksimaciju aritmetičko-geometrijske sredine (engl. *arithmetic geometric mean approximation*, AGMA) za optimizaciju ukupne snage. Također, u literaturi je predložen dvostupanjski algoritam za rješavanje nekonveksnih problema alokacije resursa u NOMA-i, koji uključuje optimizaciju rasporeda korisnika pomoću algoritma teorije podudaranja (engl. *matching theory algorithm*) i tehnike grananja i ograničavanja (engl. *branch and bound technique*) za alokaciju snage. Predstavljen je i algoritam sukcesivne konveksne aproksimacije (engl. *successive convex approximation*) za optimizaciju ukupne brzine u MIMO-NOMA sustavu, maksimizirajući ukupnu brzinu i korisnost sustava putem iteracija i SNR-a. Optimizacija ukupne brzine u NOMA sustavima odnosi se na postupak poboljšanja ukupne brzine prijenosa podataka unutar mreže koja koristi NOMA tehnologiju. Iterativni algoritam za alokaciju snage omogućuje postizanje maksimalne ponderirane ukupne brzine u NOMA sustavu, [21].

Analitičke tehnike za rješavanje problema signalizacije u NOMA mrežama, poput vjerojatnosti izvanrednog stanja i CSI, obrađene su u nekoliko radova. U [23], predložen je

dinamički SIC prijammnik koji koristi primljenu snagu korisnika za teoretsku procjenu vjerojatnosti izvanrednog stanja i statistički analizira CSI za poboljšanje vjerojatnosti izvanrednog stanja. U [24], predstavljen je novi algoritam dekodiranja za SIC prijammnik, čija je izvedba u slučajevima izvanrednog stanja analitički potvrđena.

Većina istraživanja u NOMA mrežama pretpostavlja savršeni CSI na prijammniku, no stvarnost uključuje nesavršeni CSI, što uzrokuje računalnu složenost, prekomjernu signalizaciju i kašnjenje u povratnim informacijama. Da bi se prevladali ovi problemi, predložene su optimizacijske i analitičke metode koje poboljšavaju vjerojatnost izvanrednog stanja i smanjuju broj povratnih bitova (engl. *feedback bits*). Optimalna shema za alokaciju snage koristi se za poboljšanje ukupne stope prijenosa, dok se minimalna vjerojatnost izvanrednog stanja postiže smanjenjem brzine povratnih informacija. Različiti algoritmi su predloženi za optimizaciju dinamičke alokacije snage i analitičku procjenu vjerojatnosti izvanrednog stanja, s ciljem poboljšanja pokrivenosti i kapaciteta u 5G mrežama, [21].

4.2.4. Sigurnosni problemi u NOMA sustavu

U NOMA-i, poruke više korisnika se preklapaju na jednom RB, a SIC prijammnik se koristi za dekodiranje tih signala. U SIC prijammniku, jaki korisnici dobivaju niže snage, dok slabiji korisnici primaju jače snage, što može uzrokovati sigurnosne probleme. Ovi problemi, uključujući implementaciju SIC-a, snagu prijenosa i vjerojatnost izvanrednog stanja, mogu se riješiti korištenjem enkripcije i dekripcije, ali to povećava latenciju i zahtjeve za obradom. Iako NOMA u 5G cilja na smanjenje latencije i poboljšanje brzina prijenosa, spektralne učinkovitosti i širine pojasa, sigurnosni problemi ostaju izazov. Optimalna i analitička rješenja su predložena za prevladavanje tih problema.

U literaturi su predložene različite optimizacijske tehnike za rješavanje sigurnosnih problema u NOMA sustavima: optimalni algoritmi za alokaciju i razdvajanje snage za povećanje sigurne ukupne brzine prijenosa na fizičkom sloju, modeli mobilnosti za analizu sigurnosnih performansi, dvostupanjski optimizacijski pristup za povećanje sigurne ukupne brzine prijenosa uključujući fiksiranje omjera signala i smetnje i optimizaciju tehnike oblikovanja snopa te optimizacijski algoritam za minimiziranje vjerojatnosti ispada pri uparivanju korisnika uz matematičke izraze za procjenu vjerojatnosti ispada i osigurane vjerojatnosti ispada.

Sigurnost fizičkog sloja u NOMA sustavima poboljšava se korištenjem analitičkih i optimizacijskih metoda. Recentna istraživanja nude razne algoritme za rješavanje sigurnosnih problema i poboljšanje pokrivenosti i kapaciteta u 5G mrežama. Analitički izrazi za vjerojatnost

sigurnosnog ispada proučavani su u različitim scenarijima raspodjele korisnika i prisluškivača. Također, predložen je koncept u kojem bazne stanice i korisnici rade u poludupleks modu, dok prisluškivači koriste puni dupleks, što omogućava aktivno ometanje i pasivno prisluškivanje za poboljšanje vjerojatnosti ispada prijenosa, [21].

5. USPOREDBA ZNAČAJKI TEHNIKA PRISTUPA U 5G MOBILNOJ MREŽI S PRETHODNIM GENERACIJAMA MOBILNIH MREŽA

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, bežični komunikacijski sustavi su značajno evoluirali kroz različite tehnike višestrukog pristupa. U 1G, 2G, 3G i 4G sustavima korištene su FDMA, TDMA, CDMA i OFDMA kao ključne tehnologije višestrukog pristupa, sve pripadajući ortogonalnim pristupima. OMA sustavi dodjeljuju bežične resurse ortogonalno korisnicima, što omogućuje jednostavno odvajanje signala uz nisku složenost prijemnika. Međutim, ove tehnike imaju ograničenje u broju podržanih korisnika zbog broja dostupnih ortogonalnih resursa i izazove s očuvanjem ortogonalnosti u prisutnosti smetnji kanala, što zahtijeva složene ekvilizatore i ograničava spektralnu učinkovitost i kapacitet suvremenih mreža. Karakteristike tehnika višestrukog pristupa prethodnih generacija mobilnih mreža sažete su u tablici 1.

FDMA i TDMA tehnike imaju fiksni broj kanala ili vremenskih slotova, koji su dodijeljeni korisnicima za cijelo vrijeme komunikacije, što je bilo učinkovito za glasovne usluge, ali neučinkovito za složenije prijenose podataka s rastućim brojem korisnika. Dinamične sheme dodjele kanala u TDMA i FDMA pokazale su potrebu za fleksibilnijim pristupima, [10], [12].

CDMA, temeljen na tehnologiji proširenog spektra, omogućava dinamičnu dodjelu kanala bez fiksnog ograničenja broja korisnika, što omogućava dodavanje novih korisnika u bilo kojem trenutku. Kvaliteta signala se postupno pogoršava s povećanjem broja korisnika, za razliku od fiksnih ograničenja u TDMA i FDMA shemama. CDMA nudi prednosti poput tolerancije na učinke slabljenja kanala i učinkovitog ponavljanja frekvencija, omogućavajući svakoj ćeliji korištenje iste frekvencije, što povećava frekvencijsku učinkovitost i omogućava mekani prijelaz između ćelija, [9], [11], [12].

SDMA (engl. *Space Division Multiple Access*) je tehnika pristupa koja se koristi u mobilnim mrežama za omogućavanje istovremenog pristupa više korisnika kroz različite prostorne kanale. Ova tehnika se temelji na korištenju različitih fizičkih smjerova ili prostornog rasporeda korisnika za odvajanje njihovih signala. SDMA pruža visoku propusnost kanala u mobilnim bežičnim sustavima razdvajanjem korisnika u prostornom smislu, koristeći adaptivne antene koje prilagođavaju obrazac snopa prema potrebama korisnika. Ovo omogućuje svakom korisniku da dijeli iste resurse kanala, poput frekvencije i vremenskih slotova, čime se značajno poboljšava kapacitet kanala. SDMA se može kombinirati s drugim shemama višestrukog

pristupa poput FDMA, TDMA i CDMA radi još veće učinkovitosti. Međutim, SDMA se suočava s izazovima kao što su složenost hardvera za praćenje signala, jer mobilni terminali često i brzo mijenjaju lokaciju. Također, odvajanje korisnika koji su blizu bazne stanice može biti teško, a tehnike unutarnjeg prijenosa moraju se razmotriti kada se snopovi od dva korisnika preklapaju, [9].

OFDM tehnika korištena u 4G mrežama zbog svoje sposobnosti da upravlja kašnjenjem u bežičnim kanalima i jednostavne detekcije zahvaljujući cikličkom prefiksu, ne zadovoljava sve zahtjeve 5G mreža. U mMTC scenarijima, gdje senzorski čvorovi prenose podatke asinkrono u uskim opsezima, OFDM se suočava s problemima zbog svoje potrebe za visokom sinkronizacijom korisnika, što može uzrokovati velike smetnje među susjednim podopsezima, [10], [11].

Tablica 1. Karakteristike tehnika višestrukog pristupa prethodnih generacija mobilnih mreža

Tehnika višestrukog pristupa	Značajke
CDMA	Visoka frekvencijska učinkovitost u bežičnim sustavima, sposobnost mekog prijelaza, potreba za kontrolom snage.
FDMA	Jednostavna implementacija, mala međusimbolička interferencija, niska fleksibilnost u dodjeli kanala, mali kapacitet kanala u bežičnim sustavima.
OFDMA	Fleksibilnost dodjele podkanala korisnicima, visoka brzina prijenosa za silaznu vezu, potreba za gotovo sinkronizacijom u uzlaznoj vezi, veliki interval čuvanja za kompenzaciju sinkronizacije.
TDMA	Kompatibilnost s 2G sustavima, potreba za točnim izjednačavanjem kanala u komunikaciji visoke brzine, mala fleksibilnost u dodjeli kanala, veliki trošak za sinkronizaciju, lakši prijelaz u odnosu na FDMA.
SDMA	Potreba za tehnikama adaptivnih antena, kapacitet za dijeljenje iste frekvencije i vremenskog slota za više korisnika, osjetljivost na lokaciju korisnika, povećanje složenosti hardvera za praćenje signala, potreba za unutarnjim prijelazom.

Izvor: [9]

Za zadovoljavanje zahtjeva za spektralnom učinkovitošću i masivnom poveziivošću u 5G sustavima, razvijene su neortogonalne višestruke pristupne sheme poput NOMA. NOMA omogućava većem broju korisnika pristup resursima koristeći neortogonalnu dodjelu i sofisticirane tehnike za eliminaciju smetnji, ali uz veću složenost prijemnika. Za razliku od konvencionalnih OMA shema (FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA), koje su ograničene brojem ortogonalnih resursa, NOMA povećava spektralnu učinkovitost i kapacitet mreže. Integrira se s postojećim metodama višestrukog pristupa kroz neortogonalno multipleksiranje unutar klasičnih područja, koristeći snagu i kodnu domenu za podršku većem broju korisnika u istom

bloku resursa. NOMA nudi visoku spektralnu učinkovitost, nisku latenciju i visoku masovnu povezanost, omogućujući više korisnika da dijele iste resurse, [10], [12], [22].

NOMA se dalje dijeli na tri vrste: NOMA u području snage, kodnom području i multipleksiranje u različitim područjima. Kodna domena poboljšava spektralnu učinkovitost mMIMO-a (engl. *massive MIMO*) koristeći rijetke kodove i dijeljenje resursa, dok domena snage integrira MIMO i usmjeravanje snopa. Ova tehnika prevladava ograničenja OFDMA-a u 4G mrežama omogućujući veću spektralnu učinkovitost korištenjem istih resursa za korisnike s različitim CSI. Poboljšava kapacitet 5G mreža, ali uz dodatnu interferenciju i složenost prijemnika. NOMA sheme uključuju PD-NOMA, koja koristi različite razine snage za razlikovanje korisnika putem SIC-a, i CD-NOMA, koja koristi nizove s niskom međukorelacijom, [10], [11], [12], [22].

NOMA nudi nekoliko ključnih prednosti u usporedbi s OMA-om:

1. Poboljšana spektralna učinkovitost i propusnost na rubu ćelije omogućuju pravedniji raspored korisnika i višu granicu kapaciteta u silaznom kanalu.
2. NOMA omogućava masovnu povezanost jer broj podržanih korisnika nije ograničen brojem ortogonalnih resursa, značajno povećavajući broj istodobnih povezanosti.
3. NOMA smanjuje latenciju prijenosa i troškove signalizacije, eliminirajući potrebu za dinamičkim raspoređivanjem pristupa kao kod OMA shema, što omogućuje brži prijenos podataka.

U uzlaznom kanalu SCMA sustava, višekratni pristup bez dodjele ostvaruje se korištenjem prethodno konfiguriranih resursa poput kodnih knjiga i pilota, uz primjenu tehnika slijepog detektiranja i kompresivne osjetljivosti za zajedničko otkrivanje aktivnosti i podataka. To smanjuje latenciju prijenosa i troškove signalizacije. Iako SIC prijemnici mogu povećati latenciju, napredne MIMO tehnike omogućuju usluživanje većeg broja korisnika. PD-NOMA sheme imaju opuštenije zahtjeve za povratnim informacijama o stanju kanalu, što omogućuje rad s ograničenom preciznošću i zastarjelim informacijama bez značajnog pogoršanja performansi.

Praktična razmatranja za NOMA uključuju raspodjelu snage među korisnicima, signalizacijske troškove, greške kod SIC-a i mobilnost korisnika. Kombinacija NOMA s MIMO tehnikama poboljšava spektralnu učinkovitost, a MIMO-NOMA pokazuje superiornost u ukupnom kapacitetu kanala u odnosu na MIMO-OMA. Simulacije i mjerenja ukazuju da NOMA postiže oko 30 % veću propusnost od OFDMA-a. Otvorena pitanja uključuju granularnost raspodjele snage, troškove signalizacije, povratne informacije i dizajn prijemnika, s novim dizajnima koji predlažu modulaciju i detekciju signala za više korisnika kako bi se smanjila složenost i izbjegla potreba za SIC-om, [12].

Povećanje broja korisnika na rubu ćelije obično smanjuje učinkovitost CoMP prijenosa, no NOMA rješenja mogu prevladati ovo ograničenje. NOMA tehnike za nasumično raspoređene korisnike pokazale su da učinkovitost ovisi o ciljnim brzinama podataka i dodijeljenoj snazi korisnika. PD-NOMA sustavi su pokazali superiorniji ukupni protok u odnosu na OMA, posebno za korisnike na rubu ćelije. Pogreške u procjeni kanala mogu uzrokovati preostalo ometanje u SIC procesu, smanjujući protok i uzrokujući pogreške u dekodiranju. Međutim, jednostavan algoritam za smanjenje brzine prijenosa uspješno je ublažio utjecaj tih pogrešaka, omogućujući NOMA postizanje korisnih dobitaka u protoku čak i pri pogrešnoj procjeni kanala, [12].

U klasičnim CDMA sustavima, nizovi proširenja često su potpuno popunjeni nenultim elementima, što uzrokuje smetnje zbog preklapanja signala. Ortogonalni nizovi eliminiraju smetnje, ali podržavaju samo onoliko korisnika koliko ima čipova. S druge strane, PN nizovi omogućuju većem broju korisnika, ali zahtijevaju složenije višekorisničke detektore. LDS-CDMA koristi rijetke nizove širenja s manje nenulatih elemenata, smanjujući smetnje i podržavajući veći broj korisnika. Ova metoda poboljšava izvedbu sustava koristeći nizove širenja niske gustoće, što je ključna razlika u odnosu na konvencionalni CDMA, [12].

Uspoređujući izvedbe LDS-OFDM-a s SC-FDMA i OFDMA u smislu PAPR-a, kao i izvedbe na razini veze i sustava, rezultati simulacija pokazali su da LDS-OFDM može značajno poboljšati postignutu izvedbu sustava pri određenoj snazi prijenosa, spektralnoj učinkovitosti i pravednosti, [12].

NOMA koristi različite tehnike višestrukog pristupanja, svaka s različitim karakteristikama, [11]:

- PD-NOMA: Ima jednostavnu strukturu i lako se integrira s tehnologijama poput MIMO i suradničkih mreža, ali zahtijeva grupiranje i uparivanje korisnika prema CSI, što povećava složenost sustava.
- SCMA i PDMA: Omogućuju širenje bez potrebe za savršenim CSI i koriste MPA detektore s niskom složenošću, koji su blizu optimalni. Međutim, kodiranje uvodi redundanciju koja smanjuje spektralnu učinkovitost.
- BOMA: Ima jednostavnu strukturu i može se lako prilagoditi LTE sustavima, ali zahtijeva uparivanje korisnika, što smanjuje fleksibilnost.
- LPMA: Kombinira pristupanje u domeni snage i koda, štedi troškove grupiranja korisnika i nudi fleksibilnost. Međutim, zahtijeva složeno kodiranje kanala.

Metoda MPA-SIC detekcije, koja se koristi u SCMA i PDMA, značajno ovisi o mehanizmu grupiranja korisnika. Kako bi se postigle bolje performanse, korisnici sličnih vremenskih kašnjenja trebaju biti grupirani zajedno. Ako se kašnjenja unutar iste grupe znatno razlikuju, može doći do visoke interferencije koja ometa rijetku strukturu. Tehnika s više grana može poboljšati performanse tretiranjem svake grane zasebno, izračunavajući ih paralelno i odabirući najbolji rezultat, čime se postižu bolje performanse u usporedbi s jedinstvenim pristupom grupiranju, [11].

Svaka NOMA shema nudi specifične prednosti i ograničenja ovisno o situaciji primjene koji su sažeti u tablici 2. Prilagodljiva konfiguracija omogućuje balansiranje između performansi i složenosti implementacije. Na primjer, za scenarije s velikim razlikama u uvjetima kanala, kao što su efekti blizu-daleko ili mobilne mreže, NOMA u domeni snage sa SIC prijemnikom pruža relativno nisku složenost. Nasuprot tome, za primjenu koja zahtijeva visoku pouzdanost, osobito u lošim uvjetima kanala ili kada je raspodjela korisnika koncentrirana, SCMA je prikladno rješenje zbog svoje sposobnosti oblikovanja i gotovo optimalne MPA detekcije, [11].

Iz teorijske perspektive, NOMA u kodnom području može postići značajan "dobitak od proširenja" pomoću niza proširenja (kodnih riječi), što nije lako ostvarivo u NOMA režimu u području snage. Ova prednost "dobitka od proširenja" karakteristična je za klasični CDMA, gdje se omjer kodiranja (engl. *code rate*), koji se odnosi na odnos između količine korisničkih podataka (informacija) koji se šalju i ukupne količine podataka prenesenih nakon kodiranja, određuje faktorom proširenja. Kod proširenja može se uspješno obnoviti čak i u uvjetima visoke razine šuma ili smetnji. Nasuprot CDMA, SCMA omogućuje dodatni "dobitak od oblikovanja" zahvaljujući optimizaciji višedimenzionalne konstelacije, [12].

Tablica 2. Prednosti i nedostaci NOMA tehnika

Shema	Značajke	Prednosti	Nedostaci
PD-NOMA	<ul style="list-style-type: none"> • Neortogonalni višestruki pristup u domeni snage • Različitim korisnicima dodjeljuje različita razina snage signala 	Visok SE. Kompatibilna s drugim tehnikama.	Potreba uparivanja korisnika. Širenje pogrešaka u SIC-u.
LDS-CDMA	<p>Višestruki pristup s kodnom podjelom s niskom gustoćom potpisa</p> <ul style="list-style-type: none"> • Svaki korisnik u LDS-CDMA sustavima koristi samo mali podskup kodova, što rezultira rjeđim kodovima 	Bez potrebe za CSI. Detektor s gotovo optimalnom MPA.	Redundantnost uslijed kodiranja.
LDS-OFDM	<ul style="list-style-type: none"> • Višestruki pristup s ortogonalnom podjelom frekvencija s niskom gustoćom potpisa • U LDS-OFDM sustavima, korisnici se mapiraju na podnositelje OFDM-a koristeći potpise niske gustoće, što znači da svaki korisnik zauzima samo mali podskup podnositelja. 	Bez potrebe za CSI. Detektor s gotovo optimalnom MPA. Više odgovara širokopojasnim kanalima u usporedbi s LDS-CDMA.	Redundantnost uslijed kodiranja.
SCMA	<ul style="list-style-type: none"> • Višestruki pristup sa rijetkim kodiranjem • Korisnici su predstavljeni rijetkim kodovima, što znači da svaki korisnik koristi samo podskup raspoloživih resursa (npr. podnositelja u OFDM sustavima) 	Bez potrebe za CSI. Detektor s gotovo optimalnom MPA. Više raznolikosti u usporedbi s jednostavnim LDS-om.	Redundantnost uslijed kodiranja. Teško je dizajnirati optimalnu knjigu kodova.
PDMA	<ul style="list-style-type: none"> • Višestruki pristup s razdvajanjem po obrascima (kombinacija vremenskih intervala, frekvencijskih podnosača i/ili antena koje su dostupne korisnicima) 	Više raznolikosti. Detektor s gotovo optimalnom MPA. Prijemnik niske složenosti.	Redundantnost uslijed kodiranja. Teško je dizajnirati optimalne uzorke.
BOMA	<ul style="list-style-type: none"> • Višestruki pristup sa bitnom ortogonalnošću. • Različitim korisnicima omogućava se simultani prijenos podataka koristeći isti frekvencijski resurs ali 	Jednostavna struktura. Kompatibilan s trenutnim sustavom. Prijemnik niske složenosti.	Potreba uparivanja korisnika. Smanjena fleksibilnost.

	im se dodeljuju bitno ortogonalni nizovi		
LPMA	<ul style="list-style-type: none"> • Višestruki pristup sa niskom potrošnjom energije u domenama snage i koda • Svi uređaji mogu slati podatke uz minimalnu interferenciju i uz što manju potrošnju energije 	Bez potrebe za grupiranjem korisnika.	Specifično kodiranje kanala.

Izvor: [11]

Postojeće NOMA sheme, koje koriste multipleksiranje u domen snage ili koda, mogu poboljšati spektralnu učinkovitost kroz neortogonalno dijeljenje resursa i podržati masivnu povezanost. Međutim, postoje značajni izazovi u dizajnu NOMA-e, uključujući dizajn referentnih signala, procjenu kanala, smanjenje PAPR-a u sustavima s više nositelja, održavanje skalabilnosti te dizajn povratnih informacija o kvaliteti kanala. Osim toga, postojeći dizajn višestrukog pristupa često ne uzima u obzir specifične zahtjeve različitih aplikacija, što može dovesti do neučinkovitih rješenja. Stoga se očekuje da će tehnologija višestrukog pristupa definirana softverom omogućiti fleksibilnu konfiguraciju i bolju podršku različitim uslugama i aplikacijama u 5G mrežama. Rješavanje ovih izazova može značajno poboljšati performanse NOMA rješenja, [12].

I PD-NOMA i CD-NOMA koriste nove stupnjeve slobode za dijeljenje kanala kako bi podržali masovni pristup unutar ograničenih bežičnih resursa. Obje tehnike zahtijevaju sofisticirane primopredajnike za borbu protiv istokanalnih smetnji. Zbog visoke dimenzionalnosti kanala u masovnom pristupu, koja proizlazi iz implementacije velikih antena na baznoj primopredajnoj stanici, složenost izračuna na primopredajnicima može biti prekomjerna. Stoga je dizajn jednostavnih, ali učinkovitih primopredajnika ključna tema za buduća istraživanja, [25].

5G mreže će koristiti heterogenu arhitekturu s malim ćelijama i makro baznim stanicama koje dijele spektar. NOMA je ključna tehnologija za 5G, posebno u heterogenim mrežama, jer omogućuje višestrukim korisnicima da dijele resurse u malim ćelijama. Međutim, NOMA se suočava s izazovima kao što su visoki računalni zahtjevi za SIC algoritme i kompleksnost optimizacije dodjele snage. Hibridni NOMA kombinira NOMA u domeni snage i koda, koristeći obje vrste resursa za poboljšanje spektralne učinkovitosti. Hibridna NOMA omogućuje simultano prijenos signala za više grupa koristeći MPA i SIC, [22].

6. ZAKLJUČAK

Tijekom evolucije mobilnih mreža, svaka generacija je uvodila nove tehnike višestrukog pristupa kako bi odgovorila na specifične izazove i potrebe korisnika. U 1G mrežama korišten je FDMA, koji je omogućio simultani prijenos signala, ali je imao ograničenja u kapacitetu i fleksibilnosti. U 2G, TDMA je dodao dimenziju vremenske podjele kanala, poboljšavajući učinkovitost za glasovne usluge, no suočio se s problemima u dinamičnim podatkovnim prijenosima zbog rigidnosti dodjele kanala. Tehnologija CDMA u 3G omogućila je dinamičnu dodjelu kanala i bolju toleranciju na smetnje, čime je značajno povećana fleksibilnost i kapacitet mreža. SDMA, uvedena u 4G, unijela je prostorno razdvajanje korisnika, što je poboljšalo kapacitet, ali je također donijelo izazove u praćenju signala i odjeljivanju korisnika blizu baznih stanica. OFDM, primijenjen u 4G mrežama, omogućava bolju otpornost na kašnjenje i poboljšanu detekciju, no nije u potpunosti zadovoljavao zahtjeve 5G mreža, posebno u mMTC scenarijima.

S dolaskom 5G, NOMA se pojavljuje kao ključna tehnologija koja nudi značajna poboljšanja u spektralnoj učinkovitosti i kapacitetu povezivanja. Ova tehnologija omogućava većem broju korisnika istovremeno korištenje resursa putem neortogonalnog prijenosa i sofisticiranih tehnika poništavanja smetnji. Iako NOMA značajno poboljšava kapacitet i smanjuje latenciju, suočava se s izazovima kao što su složenost prijemnika i upravljanje smetnjama. Različite NOMA sheme, uključujući PD-NOMA, CD-NOMA i SCMA, nude specifične prednosti i ograničenja, dok hibridne tehnike kombiniraju snagu i kodnu domenu kako bi se postigla optimalna učinkovitost. Iako su postignuti značajni napreci u usporedbi s prethodnim generacijama, još uvijek postoje otvorena pitanja i izazovi u dizajnu i implementaciji ovih tehnika. Ovo ukazuje na potrebu za daljnjim istraživanjima i razvojem kako bi se dodatno optimizirale performanse i fleksibilnost 5G mreža. Usporedba tehnika pristupa u 5G s prethodnim generacijama pokazuje kontinuirani napredak u kapacitetu, brzini, latenciji i podršci za razne vrste aplikacija, čime se osigurava bolje korisničko iskustvo i učinkovitije upravljanje mrežnim resursima.

POPIS LITERATURE

- [1] Kebede T, Wondie Y, Steinbrunn J, Kassa HB, Kornegay KT. Multi-Carrier Waveforms and Multiple Access Strategies in Wireless Networks: Performance, Applications, and Challenges. *IEEE Access*. 2022;10(1). DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3151360
- [2] Nitesh GS, Kakkar A. Generations of Mobile Communication. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineer*. 2016;6(3).
- [3] CIS. *Sigurnost mobilnih mreža*. Preuzeto s: <https://www.cis.hr/www.edicija/LinkedDocuments/NCERT-PUBDOC-2010-06-303.pdf> [Pristupljeno: 22. srpnja 2024.].
- [4] Muppavaram K, Govathoti S, Kamidi D, Bhaskar T. Exploring the Generations: A Comparative Study of Mobile Technology from 1G to 5G. *SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering*. 2023;10(7): 54-62. DOI: 10.14445/23488549/IJECE-V10I7P106
- [5] Poslovni dnevnik. *Mobilna 3G mreža HT-a odlazi u povijest u korist naprednih mreža nove generacije*. Preuzeto s: <https://www.poslovni.hr/sci-tech/mobilna-3g-mreza-ht-a-odlazi-u-povijest-u-korist-naprednih-mreza-nove-generacije-4443525#:~:text=Proces%20ga%C5%A1enja%203G%20mre%C5%BEe%20Hrvatskog,razgovori%20i%20razmjenjivati%20SMS%20poruke> [Pristupljeno: 11. rujna 2024.].
- [6] Vora LJ. Evolution of mobile generation technology: 1G to 5G and review of upcoming wireless technology 5G. *IJMTER*. 2015;2(10).
- [7] Cyber Magazine. *Top 10 5G providers in 2023*. Preuzeto s: <https://cybermagazine.com/articles/top-10-5g-providers-in-2023> [Pristupljeno: 22. srpnja 2024.].
- [8] Mohamed KS. 5G Mobile Communications: Fundamentals, Key Enabling Technologies, Challenges, Opportunities, Future Trends. U: Mohamed KS. (ur.) *Wireless Communications Systems Architecture*. Springer, Cham; 2022. pp. 143–164.

- [9] Jamalipour A, Wada T, Yamazato T. A tutorial on multiple access technologies for beyond 3G mobile networks. *IEEE Communications Magazine*. 2005;43(2): 110-117. DOI: 10.1109/MCOM.2005.1391509.
- [10] Prabhu S, Palkar R. *Multiple Access Technique For 5G Wireless Network*. Dell Technologies Proven Professional Knowledge Sharing; 2022. Preuzeto s: https://education.dell.com/content/dam/dell-emc/documents/en-us/2022KS_Prabhu-Multiple_access_technique_5G_Wireless_Network.pdf [Pristupljeno 16. srpnja 2024.]
- [11] Cai Y, Qin Z, Cui F, Li GY, McCann JA. Modulation and Multiple Access for 5G Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018;20(1): 629-646. DOI: 10.1109/COMST.2017.2766698.
- [12] Dai L, Wang B, Ding Z, Wang Z, Chen S, Hanzo L. A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018;20(3): 2294-2323. DOI: 10.1109/COMST.2018.2835558.
- [13] Aldababsa M, Toka M, Gökçeli S, Kurt GK, Kucur O. A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2018; 9713450. DOI: 10.1155/2018/9713450.
- [14] Wang B, Wang K, Lu Z, Xie T, Quan J. Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5G. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*. 2015; 1-5. DOI: 10.1109/BMSB.2015.7177186.
- [15] Du Y, Dong B, Gao P, Chen Z, Fang J, Wang S. Low-Complexity LDS-CDMA Detection Based on Dynamic Factor Graph. 2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Washington, DC, USA. 2016; 1-6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2016.7848955.
- [16] Razavi R, AL-Imari M, Imran MA, Hoshyar R, Chen D. On Receiver Design for Uplink Low Density Signature OFDM (LDS-OFDM). *IEEE Transactions on Communications*. 2012;60(11): 3499-3508. DOI: 10.1109/TCOMM.2012.082812.110284.

- [17] Vameghestahbanati M, Marsland ID, Gohary RH, Yanikomeroglu H. Multidimensional Constellations for Uplink SCMA Systems – A Comparative Study. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019;21(3):, 2169-2194. DOI: 10.1109/COMST.2019.2910569.
- [18] Hussain M, Rasheed H. Nonorthogonal Multiple Access for Next-Generation Mobile Networks: A Technical Aspect for Research Direction. *Wireless Communications and Mobile Computing Volume*. 2020; 1-17. DOI: 10.1155/2020/8845371.
- [19] Yuan Z, Yan C, Yuan Y, Li W. Blind Multiple User Detection for Grant-Free MUSA without Reference Signal. *IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. Toronto, Canada; 2017. pp. 1-5.
- [20] Mohammadkarimi M, Raza MA, Dobre OA. Signature-Based Nonorthogonal Massive Multiple Access for Future Wireless Networks: Uplink Massive Connectivity for Machine-Type Communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2018;13(4): 40-50. DOI: 10.1109/MVT.2018.2869425.
- [21] Sudhamani C, Roslee M, Tiang JJ, Rehman AU. A Survey on 5G Coverage Improvement Techniques: Issues and Future Challenges. *Sensors*. 2023;23(2356). DOI: 10.3390/s23042356.
- [22] Dangi R, Lalwani P, Choudhary G, You I, Pau G. Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review. *Sensors*. 2022;22(26). DOI: 10.3390/s22010026.
- [23] Gao Y, Xia B, Xiao K, Chen Z, Li X, Zhang S. Theoretical analysis of the dynamic decode ordering SIC receiver for uplink NOMA systems. *IEEE Commun. Lett.* 2017;21: 2246–2249.
- [24] Fan J, Zhang J, Chen S, Zheng J, Ai B. The application of NOMA on high-speed railway with partial CSI. U: *Proceedings of the 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference, VTC2019-Fall*. Honolulu, USA. 2019. pp. 1–5.

[25] Chen X, Ng DWK, Yu W, Larsson EG, Al-Dhahir N, Schober R. Massive Access for 5G and Beyond. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2021;39(3): 615-637. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3019724.

POPIS KRATICA I AKRONIMA

AGMA (engl. arithmetic geometric mean approximation)
AMPS (engl. Advanced Mobile Phone System)
AF (engl. amplify-and-forward)
BDMA (engl. beam division multiple access)
BER (engl. Bit Error Rate)
BOMA (engl. Block-Orthogonal Multiple Access)
BPSK (engl. Binary Phase Shift Keying)
CA (engl. carrier aggregation)
CDMA (engl. code division multiple access)
CD-NOMA (engl. code domain NOMA)
CGP (engl. Complementary Geometric Programming)
CoMP (engl. coordinated multi-point)
CP (engl. cyclic prefix)
CR (engl. cognitive radio)
CSI (engl. channel state information)
CSS-PA (engl. channel pairing algorithm)
CTU (engl. contention transmission units)
DF (engl. decode-and-forward)
DFT (engl. Discrete Fourier Transform)
D2D (engl. device-to-device)
EDGE (engl. Enhanced Data Rates for Global Evolution)
EE (engl. energy efficiency)
eMBB (engl. enhanced mobile broadband)
ETSI (engl. European Telecommunications Standards Institute)
eV2X (engl. enhanced vehicle-to-everything)
FDD (engl. frequency-division duplexing)
FDMA (engl. frequency division multiple access)
FEC (engl. forward error correction)
FM (engl. frequency modulation)

GPRS (engl. General Packet Radio Service)
GSM (engl. Global System for Mobile Communications)
HDTV (engl. High-definition television)
HSDPA (engl. High-Speed Downlink Packet Access)
HSPA (engl. High-Speed Packet Access)
ICI (engl. inter-carrierinterference)
IDMA (engl. interleave-division multiple access)
IGMA (engl. Interleave-grid multiple access)
IoT (engl. Internet of Things)
IP (engl. Internet Protocol)
JMPA (engl. joint message passing algorithm)
LDPC (engl. low-thickness equality check)
LDS-CDMA (engl. low-density spreading CDMA)
LDS-OFDM (engl. low-density spreading OFDM)
LPMA (engl. Layered Permutation Multiple Access)
LSSA (engl. signature based shared access)
LTE (engl. Long Term Evolution)
MA (engl. Multiple Access)
MC-NOMA (engl. multi-carrier NOMA)
MIMO (engl. Multiple Input Multiple Output)
MMS (engl. Multimedia Messaging Service)
mMTC (engl. massive machine-type communication)
MPA (engl. message-passing calculation)
MTC (engl. Machine-Type communications)
MUD (engl. multiuser detection)
MUSA (engl. Multi-User Shared Access)
MU-SCMA (engl. multi-user SCMA)
MUST (engl. multiuser superposition transmission)
NCMA (engl. non-orthogonal coded multiple access)
NMT (engl. Nordic Mobile Telephone)

NOCA (engl. non-orthogonal coded access)

NOMA (engl. non-orthogonal multiple access)

NTT (engl. Nippon Telegraph and Telephone Corporation)

OFDMA (engl. orthogonal frequency division multiple access)

OMA (engl. orthogonal multiple access)

PA (engl. power allocation)

PAPR (engl. peak to average power ratio)

PCM (engl. pulse code modulation)

PDMA (engl. Pattern Division Multiple Access)

PD-NOMA (engl. power domain NOMA)

PN (engl. Pseudo-Noise)

PSD (engl. Power Spectral Density)

QoS (engl. quality of service)

RB (engl. resource block)

RSMA (engl. resource spread multiple access)

SAMA (engl. Successive Interference Cancellation Aided Multiple Access)

SC-FDMA (engl. single-carrier FDMA)

SCMA (engl. sparse code multiple access)

SDMA (engl. Space Division Multiple Access)

SE (engl. spectral efficiency)

SIC (engl. sequential interference cancellation)

SISO (engl. single-input-single-output)

S-NOMA (engl. Siganture-Based NOMA)

SNR (engl. Signal to Noise Ratio)

SMS (engl. Short Message Service)

TACS (engl. Total Access Communication System)

TDD (engl. time-division duplexing)

TDMA (engl. time division multiple access)

UMTS (engl. Universal Mobile Telecommunications System)

URLLC (engl. ultra-reliable low-latency communication)

VMS (engl. Voice Mail Service)

VoIP (engl. Voice over Internet Protocol)

VoLTE (engl. Voice over Long-Term Evolution)

8-PSK (engl. Phase shift keying)

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema tehnika višestrukog pristupa.....	10
Slika 2. Usporedba tehnika višestrukog pristupa.....	11
Slika 3. Multipleksiranje koda u SCMA [17].....	21
Slika 4. Noma sa SIC-om [20].....	32

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike tehnika višestrukog pristupa prethodnih generacija mobilnih mreža 38	
Tablica 2. Prednosti i nedostaci NOMA tehnika.....	42

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je _____ završni rad
(vrsta rada)

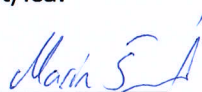
isključivo rezultat mojega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Komparacija tehnika pristupa kod mobilnih mreža, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 12.9.2024.

Marin Šimić



(ime i prezime, potpis)