



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**



Aleksandra Lopušina

**Analiza performansi komunikacionih sistema
na opsezima milimetarskih talasa u 5G
scenarijima**

- magistarski rad -

Podgorica, februar 2018.

**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Aleksandra Lopušina

**Analiza performansi komunikacionih sistema
na opsezima milimetarskih talasa u 5G
scenarijima**

- magistarski rad -

Podgorica, februar 2018.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANTU

Ime i prezime: **Aleksandra Lopušina**

Datum i mjesto rođenja: 24.09.1988. Podgorica, Crna Gora

Prethodno završene studije:

Osnovne studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore,
smjer: Elektronika, telekomunikacije i računari, 180 ECTS kredita, 2010.godine
Specijalističke studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore,
smjer: Telekomunikacije, 60 ECTS kredita, 2011.godine

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Elektrotehnički fakultet

Studijski program: Elektronika, telekomunikacije i računari - Telekomunikacije

Naslov rada: **Analiza performansi komunikacionih sistema na opsezima
milimetarskih talasa u 5G scenarijima**

Mentor: Prof. dr Milica Pejanović-Đurišić

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 22.09.2017.god.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 23.01.2018. god.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranta:

1. Prof. dr Milica Pejanović-Đurišić
2. Prof. dr Zoran Veljović
3. Doc. dr Enis Kočan

Komisija za ocjenu rada:

1. Prof. dr Milica Pejanović-Đurišić
2. Prof. dr Zoran Veljović
3. Doc. dr Enis Kočan

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. dr Milica Pejanović-Đurišić
2. Prof. dr Zoran Veljović
3. Doc. dr Enis Kočan

Datum odbrane: 04.04.2018.god.

Datum promocije:

Sadržaj

Sažetak	1
Abstract	2
1 Uvod.....	3
2 5G tehnologija: koncept i osnovni zahtjevi	6
2.1. Denzifikacija mreže	14
2.2. Prenos na frekvencijama milimetarskog opsega.....	16
2.3. Masivni MIMO sistemi.....	16
2.4. Modulacija	18
2.5 Tehnike višestrukog pristupa	22
3 Karakteristike propagacije na opsezima milimetarskih talasa	26
3.1. Propagacione karakteristike signala na frekvencijama mmWave opsega	27
3.1.1 Atmosferski efekti	29
3.1.2 Refleksija.....	32
3.1.3 Blokiranje	32
3.1.4 Gubici usled penetracije	33
3.1.5 Pokrivanje i konektivnost.....	33
3.1.6 Interferencija	34
3.1.7 Potrošnja energije	35
3.1.8 Uskopojasno zračenje.....	35
3.1.9 Hardverski nedostaci i izazovi prilikom dizajna	35
3.2. Modelovanje kanala na frekvencijama mmWave opsega.....	36
4 Analiza performansi mmWave komunikacionih sistema	40
4.1 Simulacioni scenariji.....	46
4.2 Rezultati simulacije.....	48
4.2.1 Scenario A: statična mobilna stanica	48
4.2.2 Scenario B: kretanje MS konstantom brzinom	49
4.2.3 Scenario C: nasumično kretanje MS.....	50
5 Predlog novog makrodiverziti algortima	53

5.1 Simulacioni scenariji.....	54
5.2 Rezultati simulacija.....	54
5.2.1 Scenario A: statična mobilna stanica	54
5.2.2 Scenario B: kretanje MS konstantom brzinom	57
5.2.3 Scenario C: nasumično kretanje MS.....	59
6 Zaključak.....	62
Literatura.....	64
Lista skraćenica.....	68

Sažetak

Eksponencijalan rast mobilnog Internet saobraćaja uslovio je intenzivan rad na razvoju mobilne tehnologije pete generacije (5G). Da bi se odgovorilo postavljenim izazovima, od 5G komunikacionih sistema se očekuje značajno poboljšanje kvaliteta servisa u poređenju sa postojećim celularnim sistemima. Jedan od glavnih aduta predstavlja prenos signala na frekvencijama milimetarskog opsega (*mmWave*), koji podrazumijeva opseg od 30 GHz do 300 GHz. Glavna prednost ovog opsega jeste velika količina slobodnog spektra, međutim, propagacione karakteristike ga čine izazovnim za implementaciju.

U istraživanju su analizirane performanse komunikacionih sistema na frekvencijama mmWave opsega (28 GHz i 73 GHz) u različitim korisničkim scenarijima, u cilju procjene njihove podobnosti za 5G ciljeve. Performanse su analizirane pomoću ns-3 simulacionog alata, a kao indikator kvaliteta servisa je posmatrana brzina prenosa podataka u *downlinku*.

Rezultati simulacija pokazuju da performanse mmWave sistema značajno variraju u zavisnosti od scenarija korisničkog kretanja, okruženja u kom se nalazi i frekvencije nosioca. Potvrđen je i efekat blokiranja signala, koji predstavlja glavnu prepreku u implementaciji komunikacionih sistema na frekvencijama mmWave opsega. U svrhu njegovog prevazilaženja, u radu je predložen novi makrodiverziti model, koji za cilj ima ublažavanje ili čak otklanjanje degradirajućeg uticaja efekta blokiranja. Novi model podrazumijeva poređenje kvaliteta više prijemnih signala i promjenu servisne bazne stanice samo ukoliko indikator kvaliteta kanala zadovoljava unaprijed definisani uslov kojim se garantuju značajno bolji radio uslovi i izbjegavanje ping-pong efekta. Performanse novog modela su, takođe, analizirane u tri scenarija.

Istraživanje pokazuje da komunikacioni sistemi na mmWave opsezima mogu ostvariti brzine prenosa podataka koje su neophodne u budućim mrežama, kao i da je, uz implementaciju predloženog makrodiverziti algoritma, moguće prevazići glavne nedostatke komunikacije na opsezima milimetarskih talasa.

Ključne riječi: 28 GHz, 5G, 73 GHz, frekvencije milimetarskog opsega, makrodiverziti

Abstract

Exponential growth of cellular data traffic caused 5G development activities to intensify. In order to meet these growing demands, 5G systems will have to deliver much higher service quality, compared to existing radio technologies. To address these challenges, there has been a growing interest for millimeter wave band (mmWave) that spans from 30 GHz to 300 GHz. Its main advantage lays in the fact that the available spectrum is much wider than in lower bands that are used in today's cellular technologies. On the other hand, propagation characteristics of mmWave make it challenging to implement.

In this research, we analyzed performance of mmWave communication system at two carrier frequencies (28 GHz i 73 GHz) in different user scenarios, in order to assess their eligibility for 5G goals. ns-3 simulation tool was used during research and in the analysis we chose data rate in downlink as the main quality indicator.

Results show that mmWave system performance heavily depends on the movement pattern of mobile station, the environment surrounding it, as well as the carrier frequency. Signal blockage has been identified in the results and, in order to combat its deteriorating effects, a new macrodiversity model has been proposed. It assumes that several signals' quality is monitored and that mobile station switches to another base station only if radio conditions are significantly better, based on channel quality indicator. This new model has also been analyzed in three different scenarios.

This research proves that mmWave communication systems can achieve data rate targets defined for next generation systems. Furthermore, it shows that the implementation of the proposed macrodiversity scheme leads towards significant performance improvement of mmWave cellular systems.

Keywords: 28 GHz, 5G, 73 GHz, macrodiversity, millimeter wave

Glava 1

Uvod

U poslednjih nekoliko decenija, mobilni komunikacioni sistemi doživjeli su eksponencijalan rast i razvoj. Još od osamdesetih godina prošlog vijeka, tj. od pojave prve generacije mobilnih uređaja, njihova popularnost ne jenjava. Prvi analogni sistemi su brzo prevaziđeni zbog lošeg kvaliteta servisa, ograničenog kapaciteta i nedostatka globalnog standarda. Uslijedila je druga generacija (2G) mobilne tehnologije, ujedno i prva digitalna, koja je donijela revolucionarne promjene u pogledu kvaliteta servisa, pristupne tehnologije i performansi. U trećoj generaciji (3G) uveden je paketski prenos podataka, što je umnogome poboljšalo performanse sistema, kao i korisničko iskustvo, u poređenju sa 2G sistemima. Rastuće potrebe korisnika i širenje spektra primjene doveli su do razvoja četvrte generacije (4G) mobilne tehnologije. Poboľšanja u odnosu na 3G su bila značajna, naročito u pogledu kvaliteta servisa i kapaciteta mreža, ali to je ujedno značilo i povećanu potrošnju baterija korisničkih uređaja, usložnjavanje hardvera i povećanu cijenu. Iako se na početku činilo da kapacitet takvih sistema teško može biti u potpunosti iskorišćen, ipak se to postepeno ostvaruje. Promijenjene navike u korišćenju mobilnih uređaja i veća mobilnost korisnika, uz širok opseg aplikacija koje zahtijevaju visok kvalitet servisa ubrzala je taj proces. Već sada, LTE (*Long Term Evolution*) mreže širom svijeta se bore sa isporučivanjem željenih kapaciteta svojim korisnicima. Frekvencijski spektar ispod 3 GHz je vrlo zasićen, a opsezi koji se koriste nisu susjedni, pa se i propagacione karakteristike značajno razlikuju. Olakšanje je pronađeno u *LTE-Advanced* tehnologiji, u kojoj je predstavljen koncept agregacije nosilaca, bilo kontinuiranih bilo nekontinuiranih, u cilju povećanja kapaciteta. Ipak, to je samo trenutno riješilo problem konstantno rastućeg saobraćaja i ukazalo na neophodnost revolucionarnih tehnologija za potrebe 5G komunikacionih mreža.

U prilog tome ide i prognoza kompanije *Cisco* koja predviđa da će se ostvareni mobilni Internet saobraćaj značajno promijeniti do 2021. godine, tj. da će se povećati 7 puta u odnosu na 2016. godinu (na 48.3 EB), kao i da će potrošnja po korisniku porasti 5 puta (na 5.4 GB). Takođe, prognozirano je da će ukupan mobilni Internet saobraćaj ostvaren u 2021. godini biti 23 puta veći od ukupnog globalnog Internet saobraćaja 2005.godine. Osim toga, broj uređaja će se povećati za 60%, pa se očekuje da će u 2021. godini biti 11.6 milijardi uređaja povezanih na Internet putem celularnih mreža, [1]. Zbog svega navedenog, još 2013. godine se krenulo sa procesom istraživanja novih mogućnosti za unapređenje pristupnih radio tehnologija, pod zajedničkim nazivom 5G. U ovaj globalni projekat su uključeni vodeći operateri, proizvođači opreme i akademske institucije. Po prvi put, u predikciju iz [1] je uključen i potencijalni 5G saobraćaj, za koji je prognoza da će 2021. godine iznositi skoro 1 EB mjesečno, a generisaće ga skoro 25 miliona uređaja koji podržavaju 5G, što predstavlja značajnu bazu na samom početku životnog ciklusa tehnologije. Do sada je napravljen značajan iskorak, ITU (*International Telecommunications Union*) je definisao tri scenarija za upotrebu IMT-2020 (*International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond*), standarda pod čijim okriljem se razvija 5G, [2]. Osim scenarija, predložene su i grane industrije u kojima se očekuje da će definisani servisi dati najveći doprinos, i definisano je 13 tehničkih zahtjeva u pogledu performansi koje je neophodno ostvariti, [3]. Detaljna tehnička specifikacija od strane ITU se očekuje do oktobra 2020. godine, nakon čega će uslijediti komercijalna implementacija. Kao i kod prethodnih, i za 5G tehnologiju se najčešće ističe jedan indikator kvaliteta: maksimalna brzina prenosa podataka. Samo u tom segmentu, očekuju se značajna povećanja u odnosu na 4G sisteme: maksimalna brzina prenosa od 20 Gb/s na *downlinku* i 10 Gb/s na *uplinku*, u idealnim uslovima, kada su svi radio resursi dodijeljeni jednom korisniku, [3]. Da bi to bilo dostignuto, razmatraju se unapređenja postojećih tehnika i traže se nove kojim bi se napravio neophodan iskorak. Izmjene se očekuju kako u pristupnoj radio mreži, tako i u jezgru mreže, koja će takođe morati da postane fleksibilnija i skalabilnija. U radio dijelu, pored masivnih MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) sistema, najveći potencijal leži u prenosu signala na frekvencijama milimetarskih opsega (od 30 do 300 GHz), zbog velike količine neiskorišćenog spektra, [4]. U ovom istraživanju će biti analizirane performanse sistema na određenim podopsezima milimetarskih talasa, u kontekstu ostvarivanja zahtjeva koje treba da ispuni 5G tehnologija.

Ostatak rada je koncipiran na sljedeći način. U drugoj glavi predstavljeni su osnovni koncepti na kojima će 5G sistemi, očekuje se, počivati, kako bi ispunili ono što se od njih

očekuje - izuzetne performanse, masovna konektivnost uređaja, povećana spektralna i energetska efikasnost i manji troškovi implementacije i održavanja. Treća glava posvećena je jednoj od najvažnijih promjena koje će 5G sistemi, izvjesno, donijeti: prenos signala na frekvencijama milimetarskih opsega (*mmWave*). Nakon analize njihovih propagacionih karakteristika, razmatrane su prednosti i nedostaci, kao i kompromis koji će se morati napraviti između njih ne bi li se opravdalo mjesto predvodnika promjena koje 5G sistemi donose. U četvrtoj glavi predstavljen je simulacioni alat koji je korišćen u istraživanju, objašnjeni implementirani modeli kanala, kao i ostale pojedinosti fizičkog i viših nivoa koji su uključeni. Nakon toga, opisani su scenariji koji su korišćeni, razlozi zašto su upravo oni izabrani i na kraju, rezultati dobijeni simulacijom testnih okruženja. Dobijeni rezultati, tj. ostvarene performanse u različitim uslovima su dalje analizirane i prepoznate su slabosti ispitivanih opsega koje su uslovile degradacije. U petoj glavi je predloženo rješenje za probleme prilikom propagacije koji su identifikovani ranije, tj. novi makrodiverziti (MD) algoritam kojim se ublažava problem blokiranja signala. Poboljšanja koja se ostvaruju su detaljno razmotrena i opisana. Na kraju je data glava sa zaključnim opažanjima, uz sumiranje cjelokupnog istraživanja.

Glava 2

5G tehnologija: koncept i osnovni zahtjevi

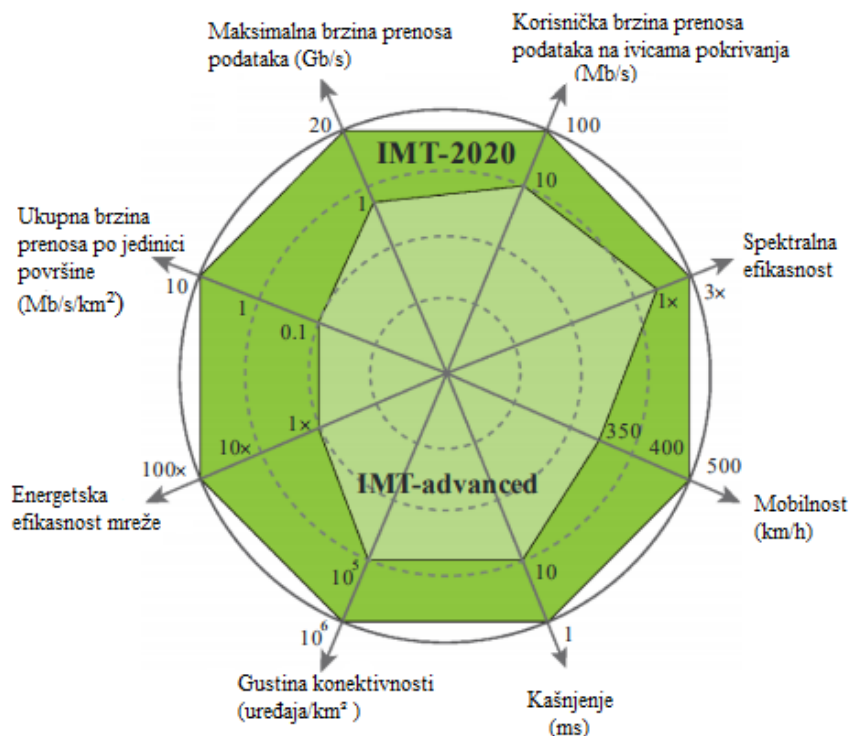
Jedan od glavnih zadataka komunikacionih sistema sljedeće generacije biće, ne samo omogućavanje povezivanja na Internet putem celularnih mreža velikom broju različitih uređaja i senzora, već i posluživanje značajno veće količine saobraćaja u odnosu na sadašnje trendove, sa velikom spektralnom efikasnošću (reda 100 b/s/Hz/km²) i velikom brzinom prenosa podataka (reda Gb/s). Od 2013. godine, pokrenuto je više projekata u sklopu istraživanja za 5G, uključujući već pomenuti IMT-2020, 5GPPP/METIS, [5], mmMAGIC, [6], NGMN Alliance, [7], 5G Forum, [8], 3GPP 5G, [9]. U 2015. godini ITU-R (*International Telecommunications Union Radiocommunication Sector*) je 5G sisteme zvanično nazvao IMT-2020 i objavio preporuke i ciljeve, na osnovu kojih se sada priprema standardizacija svih segmenata mreže.

5G komunikacioni sistemi se razvijaju u više smjerova, jer su identifikovane tri vrste servisa koji će biti od značaja u budućim sistemima: napredni mobilni širokopojasni servisi (*Enhanced Mobile Broadband, eMBB*), masovna *machine-type* komunikacija (*Massive Machine Type Communications, mMTC*) i veoma pouzdana komunikacija sa malim kašnjenjem (*Ultra Reliable and Low Latency Communications, URLLC*).

eMBB je fokusiran na postizanje što većih brzina prenosa podataka i što manjeg kašnjenja, kao i na povećanje kapaciteta. mMTC zapravo predstavlja osnovu *Internet of Things* (IoT) paradigme i fokusira se na ostvarivanje komunikacije između brojnih uređaja male potrošnje, koji služe za pametno mjerenje, logistiku, senzore i slično. URLLC će omogućiti da uređaji i senzori imaju veoma pouzdanu komunikaciju i malo kašnjenje, što ih čini idealnim za upotrebu u automobilskoj industriji, medicini, javnoj zaštiti i bezbjednosti, [10]. Za ova tri servisa se razmatraju različiti frekvencijski opsezi, u skladu sa njihovim propagacionim karakteristikama. Tako se za mMTC i URLLC scenarije planira upotreba

nižih frekvencijskih opsega, kao na primjer opsega na 700 MHz ili čak na 800/900 MHz koji su sada u upotrebi. Ove frekvencije omogućavaju *indoor* pokrivanje, kao i pokrivanje velikih površina, što je u ovim scenarijima ključno. Opseg između 2 i 6 GHz je opseg u kom je planirano korišćenje sva tri scenarija, pošto on nudi dobar kompromis između kapaciteta i pokrivanja, [11]. Prvi 5G sistemi su u toku prethodne godine realizovani upravo na frekvencijama iz ovog opsega, tačnije od 3.4 do 3.8 GHz. Frekvencije mmWave opsega su planirane isključivo za eMBB scenarije i stroge zahtjeve koje oni postavljaju. Njihovo korišćenje je planirano u urbanim, gusto naseljenim sredinama, ali ne i za *indoor* pokrivanje. Tu se izdvaja nekoliko odgovarajućih podopsega: 24-28 GHz, 31-33 GHz, 37-43 GHz, 45-53 GHz, 66-76 GHz, 81-86 GHz, [12].

Na slici 1 dato je poređenje tehničkih mogućnosti potencijalnog IMT 2020 sistema sa sadašnjim *IMT-Advanced* sistemom i jasno se očitava koji stepen poboljšanja se očekuje u pojedinačnim segmentima, [2].

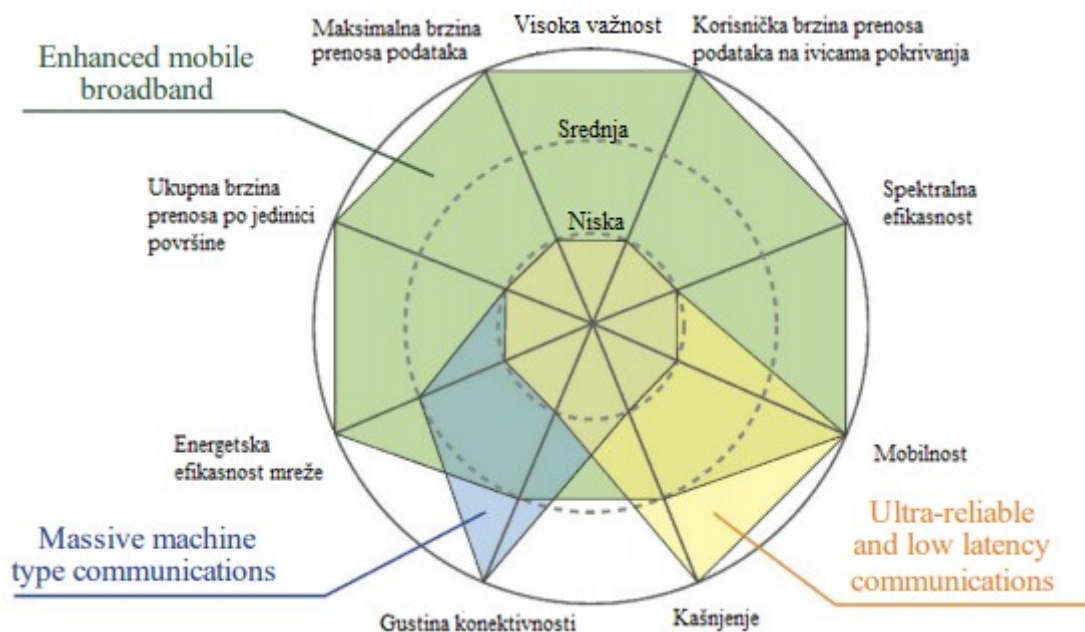


Slika 1: Poboljšanje ključnih performansi IMT-2020 sistema u poređenju sa *IMT-Advanced* sistemom

Ipak, imajući na umu tri servisa za koja se 5G razvija, jasno je da nisu sve performanse ključne za svaki od njih. Važnost svake od njih za određeni scenario data je na slici 2, [2].

eMBB je zapravo evolutivni nastavak misije LTE i *LTE-Advanced* sistema, koji su

bili fokusirani na postizanje što veće spektralne efikasnosti i omogućavanje što većih brzina prenosa krajnjim korisnicima. U skladu sa tim, na slici 2 se uočava da su u eMBB scenariju najvažniji: maksimalna ostvariva brzina prenosa podataka, brzina prenosa podataka na strani korisnika, energetska i spektralna efikasnost, kao i ukupna brzina prenosa podataka po jedinici površine. Sa druge strane, mMTC je primarno namijenjen uređajima zaduženim za mjerenje, nadzor, čuvanje podataka i povezivanje predviđenog broja tih uređaja predstavlja glavni izazov u ovom scenariju. Sa slike 2 se uočava da je pored visoke gustine konekcija da bi se podržao veliki broj uređaja u mreži, a sa vrlo malim brzinama prenosa podataka i malom mobilnošću, važna i energetska efikasnost takve mreže. URLLC scenariji predstavljaju možda i najizazovniji scenario, obzirom da su aplikacije za koje je namijenjen izuzetno osjetljive na kašnjenje: autonomno upravljanje vozilima, V2V (*vehicle to vehicle*) komunikacija, kontrola udaljenim pristupom u različitim segmentima: medicini, poljoprivredi, vojsci. Kako je vrijeme ljudske reakcije oko 1 ms (za dodir rukom, a oko 10 ms za vizuelnu reakciju), cilj je da kašnjenje u ovom scenariju za određene kritične aplikacije bude reda 1 μ s. Zato je i na slici 2 jasno naznačeno da je za URLLC ključni parametar malo kašnjenje, dok je velika brzina prenosa podataka manje važna, [13].



Slika 2: Važnost ključnih indikatora performansi za različite 5G scenarije

Zahtjeve iz tri opisana scenarija neće biti potrebno niti moguće zadovoljiti odjednom, pa se svaki od njih odvojeno razvija pod zajedničkim okriljem 5G tehnologije. Ipak, zahtjevi su objedinjeni i tretiraju se kao zajednički cilj. Najvažniji od njih su, [4]:

1) Brzina prenosa podataka

Potreba da se podrži ogroman rast mobilnog internet saobraćaja je nesumnjivo glavni pokretač razvoja 5G tehnologije. Ipak, nije dovoljno fokusirati se samo na maksimalne ostvarive brzine, naročito ne sa aspekta krajnjeg korisnika. Zato je definisano više različitih parametara kvaliteta:

a) Ukupna brzina prenosa podataka po jedinici površine odnosi se na ukupan protok podataka koji mreža može da posluži po jedinici površine, i mjeri se u b/s/km². Planirano je će u 5G sistemima ova vrijednost biti uvećana do 100 puta u odnosu na 4G sisteme i teži se ostvarenju cilja od 10 Mb/s/km² na *downlinku*, za testno *indoor* hotspot okruženje, [3].

b) Brzina prenosa podataka na ivicama oblasti pokrivanja je najmanja brzina prenosa koju korisnik može da očekuje u oblasti pokrivanja i važan je pokazatelj kvaliteta mreže. Ciljevi u 5G mrežama za ovu brzinu na *downlinku* variraju od 100 Mb/s do čak 1 Gb/s. Čak i donja granica ovog opsega će biti izuzetno zahtjevna za postići, jer to podrazumijeva povećanje od 100 puta u odnosu na postojeće 4G sisteme, koji imaju brzinu prenosa podataka na ivicama oblasti pokrivanja oko 1 Mb/s (mada ta vrijednost zavisi od opterećenja i veličine ćelije i drugih faktora). Na *uplinku* se teži da se postigne brzina od 50 Mb/s.

c) Maksimalna brzina prenosa podataka je najveća moguća brzina koju korisnik može ostvariti u idealnim uslovima, koji pretpostavljaju prenos bez grešaka, i scenario u kom su svi radio resursi dodijeljeni jednom korisniku (osim resursa koji se koriste za sinhronizaciju, referentne i pilot signale i zaštitne intervale) i projektovano je da u 5G sistemima bude reda desetina Gb/s, kako na *downlinku*, tako i na *uplinku*. Ukoliko se sa W označi širina raspoloživog opsega, a sa SE maksimalna spektralna efikasnost u tom opsega, onda je maksimalna brzina prenosa na strani korisnika, [3]:

$$R_p = W \times SE_p \quad (1)$$

2) Kašnjenje

Pored brzine prenosa, i kašnjenje je jedna od karakteristika koja se značajno poboljšavala sa razvojem celularnih tehnologija. Tako je u drugoj generaciji kašnjenje bilo reda 0.5-1s, a u trećoj generaciji je smanjeno na 200 ms. Trenutno *roundtrip* kašnjenje u 4G mrežama je reda 15 ms i, iako je to dovoljno za većinu trenutno raspoloživih servisa, očekuje se da će 5G sistemi podržavati povezivanje samoupravljivih automobila, uređaja u domenu zdravstva, bezbjednosti, građevinarstva, kao i aplikacije kao što su: *two way gaming*, aplikacije za virtualnu i/ili uvećanu realnost, što znači da će kašnjenje morati biti značajno skraćeno, uz povećanje pouzdanosti komunikacije. Planirano je da se kašnjenje na radio linku smanji na 1 ms u URLLC scenarijima, i 4 ms u eMBB scenarijima, [3]. Ovi zahtjevi se odnose na prenos korisničkog saobraćaja u idealnim uslovima, kako na *downlinku*, tako i na *uplinku*. Očekuje se da će to uticati i na strukturu podfrejma i na druge segmente prenosa na fizičkom nivou. Osim toga, promjene će biti neophodne i na MAC (*Medium Access Control*) nivou, ali i u jezgru mreže, ukoliko se želi smanjiti *end-to-end* kašnjenje. Za MAC nivo izazov predstavlja činjenica da će za prenos na frekvencijama mmWave opsega biti neophodne usmjerene antene sa vrlo uskim snopom zračenja. Da bi se postigao željeni dobitak usmjerenosti antene, u takvim sistemima je moguće vršiti prenos za mali broj korisnika istovremeno, što dovodi do loše iskorišćenosti resursa. Da bi se odgovorilo na brze promjene stanja kanala i postiglo što kraće kašnjenje, kontrolni kanali na kojima se prenose zahtjevi za *scheduling* i informacije o CQI (*Channel Quality Indicator*) će zahtijevati česte prilike za retransmisiju. Ukoliko to ne bude omogućeno, usloviće značajno povećanje zaglavljaja paketa, što dovodi do neefikasnosti. Kao rješenje za ove izazove, najčešće se pominje smanjenje trajanja simbola i fleksibilan TTI (*Travel Time Interval*), [14].

U jezgru mreže je jasno da, ukoliko se želi smanjiti *end-to-end* kašnjenje, mrežni elementi iz jezgra mreže se moraju približiti krajnjem korisniku da bi se smanjio broj transportnih hopova između njih. Nekoliko tehnologija se razmatra za ove potrebe: softverski definisane mreže (*Software Defined Networks*, SDN) i virtualizacija mrežnih funkcija (*Virtualization of Network Functions*, VFN), koji su glavni trendovi distribuiranije topologije koji mogu doprinijeti smanjenom kašnjenju, [14].

3) Potrošnja energije i cijena

Kako se početak komercijalne implementacije 5G sistema približava, troškovi i potrošnja energije će postati značajna stavka za razmatranje, zbog gušćih mreža i značajno većih brzina koje se ostvaruju. Da bi cijena, kako za operatora, tako i za krajnjeg korisnika, ostala na približnom nivou kao u postojećim komunikacionim sistemima, biće neophodno značajno povećati energetska efikasnost svih elemenata sistema, čak i do 100 puta. Energetska efikasnost komunikacionog linka, obično mjerena u J/b, će morati da bude poboljšana otprilike isto koliko će i brzina prenosa podataka biti povećana, ne bi li se zadržala ista potrošnja energije. Ili mnogo više ukoliko je cilj smanjiti tu potrošnju. Glavni izazov biće efikasna upotreba energije u trenucima prenosa velikog saobraćaja i niska potrošnja kada je saobraćaj minimalan. Očekuje se da će mmWave spektar biti 10 do čak 100 puta jeftiniji (cijena po Hz) nego spektar ispod 3 GHz, koji se koristi za 2G, 3G i 4G tehnologije, [4]. Slično, mikro ćelije bi trebalo da troše 10 do 100 puta manje energije od makro ćelija i da su isto toliko jeftinije za implementaciju i održavanje. Sa druge strane, zbog očekivanog povećanja broja mikro baznih stanica i denzifikacije mreže, značajno povećanje troškova očekuje se u transportnom dijelu mreže, tj. povezivanju baznih stanica sa jezgrom mreže.

4) Gustina konekcija

Veliki broj uređaja (mjerača, senzora, itd.) je i sada povezan na Internet putem celularnih mreža, ali se njihov eksponencijalni rast tek očekuje. Očekuje se da se broj povezanih uređaja, koji zajedno čine IoT, sa postojećih 5 milijardi do 2020.godine poveća na 21 milijardu, [15]. Iako je količina podataka koju razmjenjuju sa mrežom relativno mala, najveći izazov je zapravo signalizacija koja se ne generiše kontinuirano, već u naletima. Zato je gustina konekcija najvažniji parametar u mMTC scenarijima. Gustina konekcija se računa kao odnos broja uređaja koji imaju servis određenog kvaliteta i površine koja se posmatra. Cilj kojem se teži u 5G sistemima je gustina konekcija od 10^6 konekcija po km^2 , [3], dok je u postojećim 4G sistemima ta gustina bila 2000 konekcija po km^2 .

5) Spektralna efikasnost

Kao i za ostale parametre, i u domenu spektralne efikasnosti se očekuje značajno poboljšanje u odnosu na dosadašnje komunikacione sisteme. Cilj koji 5G sistemi treba da ostvare jeste maksimalna spektralna efikasnost od 30 b/s/Hz na *downlinku* i 15 b/s/Hz na *uplinku*, [3], pri čemu se pretpostavljaju idealni uslovi u kojima su svi raspoloživi radio resursi dodijeljeni jednom korisniku (osim resursa koji se koriste za sinhronizaciju, referentne i pilot signale i zaštitne intervale). Ovaj parametar je jedan od ključnih parametara za eMBB scenarije. Najjednostavniji način za povećanje spektralne efikasnosti jeste smanjivanje površine pokrivanja ćelija, što će kroz denzifikaciju mreže biti realizovano. Velika količina slobodnog spektra u mmWave opsegu čak i uz nisku spektralnu efikasnost u mogućnosti je da isporuči velike brzine prenosa podataka krajnjim korisnicima, pa to ovaj opseg čini još primamljivijim. Osim toga, značajna poboljšanja se očekuju od masivnih MIMO sistema, kao i od novih talasnih oblika koji se razmatraju, a kojima se želi poboljšati upravo spektralna efikasnost u odnosu na talasne oblike u postojećim sistemima.

Pored maksimalne, u tehničkim zahtjevima za 5G sisteme, definisan je i cilj za prosječnu spektralnu efikasnost (od 3.3 b/s/Hz u ruralnim do 9 b/s/Hz u *indoor* scenarijima), kao i za spektralnu efikasnost na ivicama pokrivanja, (od 0.12 b/s/Hz u ruralnim do 0.3 b/s/Hz u *indoor* scenarijima), kako na *downlinku*, tako i na *uplinku*, [3].

6) Performanse pri velikim brzinama kretanja terminala

Poseban izazov za 5G tehnologije predstavlja ostvarivanje zadanih performansi kvaliteta servisa pri velikim brzinama kretanja mobilne stanice (do 500 km/h), na primjer u brzim vozovima. Ovakav izazov će se morati realizovati putem više ključnih tehnika, kao što su tačna estimacija brzo promjenljivog kanala usled povećanog Doplerovog *spread-a*, da bi se omogućila pouzdana komunikacija, napredne tehnike obrade signala da bi se poboljšala spektralna i energetska efikasnost sistema, efikasne šeme za brzi handover da bi se izbjeglo kašnjenje i prekidi komunikacije. Osim toga, razmatraju se i mnoge novine po pitanju arhitekture: uvođenje mobilnog relejinga i grupnog handovera, masivnih MIMO sistema, stvaranje heterogenih mreža gdje bi makro ćelije koje rade na nižim frekvencijama bile korišćene za prenos signalizacije, dok bi mikro ćelije koje koriste više frekvencijske opsege prenosile korisnički saobraćaj, [16].

I u takvim uslovima, očekuje se da će 5G sistemi moći da ponude do 100 Mb/s bilo gdje i bilo kada, uz visoku dostupnost i pouzdanost mreže, [3].

7) Pouzdanost prenosa

Pouzdanost prenosa se definiše kao vjerovatnoća prenosa određene količine saobraćaja u definisanom vremenskom roku, sa visokim procentom uspjehnosti. Pod neuspješnim prenosom se podrazumijeva prijem poruke sa velikim zakašnjenjem, prijem poruke sa greškom ili ukoliko nije primljena uopšte. Ovaj parametar će biti jedan od ključnih u budućim URLLC scenarijima. Minimalni zahtjev koji je propisan za pouzdanost prenosa je $1-10^{-5}$ za vjerovatnoću uspješnog prenosa PDU (*Protocol Data Unit*) od 32 bajta za 1 ms u urbanom makro URLLC testnom okruženju, [3]. Da bi se to ostvarilo neophodno će biti pristati na određene kompromise, obzirom da tehnike za povećanje pouzdanosti prenosa kao što su ARQ (*Automatic Repeat Request*), adaptivna modulacija i kodiranje mogu negativno uticati na druge parametre kvaliteta servisa, u prvom redu na spektralnu efikasnost. Ipak, obzirom da su 5G scenariji podijeljeni po tehničkim zahtjevima koje je neophodno ostvariti, a za sada nije pronađen scenario u kom su pouzdanost prenosa i visoka spektralna efikasnost jednako važni, to možda i neće predstavljati problem.

8) Širina opsega

Pod širinom opsega se podrazumijeva maksimalna agregirana širina opsega, sa jednim ili više nosilaca. Minimalna širina opsega predviđena za 5G sisteme je 100 MHz, a za frekvencije iznad 6 GHz je planirana podrška za opsege do 1 GHz širine, [3], što je značajno povećanje u odnosu na širinu kanala od 20 MHz u postojećim LTE sistemima. Planirano je i da sistemi podržavaju skalabilne širine opsega, tj. da rade sa opsezima različitih širina, u zavisnosti od scenarija u kojim se koriste. Svakako, uz sve tehnike za bolje iskorišćenje resursa kao što su denzifikacija mreže i prebacivanje saobraćaja na druge tehnologije, jasno je da će 5G sistemima jednostavno biti neophodno više spektra. Zato su frekvencije milimetarskog opsega idealan kandidat, gdje je potencijalno dostupno više od 150 GHz spektra, [10].

Navedeni zahtjevi samo su dio servisne specifikacije za 5G. Kao i od svake nove tehnologije, i od 5G se očekuju revolucionarne promjene u cilju ostvarivanja zacrtanih poboljšanja. Promjene treba očekivati, kako u radio dijelu, tako i u jezgru mreže, od koga se očekuje da postane fleksibilniji i skalabilniji. Za sada se u tom segmentu izdvajaju dva trenda koja potpomažu ostvarivanje ciljeva za 5G, a to su: virtualizacija mrežnih funkcija i softverski definisane mreže. Virtualizacija omogućava da se procesi koji su bili vezani za hardver prebace u *cloud* okruženje. Takva arhitektura mrežne funkcije čini mnogo fleksibilnijim i omogućava stvaranje novih mrežnih servisa. Softverski definisana mreža je zapravo okvir za kreiranje pametnih, programabilnih mreža. Definiše se kao arhitektura gdje su mogućnosti mreže definisane kroz aplikativni interfejs, koji aplikacijama omogućava da traže, dobijaju i manipulišu mrežnim servisima, [4].

Ipak, poboljšanja na strani jezgra mreže su samo pomoćna sredstva i zapravo se u pristupnom radio dijelu mreže dešavaju glavne izmjene. Neke od tehnika od kojih se najviše očekuje su, [4]:

- 1) denzifikacija mreže
- 2) prenos na frekvencijama mmWave opsega
- 3) MIMO sistemi
- 4) nove vrste modulacija signala
- 5) nove tehnike višestrukog pristupa

2.1. Denzifikacija mreže

Jednostavan, a izuzetno efikasan način da se poveća kapacitet mreže jeste da se smanji površina pokrivanja ćelija i poveća njihov broj. Ovaj princip se primjenjuje od početka mobilnih tehnologija, kada su površine ćelije bile reda stotina km². Celularne mreže danas imaju značajno manje ćelije, i sve više naginju *pico* (domet ispod 100m) i *femto* dimenzijama (domet kao kod WiFi mreže). Smanjivanje površine pokrivanja ćelija ima brojne prednosti, a najvažnije su: bolje iskorišćenje spektra (veći faktor iskorišćenja) i smanjivanje broja korisnika koji koriste resurse na jednoj baznoj stanici. Ipak, prilikom denzifikacije mreže treba voditi računa o više potencijalnih problema. Jedan od glavnih

izazova predstavlja omogućavanje neprimjetnog handovera između vrlo heterogenih mreža, ali i rješavanje problema interferencije. Osim toga, neizostavno će doći do uvećanja troškova instalacije, održavanja i povezivanja sa jezgrom mreže tolikog broja baznih stanica, [4].

Poseban izazov prilikom ovog procesa predstavlja postizanje kompromisa između optimalnog smanjivanja ćelija i benefita koji se tom prilikom ostvaruju, obzirom da to može dovesti do izuzetno niske količine saobraćaja na pojedinačnim baznim stanicama. Ukoliko se dobitak prilikom denzifikacije, $\rho > 0$, definiše kao efektivno povećanje u brzini prenosa podataka u zavisnosti od povećanja gustine mreže i ukoliko se ostvari brzina prenosa R_1 pri gustini mreže λ_1 (jedinica je broj baznih stanica/ km²), tada se pri većoj gustini mreže λ_2 ostvari brzina prenosa R_2 . Tada se dobitak prilikom denzifikacije definiše kao, [4]:

$$\rho = \frac{R_2 \lambda_1}{R_1 \lambda_2} \quad (2)$$

U realnim mrežama, kako se površina pokrivanja ćelija smanjuje, manje ćelije postaju manje opterećene od makro ćelija. Tako se, prilikom denzifikacije povećava SINR (*Signal to Interference+Noise Ratio*): u šumom ograničenim mrežama zahvaljujući povećanju snage signala na prijemu, a u interferencijom ograničenim mrežama zato što malo opterećene ćelije, sa malim površinama pokrivanja stvaraju manje interferencije. Ipak, na visokim frekvencijama, dobitak SINR nije dovoljan da isprati rapidno smanjivanje iskorišćenosti ćelijskih kapaciteta, pa je stoga $\rho < 1$. U graničnom slučaju, može se smatrati da su λ_1 i R_1 konstante vrijednosti, a da $\lambda_2 \rightarrow \infty$. Tada se može smatrati da se sve ćelije nadmeću za konačan broj mobilnih stanica, zbog čega njihovo opterećenje postaje još manje, što dovodi do $\rho \rightarrow 0$, [4].

Primjer za to kako povećavanje gustine mreže može dovesti do značajnog povećanja SINR je dat u [17] gdje je pokazano da u urbanom okruženju, kada je broj baznih stanica (BS) povećan sa 36 na 96, čime je rastojanje među njima smanjeno sa 170 m na 85m, brzina na ivicama pokrivanja se povećala sa 24.5 Mb/s na 1396 Mb/s, što rezultira gustom mreže 21.3. Iako je u pitanju testno okruženje, ovaj rezultat ipak pokazuje da su izuzetna poboljšanja moguća, ali je neophodno proces denzifikacije prilagoditi određenom okruženju i modelu mreže, [4].

2.2. Prenos na frekvencijama milimetarskog opsega

Bežične komunikacije su u velikoj mjeri ograničene na relativno mali opseg frekvencija od nekoliko 100 MHz do nekoliko GHz, koje odgovaraju talasnim dužinama od nekoliko cm do 1 m. Ipak, taj opseg frekvencija je gotovo u potpunosti iskorišćen i uprkos svim benefitima denzifikacije i prebacivanja saobraćaja na druge tehnologije, neophodno je više resursa u frekvencijskom spektru. Srećom, velika količina neiskorišćenog spektra postoji u mmWave opsegu od 30 do 300 GHz, sa talasnim dužinama od 1 do 10 mm. Razlog zašto su ove frekvencije i dalje slobodne je što su smatrane nepogodnim za mobilne komunikacije, zbog slabijih propagacionih karakteristika, koje uključuju velike gubitke tokom prostiranja, atmosferske i gubitke usled kiše, slabe efekte difrakcije, slabu penetraciju kroz prepreke, veliki fazni šum i visoke cijene opreme. Preovladavalo je mišljenje da su te frekvencije pogodne za komunikaciju kratkog dometa, kao npr. u *WiFi* mrežama sa *WiGig* standardom u opsegu oko 60 GHz, [18]. Naredna glava je u potpunosti posvećena mmWave opsegu, pa će u njoj biti detaljno objašnjene karakteristike prostiranja i benefiti i problemi koje mogu donijeti 5G sistemima.

2.3. Masivni MIMO sistemi

MIMO tehnologija je uvedena u *WiFi* sisteme oko 2006. godine, a nedugo potom i u 3G mobilne mreže. MIMO podrazumijeva prostornu dimenziju komunikacije koja je moguća kada je više antena raspoloživo na predaji i na prijemu. Ako su ulazi kanalne matrice statistički dovoljno nezavisni, spektralna efikasnost se multiplicira. Do trenutka kada je razvijena 4G tehnologija, MIMO je već bio dobro utemeljen, pa je i u 4G sistemima uključen kroz mobilne stanice sa 2 do 4 antene i do 8 antena na baznoj stanici. Ipak, zbog raznih fizičkih ograničenja, brzo je dosegao svoj maksimum, pa je razvijen masivni MIMO, koji podrazumijeva više stotina adaptivnih antena. Masivni MIMO nudi značajno povećanje spektralne efikasnosti bez potrebe za denzifikacijom mreže, zahvaljujući velikim mogućnostima prostornog multipleksiranja signala od više korisnika u okviru istog vremensko-frekvencijskog resursa. Poboljšava i energetske efikasnosti sistema jer veći

dobitak antene omogućava smanjivanje snage predajnika. Pored toga, pomaže u pojednostavljivanju strukture predajnika i prijemnika zbog kvazi-ortogonalne prirode kanala između svake BS i seta aktivnih korisnika koji dijele iste signalizacione resurse. Karakteristična i potpuno digitalno procesiranje signala, čime je dobijena mogućnost mjerenja kompletnog impulsnog odziva kanala na *uplinku* i brzom odgovoru na promjene u kanalu, [19].

Osim benefita u vidu povećanja brzine prenosa podataka, masivni MIMO donosi mogućnost fokusiranja energije na jedan terminal, zahvaljujući tehnici formiranja dijagrama zračenja (eng. *beamforming*). *Beamforming* pomaže masivnim MIMO sistemima da efikasnije koriste spektar. Glavni izazov za njih predstavlja smanjivanje interferencije prilikom istovremenog prenosa više signala. *Beamforming* tehnikom se omogućava da se na osnovu predikcije kretanja i vremena pristizanja, prenosi mnogo više signala, sa značajno boljim kvalitetom. Osim toga, korišćenje *beamforminga* na frekvencijama mmWave opsega pomaže da se ublaži problem blokiranja signala, jer se koncentracijom zračenja u uzak snop mogu izbjeći prepreke koje bi u suprotnom blokirale signal, a takođe se smanjuje interferencija za druge korisnike, [10].

Ovi benefiti su donijeli masivnim MIMO sistemima glavnu poziciju prilikom diskusije o 5G, kao vodećem faktoru za omogućavanje jedinstvenog pokrivanja i pružanje podrške nižim slojevima mikro ćelija velikog kapaciteta. Ipak, da bi se to ostvarilo, prvo treba prevazići više izazova. Jedan od glavnih problema u implementaciji masivnih MIMO sistema je interferencija između pilot signala, koji prenose informacije o stanju kanala (*Channel State Information* - CSI) između baznih stanica i mobilnih terminala. Zbog ograničenog broja ortogonalnih pilot sekvenci, korisnici u susjednim ćelijama mogu dijeliti iste pilot sekvence, što uzrokuje interferenciju, pogrešnu estimaciju kanala na strani bazne stanice i, na kraju, loše performanse sistema. Pored toga, tu su i hardverski izazovi: MIMO zahtijeva radikalno drugačije strukture BS i antenskih sistema, gdje se planira veliki broj malih antena koje koriste pojačavače male snage, vjerovatno integrisane u samoj anteni. Skalabilnost, povezivanje i upravljanje antenama, kao i sama cijena realizacije su posebni izazovi. Masivni MIMO sistemi će vjerovatno egzistirati u paraleli sa više slojeva malih ćelija koje neće biti opremljeni ovom tehnologijom, što će predstavljati značajan izazov. Osim toga, dosadašnja istraživanja u oblasti MIMO sistema su bila fokusirana uglavnom na frekvencije ispod 6 GHz, dok su mmWave frekvencije znatno manje istražene, [20].

Istraženi su i operativni limiti masivnih MIMO sistema. Iako važi pravilo da dodatne antene uvijek poboljšavaju komunikaciju, granica u njihovom broju postoji i nameće je

mobilnost korisnika. U svakom intervalu koherentnosti kanala treba da budu smješteni *uplink* pilot signali i saobraćaj sa *uplinka* i *downlinka*. Kako se povećava mobilnost korisnika, smanjuje se interval koherentnosti kanala i manje pilot signala može da se smjesti. U uslovima velike mobilnosti, u makro celularnim okruženjima, kao što su npr. autoputevi, ovo ograničava dobitak prilikom multipleksiranja na nekih 10-ak terminala, ali u scenarijima sa malom mobilnošću korisnika, signali stotine ili čak hiljade terminala mogu biti multipleksirani. Tako se nameće ograničenje broja antena od 1 do nekoliko stotina u makro celularnom okruženju, ali potencijalno do nekoliko hiljada u scenarijima sa manjom mobilnošću korisnika, [21].

2.4. Modulacija

Vrsta modulacije signala i tehnike višestrukog pristupa su se značajno mijenjale kroz svaku generaciju celularnih tehnologija, i zapravo su uvijek bile glavne tehnološke odrednice istih. OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) je tako postao dominantan format za komunikaciju velike brzine, postavši standard za sve trenutne WiFi standarde, LTE, kao i DSL (*Digital Subscriber Line*) i digitalne televizije. Neke od njegovih prednosti su: otpornost na pojavu *multipath delay spreada* u okviru zaštitnog intervala, efikasna implementacija kroz FFT/IFFT blokove i jednostavne ekvilajzere, odlična koegzistencija sa MIMO sistemima, pošto OFDM dozvoljava da se interferencija od više predajnih antena rješava na nivou podnosilaca.

U OFDM-u je neophodno periodično razmjenjivati signale za sinhronizaciju i referentne signale i neophodno je da se uređaj i mreža sinhronizuju prije nego što počne razmjena paketa. Dodatno, zbog visoke *out of band* emisije neophodno je definisati i zaštitni interval za sprečavanje interferencije između susjednih kanala. Neki od njegovih nedostataka su visok odnos vršne i srednje snage (*Peak-to-Average Power Ratio*, PAPR), mada se taj problem lako prevazilazi prekodiranjem, kao što je već slučaj u LTE *uplinku*. Zatim, njegova spektralna efikasnost je zadovoljavajuća, ali bi mogla biti poboljšana na uštrb ortogonalnosti ili cikličnih prefiksa, [22]. U kontekstu 5G sistema, najviše zabrinjava primjena OFDM na frekvencijama milimetarskog opsega zbog velike širine opsega i mogućnosti razvoja efikasnih pojačavača snage na tim frekvencijama. Zato se razmatraju razne alternative OFDM-u za upotrebu u 5G komunikacionim sistemima. Ciljevi koje novi talasni oblik u 5G scenarijima treba da ostvari su: visoka spektralna efikasnost uz sposobnost pružanja

adekvatne podrške MIMO tehnici, niži nivo *out-of-band* emisije, podrška asinhronom višestrukom pristupu, manja potrošnja snage, manja hardverska složenost.

Interes za rješenja sa više neortogonalnih nosilaca je rastuće, jer ovi talasni oblici ne zahtijevaju prethodnu sinhronizaciju predajnika. Izdvaja se FBMC (*Filter Bank Multi Carrier*), koji je nastao kao odgovor na nedostatke pravougaonog *time windowinga* u OFDM-u i velike zaštitne opsege. FBMC dozvoljava robustnu estimaciju velikih propagacionih kašnjenja i proizvoljno visoke frekvencijske ofsete, dok bi za isti nivo kvaliteta OFDM zahtijevao značajno velike ciklične prefikse. Umjesto filtriranja cijelog opsega, kao što je slučaj u OFDM-u, FBMC filtrira svaki od podnosilaca posebno. FBMC nema ciklični prefiks, što rezultira visokom spektralnom efikasnošću, [4].

Osim FBMC, novi format koji se razmatra je i UFMC (*Universal Filtered Multi Carrier*) gdje se filtriranje vrši na grupi susjednih podnosilaca sa ciljem smanjenja sporednih režanja i interferencije među nosiocima koja je posledica loše sinhronizacije. Ova vrsta modulacije se može posmatrati kao poboljšanje OFDM-a sa cikličnim prefiksom. Razlikuje se u tome što, umjesto filtriranja svakog podnosioca posebno, UFMC dijeli signal u određen broj podopsega, a zatim ih filtrira. UFMC ne mora da koristi ciklični prefiks, iako se jedan može koristiti u cilju povećavanja zaštite od intersimbolske interferencije, [4].

Razmatra se i upotreba GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*), tehnike koja definiše kraće ciklične prefikse i posebno je odgovarajuća za nekontinualne frekvencijske opsege. U poređenju sa OFDM, GFDM povećava spektralnu efikasnost i ima u prosjeku za 15 dB slabije emisije van opsega. GFDM je fleksibilna tehnika i umnogome je slična OFDM-u. Omogućava bolju kontrolu emisije snage van opsega i smanjuje PAPR, [4].

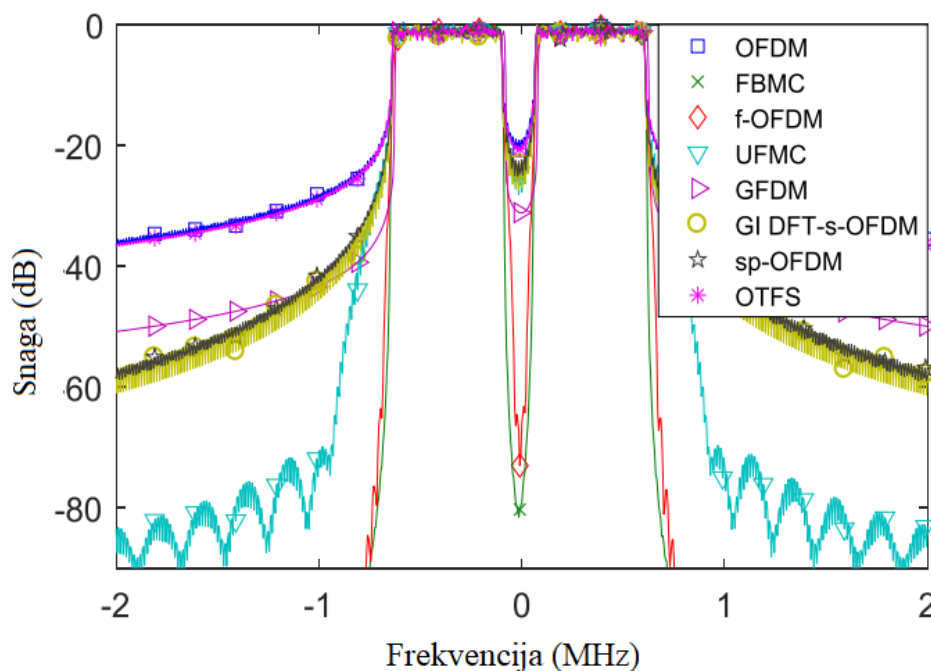
Predloženo je i korišćenje f-OFDM (*Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Kao što samo ime sugeriše, f-OFDM je vrsta OFDM-a koja koristi filtere u cilju što boljeg iskorišćenja spektra. Koristeći f-OFDM, opseg dostupan za kanal na kom će signal biti prenesen se dijeli u nekoliko podopsega. Različiti tipovi servisa se smještaju u različite podopsege sa odgovarajućim karakteristikama. Ovo značajno poboljšava iskorišćenje spektra i prilagođava ga servisima koji se prenose, [4].

Interesovanje bude i talasni oblici sa jednim nosiocem, najviše zbog razvoja nelinearnih ekvilajzera u frekvencijskom domenu u posljednje vrijeme, [4]. Naročito su interesantni u mMTC scenarijima zbog svoje energetske efikasnosti. Predstavnici te grupe su: SC-QAM (*Single Carrier Quadrature Amplitude Modulation*), čija je glavna prednost minimalan PAPR i podrška asinhronom multipleksiranju, SC-FDE (*Single Carrier Frequency*

Domain Equalization), koji pokazuje visoku spektralnu efikasnost, čak i u uslovima izraženog *multipath* fedinga, i ZT SC-FDM (*Zero tail Single Carrier Frequency Division Multiplexing*), koga karakteriše fleksibilna alokacija resursa i visoka spektralna efikasnost zbog nekorišćenja cikličnog prefiksa, [23].

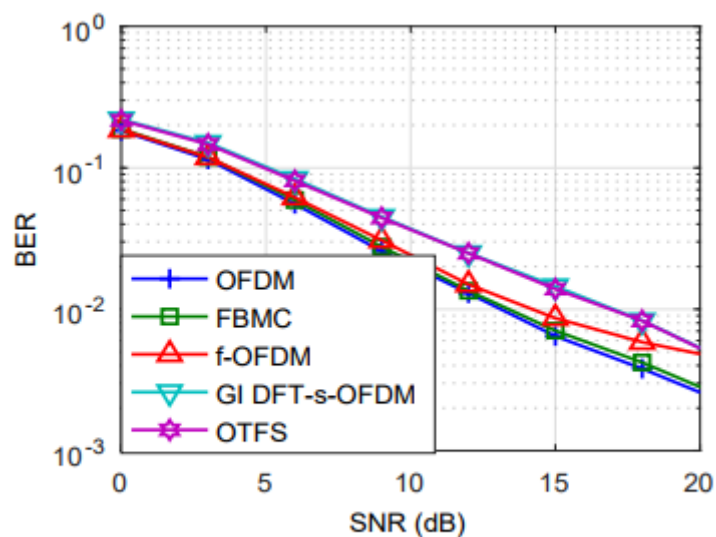
Postoji predlog i da se, za potrebe 5G, razvije posebno adaptirana verzija OFDM-a, koja bi omogućavala podešavanje različitih parametara u zavisnosti od servisa, tzv. prilagodljivi OFDM. Ukratko, veličina FFT bloka, rastojanje među podnosiocima i dužina cikličnog prefiksa bi se mogli mijenjati u zavisnosti od uslova kanala: u slučaju malog *delay spread*-a, tj. u urbanim cjelinama, rastojanje među podnosiocima bi se povećalo, veličina FFT bloka i dužina cikličnog prefiksa bi se smanjila da bi se smanjilo kašnjenje i obratno. Osim navedenih, za potrebe 5G sistema pominju se i sljedeći talasni oblici: GI DFT-s OFDM (*Guard Interval Discrete Fourier Transform Spread OFDM*), SP-OFDM (*Spectrally-Precoded OFDM*) i OTFS (*Orthogonal Time Frequency And Space*).

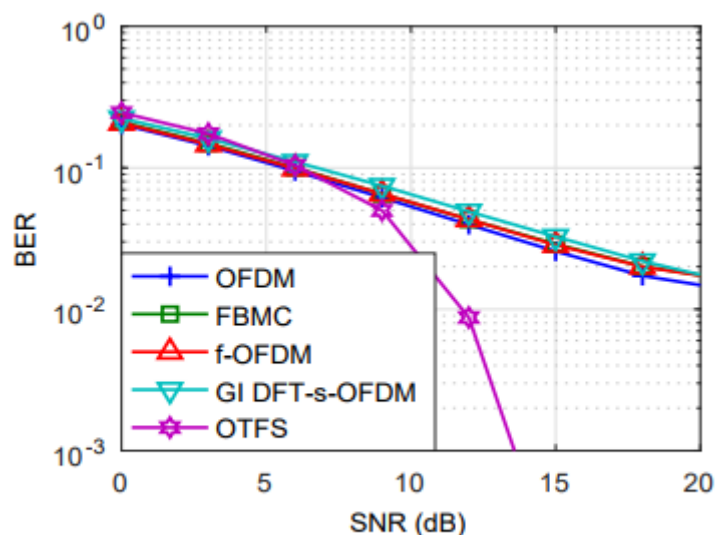
Iz svega navedenog, jasno je da OFDM pruža dobru osnovu, a da talasni oblici koji su njegova nadogradnja teže postizanju kompromisa između hardverske složenosti i dobrih performansi. Na slici 3 dato je poređenje spektralne gustine snage (*Power Spectral Density*, PSD) sistema sa tradicionalnim OFDM-om i sistema sa ostalim talasnim oblicima. Uočava se da je rasipanje snage van opsega mnogo manje kod drugih talasnih oblika nego kod OFDM-a. Najmanje rasipanje snage je zabilježeno kod FBMC i f-OFDM, [24].



Slika 3: Poređenje PSD različitih talasnih oblika

Za potrebe smanjenja tog efekta, mnogi talasni oblici koriste dodatne tehnike kao što je filtering, što može uzrokovati inter-simbolsku interferenciju (ISI). Stoga, za adekvatno poređenje neophodno je uporediti i performanse u pogledu ostvarenog BER (*Bit Error Rate*) za različite talasne oblike. Na slici 4 dat je BER u zavisnosti od odnosa signal-šum (*Signal to Noise Ratio*, SNR) kada je Doplerov *spread* 0 i kada je *spread* 300 Hz, respektivno. Sa slike 4a vidljivo je da OFDM ima najbolje performanse kada je Doplerov *spread* 0, zato što je ISI koja je uzrokovana *multipath* fedingom u potpunosti anulirana upotrebom cikličnog prefiksa. I ostali talasni oblici imaju vrlo dobre BER performanse, blago degradirane u odnosu na OFDM. Izuzetak je f-OFDM koji unosi dodatnu ISI koja ne može biti u potpunosti anulirana. Ipak, kako kanal pod uticajem brzog fedinga ne može biti potpuno tačno estimiran, na slici 4b su vidljive degradacije koje se javljaju kao posledica povećanja Doplerovog *spreada*. Izuzetak je OTFS, koji zbog posebne tehnike estimacije kanala ostvaruje bolje BER rezultate u drugom slučaju, [24].

(a) $f_d = 0$ Hz

(b) $f_d = 300$ Hz

Slika 4: Zavisnost BER od SNR za različite talasne oblike i za različite vrijednosti Doplerovog spreada, f_d

2.5 Tehnike višestrukog pristupa

Tehnike višestrukog pristupa su neophodne za podršku većem broju korisnika u mobilnim mrežama i detaljno su analizirane na nižim frekvencijskim opsezima. Različite tehnike su korišćene u dosadašnjim sistemima: tehnika višestrukog pristupa sa raspodjelom frekvencijskog domena (*Frequency Division Multiple Access* - FDMA), tehnika višestrukog pristupa sa raspodjelom vremenskog domena (*Time Division Multiple Access* - TDMA), tehnika višestrukog pristupa sa raspodjelom kodova (*Code Division Multiple Access* - CDMA) i tehnika višestrukog pristupa sa raspodjelom ortogonalnih podnosilaca (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access* - OFDMA). Ove tehnike je moguće koristiti i na frekvencijama mmWave opsega, ali uz određene izmjene, zbog kompleksnosti koju unosi značajno širi opseg, ali i zbog karakteristika kanala na ovim opsezima. Glavni ciljevi koje tehnike višestrukog pristupa treba da ostvare u 5G scenarijima su: veća spektralna efikasnost, postizanje kompromisa između budžeta linka i kapaciteta sistema, smanjivanje kontrolnog zaglavlja u cilju povećanja kapaciteta i smanjenja potrošnje energije. Zbog velike gustine konekcija koja se očekuje u 5G sistemima, istraživani su kapaciteti sistema sa ortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa, i zaključeno je da su ipak neortogonalne tehnike perspektivnije u 5G scenarijima. Njihove ključne prednosti u odnosu na ortogonalne tehnike

su veća spektralna efikasnost i manje transmisiono kašnjenje, sve zbog napuštanja ideje o ortogonalnosti podnosilaca.

Neke od značajnijih tehnika višestrukog pristupa koje se istražuju na frekvencijama mmWave opsega su, [22]:

1) Tehnika višestrukog pristupa na bazi rijetkog kodiranja (*Sparse Code Multiple Access -SCMA*)

SCMA je tehnika višestrukog pristupa koja se razmatra za upotrebu u 5G sistemima i zapravo predstavlja kombinaciju OFDMA i CDMA. U OFDMA je obično određenom korisniku dodijeljen jedan ili više podnosilaca. Međutim, ako se uz svaki nosilac dodijeli i *spreading* kod, bilo bi moguće prenositi podatke od ili ka više korisnika. Na ovaj način, više tokova (strimova) podataka koristi iste vremensko-frekvencijske resurse OFDMA signala što omogućava pristup većem broju korisnika, održavajući isti nivo spektralne efikasnosti. Dodatni benefiti koje SCMA donosi su i smanjeno kašnjenje, kao i uštede energije, [26].

2) Tehnika višestrukog pristupa sa prostornom raspodjelom (*Spatial Division Multiple Access - SDMA*)

SDMA je tehnika višestrukog pristupa koja ostvaruje dobitak multipleksirajući korisnike u prostornom domenu. Razvijena je tokom devedesetih godina prošlog vijeka, i prvi veći standard u kom je ova tehnika korišćena je IEEE 802.11ac. U idealnom slučaju, SDMA može da poveća sumarnu brzinu proporcionalno broju korisnika, ukoliko BS ima najmanje onoliko predajnika koliko je i korisnika konektovanih na nju. Jedan od većih izazova prilikom upotrebe ove tehnike je kako opslužiti više korisnika, tj. onda kada njihov broj prevazilazi broj antena. Neophodno je grupisati korisnike, tako da oni iz različitih grupa mogu pristupiti BS u istom trenutku, ali bez izazivanja povećanja interferencije, [10].

3) Tehnika višestrukog pristupa sa neortogonalnim podnosiocima (*Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA*)

Ključna ideja neortogonalnih tehnika višestrukog pristupa je korišćenje domena snage za višestruki pristup, umjesto tradicionalnog vremenskog, frekvencijskog ili domena koda.

Kao glavna mana ortogonalnih tehnika višestrukog pristupa ističe se niska spektralna efikasnost kada se resursi (npr. kanali podnosilaca) dodijele korisnicima sa lošim CSI. Sa druge strane, NOMA omogućava da svaki korisnik ima pristup svim kanalima podnosilaca, tako da resursima koji su dodijeljeni korisnicima sa lošim CSI mogu pristupiti korisnici sa dobrim CSI, što značajno povećava spektralnu efikasnost. Dalje, u poređenju sa tradicionalnim *scheduling* tehnikama koje poslužuju samo korisnike sa dobrim CSI, NOMA može da posluži korisnike sa različitim CSI u razumnom intervalu, što ide u prilog strogim zahtjevima 5G sistema za malim kašnjenjem, [26].

Na strani BS, različiti signali namijenjeni različitim korisnicima se superpozicijom sumiraju nakon kodiranja i modulacije. Više korisnika dijeli iste resurse u vremensko-frekvencijskom domenu, a na prijemu ih detektuje tehnika za poništavanje sukcesivne interferencije. Tako se spektralna efikasnost poboljšava na račun povećane složenosti prijemnika, u poređenju sa konvencionalnim ortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa, gdje se potencijalna interferencija tretira kao šum, [26].

Simulacije pokazuju da NOMA poboljšava kapacitet kanala kako na *uplinku*, tako i na *downlinku*, u poređenju sa ortogonalnim tehnikama višestrukog pristupa. Simulacije takođe pokazuju da u kombinaciji sa mmWave i MIMO, NOMA pokazuje značajna poboljšanja kapaciteta u poređenju sa postojećim LTE sistemima, [25].

NOMA u domenu snage se od konvencionalnih TDMA/FDMA/CDMA/OFDMA razlikuje zato što može da posluži više korisnika u okviru jednog resursnog bloka, tako što će ih razlikovati po nivou snage. To rezultira većom gustinom konekcija i većim protokom saobraćaja. Tehnika se zasniva na tome da se na *downlinku* prvo dekodira signal korisnika koji ima najveći nivo snage signala, dok se signali od ostalih korisnika tretiraju kao šum. Na *uplinku*, predajna snaga je ograničena na strani korisničkog uređaja. Predajne snage svakog od korisnika u okviru istog resursnog bloka se pažljivo kontrolišu tako da komponente primljenog signala na strani BS koje odgovaraju korisnicima sa boljim CSI, imaju više snage. Na prijemu (na strani BS) prvo se dekodira signal korisnika sa najvećim CSI, a zatim ostalih.

Pored ove tehnike, postoji i NOMA tehnika koja koristi više domena, koja se takođe razmatra za 5G sisteme zbog značajnog porasta broja uređaja povezanih na Internet koji se očekuje. Najpoznatiji predstavnik ove tehnike je tehnika višestrukog pristupa zasnovana na različitim šablonima (*Pattern Division Multiple Access*, PDMA) u kom se neortogonalni šabloni dodjeljuju različitim korisnicima da bi se izvršilo multipleksiranje njihovih signala. Ovi šabloni su pažljivo dizajnirani u nekoliko domena: koda, snage i prostora.

Treba naglasiti da, kao i za generalno ciljeve koje 5G sistemi treba da ostvare, i kod tehnika višestrukog pristupa mora se voditi računa za koji planirani 5G scenario će se koristiti, pošto eMBB, mMTC i URLLC servisi imaju vrlo različite zahtjeve, pa se skladno tome prilagođavaju i vrsta modulacije i tehnike višestrukog pristupa koje se koriste.

Glava 3

Karakteristike propagacije na opsezima milimetarskih talasa

Opseg milimetarskih talasa između 30 GHz i 300 GHz je u fokusu interesovanja kako telekomunikacionih operatora, tako i sistem dizajnera, zbog širokog raspoloživog opsega. Prema ITU, u opsegu od 6 GHz do 100 GHz, slobodno je skoro 63 GHz, [27]. Tolika količina raspoloživog spektra je korisna za omogućavanje servisa kao što je prenos podatka velikom brzinom i distribucija video sadržaja. Ipak, planiranje takvih sistema mora uzeti u obzir propagacione karakteristike signala na ovim frekvencijama. Dok se signali na nižim frekvencijama mogu prostirati dalje i penetrirati kroz zgrade lakše, milimetarski talasi se mogu prostirati samo nekoliko kilometara i ne mogu penetrirati čvrste materijale tako lako. Ipak, ovo ne mora biti negativna karakteristika frekvencija mmWave opsega. One omogućavaju gušće komunikacione linkove tako da im je spektralna efikasnost vrlo visoka, a mogu i povećati bezbjednost prenosa. Iako je teorijski potencijal upotrebe mmWave u mobilnim mrežama ogroman, postoji nekoliko izazova koje treba prevazići: veliko propagaciono slabljenje, veliki gubici usljed penetracije, velika potrošnja snage, blokiranje signala usled prepreka, hardverske nesavršenosti i slično.

Ipak, i pored ovih izazova, treba navesti i glavne razloge zašto je upotreba mmWave opsega poželjna za 5G sisteme. To je u prvom redu velika količina frekvencijskog spektra koja je na raspolaganju. U poređenju sa mikrotalasnim, jedan od glavnih benefita mmWave komunikacionih sistema je dostupnost širokog opsega, iako to ne vodi direktno većim brzinama prenosa podataka u šumom ograničenim okruženjima. Trenutno slobodni opsezi nisu dovoljni za projektovane brzine prenosa reda veličine Gb/s u 5G sistemima. Ipak, u

mmWave opsegu su dostupni veliki djelovi frekvencijskog spektra, sa kojim, čak i mala spektralna efikasnost od 1 b/s/Hz je dovoljna da se ostvari brzina prenosa podataka od 150 Gb/s. Mala spektralna efikasnost pojednostavljuje implementaciju i performanse na strani krajnjeg korisnika čini manje osjetljivim na hardverske nesavršenosti.

Druga značajna prednost ovih frekvencija je mala talasna dužina i uzak snop zračenja. Nasuprot signalima iz opsega ispod 6 GHz, mmWave signali imaju mnogo kraću talasnu dužinu, što olakšava smještanje većeg broja antena na istu površinu. Ovo umnogome proširuje skup mogućih primjena u budućim mobilnim komunikacionim sistemima. Istovremeno, više antena omogućava užu snop zračenja, što je dobro i sa strane bezbjednosti informacija, ali i sa strane interferencije među korisnicima. Ovo podrazumijeva da isti spektar može biti češće korišćen, zahvaljujući prostornom razdvajanju, pa više interferirajućih *point-to-point* MIMO sistema može biti postavljen u ograničenom prostoru, [28].

3.1. Propagacione karakteristike signala na frekvencijama mmWave opsega

Prilikom prenosa u slobodnom prostoru, snaga signala na prijemu se računa pomoću Fris-ove formule:

$$P_R(d) = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right) d^{-n} \quad (3)$$

gdje je P_T predajna snaga, a G_T i G_R su dobici antena na predajnoj i prijemnoj strani, respektivno. λ je talasna dužina signala, d je rastojanje na kom se vrši prenos, a n je koeficijent propagacionog slabljenja i za slobodni prostor iznosi 2. Ova formula se može aproksimativno koristiti da se opiše snaga signala i u slučaju kada između predajnika i prijemnika postoje prepreke, ukoliko se nađe takva vrijednost koeficijenta n da približno opisuje izmjereni nivo propagacionog slabljenja. n obično varira između 2 i 6.

Samo propagaciono slabljenje u slobodnom prostoru se računa kao funkcija rastojanja između predajnika i prijemnika, [4]:

$$PL(d_{km}) = 92.44 + 20 * \log_{10} f + n * 10 * \log_{10} d_{km} \quad (4)$$

gdje je d_{km} rastojanje između predajnika i prijemnika (u kilometrima), f je frekvencija nosioca (GHz), a n je koeficijent propagacionog slabljenja, koji je jednak 2.2 za frekvencije veće od 10 GHz. Osim što propagaciono slabljenje značajno varira u zavisnosti od frekvencije, velike razlike su primijećene u LOS (*Line of Sight*) i NLOS (*Non Line of Sight*) scenarijima, čak i do 30 dB.

Kako je talasna dužina mmWave talasa znatno manja od talasne dužine konvencionalnih mikrotalasnih komunikacionih signala (koji rade na frekvencijama ispod 6 GHz), propagaciono slabljenje mmWave signala mnogo je veće nego kod mikrotalasnih frekvencija, uz pretpostavku da su svi ostali uslovi isti. Tako se gubici povećavaju za skoro 14 dB na frekvenciji 28 GHz, 19 dB na frekvenciji 38 GHz i za skoro 30 dB na frekvenciji 60 GHz, u poređenju sa gubicima na 2 GHz, [27]. Povećavajući dobitak antene na obje strane moguće je umanjiti ovo značajno povećanje propagacionih gubitaka. Kako su dimenzije antena proporcionalne talasnoj dužini, više antena se može smjestiti na istu površinu. Koristeći takve antenske sisteme, veći dobitci se mogu ostvariti na manjim talasnim dužinama. Iako je propagaciono slabljenje kod mmWave značajno, u urbanim sredinama moguća je komunikacija na par stotina metara do čak par kilometara. Koristeći usmjerene antene, pokazano je da je moguća komunikacija do čak 10 km udaljenosti između predajnika i prijemnika, uz uslov dobrih vremenskih uslova i jasne vidljivosti. U suprotnom, slabljenje usled kiše i atmosferske apsorpcije povećava propagaciono slabljenje i znatno ograničava domet komunikacije.

U Tabeli I su dati koeficijenti propagacionog slabljenja za četiri frekvencije milimetarskog opsega od interesa, za okruženja sa i bez linije optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika. Dodatno, dato je i slabljenje usled kiše i apsorpcije od strane molekula kiseonika na rastojanju od 200m. Uočava se da, na datom rastojanju, opsezi od 28 GHz i 38 GHz imaju malo slabljenje usled kiše i apsorpcije od strane molekula kiseonika, dok su na višim frekvencijama, 60 GHz i 73 GHz, ova slabljenja značajna. Očekivano, u uslovima NLOS propagacije, propagacioni gubici su uvećani u odnosu na LOS scenarije, [30].

Tabela I: Propagacione karakteristike na različitim frekvencijama mmWave opsega

Opseg	n		Slabljenje usled kiše na 200m		Apsorpcija od strane molekula kiseonika na 200m
	LOS	NLOS	5 mm/h	25 mm/h	
28 GHz	1.8 ~ 1.9	4.5 ~ 4.6	0.18 dB	0.9 dB	0.04 dB
38 GHz	1.9 ~ 2.0	2.7 ~ 3.8	0.26 dB	1.4 dB	0.03 dB
60 GHz	2.23	4.19	0.44 dB	2 dB	3.2 dB
73 GHz	2	2.45 ~ 2.69	0.6 dB	2.4 dB	0.09 dB

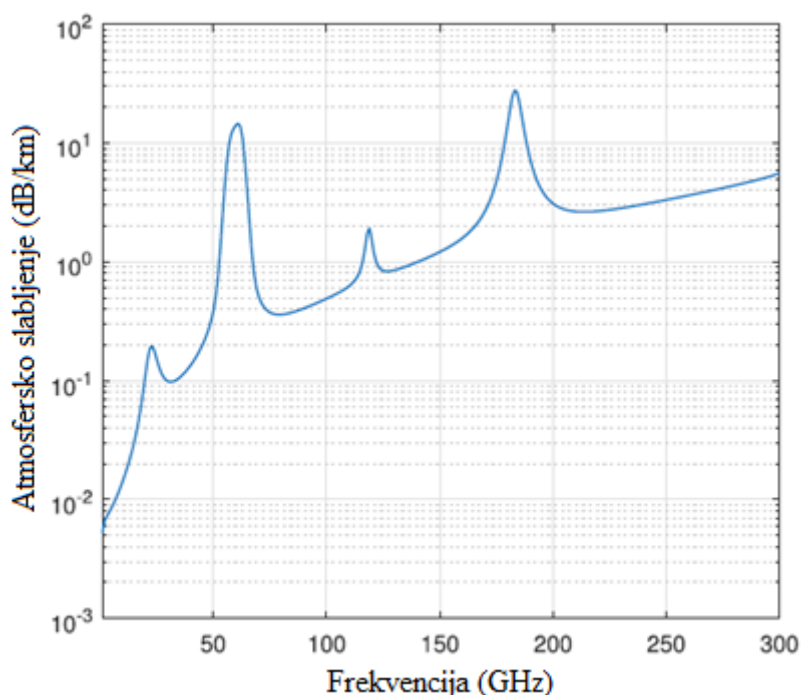
I pored neospornog potencijala koji ovaj opseg ima za ostvarivanje ciljeva u 5G, postoji dosta izazova koje je neophodno riješiti ili iskoristiti kao prednost prilikom realizacije sistema. Jedan od većih su brze fluktuacije kanala pri kojima treba omogućiti neprekidnost komunikacionog linka. Za određenu brzinu kretanja mobilne stanice, interval koherentnosti kanala se mijenja linearno sa frekvencijom nosioca, što znači da će na frekvencijama milimetarskog opsega biti veoma mali. Na primjer, Doplerov *spread* pri kretanju mobilne stanice brzinom 60 km/h na frekvenciji 60 GHz je veći od 3 kHz, što znači da će se kanal mijenjati svakih nekoliko stotina μ s, tj. mnogo brže nego u današnjim komunikacionim sistemima, [28]. Uz ostale izazove, ovo znači da će konektivnost linka biti pod stalnim izazovom da ostane neprekinuta i da će komunikacija morati da bude brzo prilagodljiva.

U nastavku su obrazloženi ostali izazovi sa kojima se susreće propagacija na frekvencijama mmWave opsega.

3.1.1 Atmosferski efekti

Na mikrotalasnim frekvencijama, transmisioni gubici su zapravo gubici u slobodnom prostoru. Međutim, u mmWave opsezima, dodatni gubici, kao što su gubici usled raznih atmosferskih pojava, ulaze u računicu. Atmosferski gubici se dešavaju kada prilikom prolaska kroz atmosferu mmWave talasi bivaju apsorbovani ili rasijani od strane molekula kiseonika, vodene pare i drugih supstituenata atmosfere. Ovi gubici su veći na određenim frekvencijama, onim koje odgovaraju mehanički rezonantnim frekvencijama molekula gasova. Ti efekti rezultiraju velikim slabljenjem i samim tim kraćim dometom komunikacionog linka.

Slika 5 pokazuje atmosfersko slabljenje mmWave signala, u zavisnosti od frekvencije nosioca. Uočljivo je da je na frekvencijama 28 GHz i 38 GHz slabljenje veoma malo (0.012 dB i 0.016 dB, respektivno, na rastojanju većem od 200m), dok je na 60 GHz slabljenje 4 dB za rastojanja preko 200m. Ovo pokazuje da je svaki od navedenih opsega pogodan za neku vrstu bežične komunikacije. Opseg oko 60 GHz je pogodan za nelicencirane *indoor* komunikacije kratkog dometa, dok se opsezi 28, 38 i 70 GHz čine pogodni za celularne komunikacione sisteme kako u pristupnom tako i transportnom dijelu, [29].

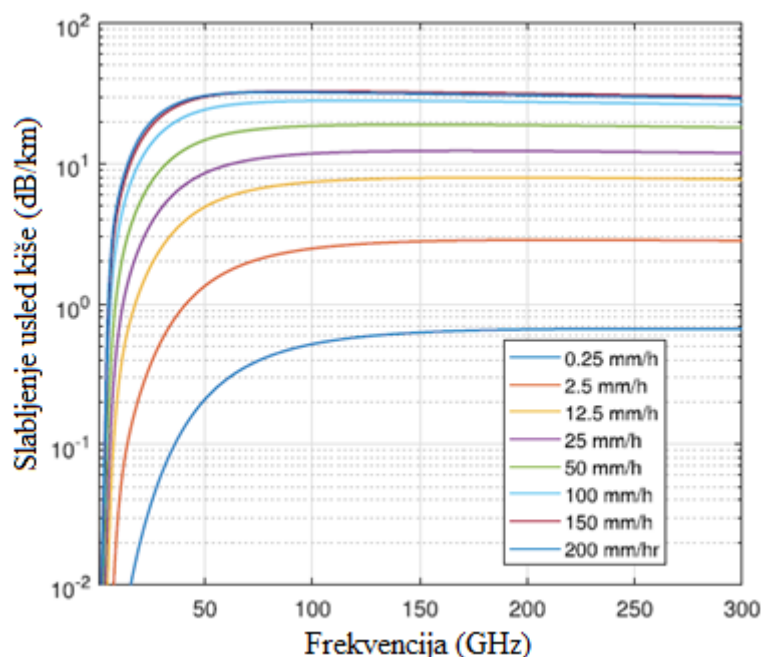


Slika 5: Atmosferska apsorpcija u različitim frekvencijskim opsezima

Od svih atmosferskih pojava, kiša ima najveći uticaj na gubitak snage tokom prostiranja mmWave signala, zbog činjenice da su kišne kapi približne veličine kao talasna dužina mmWave talasa. Da li će doći do apsorpcije ili rasijanja zavisi od relativne veličine kišnih kapi, u poređenju sa talasnom dužinom signala. Slabljenje zavisi od brzine padanja kiše, koja se obično mjeri u milimetrima po satu. Tako da slabljenje na frekvenciji od 70 GHz može varirati od 0.9 dB/km, pri slaboj kiši od 1 mm/h, do 18.4 dB/km pri jakoj kiši od 50 mm/h. Slika 6 prikazuje zavisnost slabljenja usled kiše u zavisnosti od frekvencije i jačine kiše, [10].

Slabljenje unose i druge atmosferske pojave, kao što su snijeg i grad. Dielektrična konstanta leda je mnogo manja nego kod vode, pa je rasijanje o led, grad i sniježne pahulje

mnogo manje nego rasijanje o kišne kapi. Takođe, čestice snijega apsorbuju mnogo manje snagu signala nego kišne kapi. Zbog toga je, pri istoj količini padavina, slabljenje usled snijega mnogo manje nego ono usled kiše. Takođe, slabljenje usled magle koju formiraju sitne vodene čestice u vazduhu, je zanemarljivo u poređenju sa slabljenjem usled kiše, [31].



Slika 6: Slabljenje signala usled kiše na različitim frekvencijskim opsezima

I lišće ima uticaj na propagaciju mmWave talasa, toliko jak da nekada to može biti ograničavajući faktor. Povezanost je dokazana empirijski. Za slučajeve gdje je dubina prepreke u vidu lišća i druge vegetacije manja od 400 metara, gubici se računaju kao, [32]:

$$L = 0.2 * f^{0.3} R^{0.6} [dB] \quad (5)$$

gdje je f frekvencija u MHz, R dubina prepreke u vidu lišća izražena u metrima. Jednačina je primjenljiva za frekvencije od 200 do 95000 MHz. Na primjer, za frekvenciju od 40 GHz i prepreke u vidu velikog drveća visine 10m, dobija se da su gubici usled rasipanja zbog lišća oko 19 dB.

Ipak, sve ovo ne igra presudnu ulogu za celularne mreže u urbanim zonama, gdje su planirana rastojanja između baznih stanica reda veličine 200m. Čak takve apsorpcije mogu biti od koristi, jer dodatno slabe pozadinsku interferenciju od udaljenijih baznih stanica. Glavni zaključak je da je propagacione gubitke mmWave talasa moguće prevazići, ali da

zahtijevaju velike antenske sisteme da bi se usmjerila energija snopa. Iako je fizički izvodljivo, komunikacija uskim snopom zračenja je nov koncept u celularnim komunikacijama i donosi određene poteškoće.

3.1.2 Refleksija

Ako ne postoji linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, signal ipak može doći do prijemnika putem refleksije od objekata u njegovoj blizini, ili putem prelamanja. Kratke talasne dužine mmWave talasa rezultiraju malim stepenom difrakcije. U poređenju sa mikrotalasnim područjem, ovi signali su podložniji refleksiji, naročito u NLOS scenarijima, gdje je ona glavni mehanizam prostiranja. Refleksija dosta zavisi od refleksionih osobina materijala o koji se signal reflektuje. Tako je u [29] pokazano da *outdoor* materijali imaju značajno veće koeficijente refleksije, u poređenju sa *indoor* materijalima. Kraće talasne dužine (više frekvencije) čine da se reflektujući materijal čini grubljim, što rezultira većom difuzijom signala i manje direktnom refleksijom, [28].

3.1.3 Blokiranje

MmWave signali pokazuju smanjenu podložnost difrakciji i zbog toga su mnogo više podložni blokiranju signala. Prema mjerenjima iz [29], kako rastojanje između predajnika i prijemnika raste, propagaciono slabljenje dolazi skoro do vrijednosti koju ima u slobodnom prostoru: 20dB po dekadi u LOS uslovima, a u NLOS uslovima pada za do 40dB po dekadi, pri čemu treba uračunati i dodatne gubitke usled blokiranja od 15 do 40 dB. Zbog ove osjetljivosti, link može vrlo brzo da fluktuiraju iz upotrebljivog do neupotrebljivog, i vrlo teško je prevazići taj problem. Graditi komunikacione sisteme na uskim i visoko fokusiranim snopovima je vrlo složen proces i mijenja mnoge zakone na kojima počivaju tradicionalni celularni sistemi.

Na ovim frekvencijama, ozbiljnu prepreku predstavlja i ljudsko tijelo, koje može uzrokovati slabljenje od čak 20 do 30 dB. U [33], izvođena su propagaciona mjerenja u realnim *indoor* okruženjima sa prisustvom ljudi i rezultati su pokazali da je kanal blokiran 1 do 2% vremena, ukoliko je prisutno 1 do 5 osoba. Pokazano je da efekat *shadowinga* traje veoma dugo (često više stotina ms) u poređenju sa trajanjem simbola, dok sa druge strane,

njegov intenzitet ne zavisi od broja ljudi u prostoriji, već samo od konfiguracije antena. Zato je prisustvo ljudi i njihovo kretanje, tj. položaj u odnosu na predajnik ključno za razmatranje mmWave komunikacionih sistema. Za potrebe sistema sa velikim brzinama prenosa podataka je već predloženo nekoliko rješenja, a uglavnom se zasnivaju na nekoj vrsti diverzitija. Takvo rješenje je predloženo i u ovom istraživanju, u Glavi 5.

3.1.4 Gubici usled penetracije

Mjerenja penetracijskih karakteristika i refleksije sprovedena su u urbanom okruženju, u Njujorku, na frekvencijama 28 GHz i 38 GHz, [34]. Mjerenja su pokazala da tipični materijali koji se koriste u izradi stambenih i poslovnih objekata uzrokuju velike penetracijske gubitke. Ipak, u *indoor* okruženjima to nije slučaj. U *indoor* okruženjima, iako su gubici usljed penetracije kroz staklo i zidove relativno niski na frekvenciji 28 GHz, gubici usljed penetracije kroz cigle i deblje staklo su veliki (oko 28 dB i 40 dB), što je mnogo više nego na frekvencijama mikrotalasnog opsega. Ovo potvrđuje pretpostavku da su mmWave frekvencije odličan izbor za bežične mreže u *indoor* okruženju, kao što je IEEE 802.11ad. Mjerenja refleksije pokazuju da *outdoor* materijali imaju veći koeficijent refleksije nego *indoor* materijali, što dovodi do zaključka da energija može biti zadržana u unutrašnjosti prostora. Zato je penetracija signala spolja ka unutra vrlo teško ostvariva na mmWave frekvencijama. Ali, izrazite refleksione osobine *outdoor* materijala i malo slabljenje *indoor* materijala može podržati razdvajanje spoljašnjeg unutrašnjeg pokrivanja. Visoko reflektivni *outdoor* materijali mogu da poboljšaju *outdoor* pokrivanje, [27].

3.1.5 Pokrivanje i konektivnost

Vjerovatnoća pokrivanja neke oblasti signalom je značajan pokazatelj performansi u mmWave celularnim mrežama i definiše se kao vjerovatnoća da je na prijemu moguće primiti signal sa određenim nivoom SNR, T , [10]:

$$P_c(T) = \Pr(SNR > T) \quad (6)$$

Da bi se što bolje unaprijedilo pokrivanje, istraživana je mogućnost kooperacije između baznih stanica na *downlinku* mmWave mreža. Pokazano je da kooperacija između nasumično lociranih baznih stanica može efektivno da poveća vjerovatnoću pokrivanja. Da bi se dalje unaprijedila održivost uspostavljenog linka, razvijane su razne strategije o multikonektivnosti da bi se što bolje iskoristio veliki broj malih ćelija u gustim urbanim scenarijima mmWave sistema, [35].

Benefiti multikonektivnosti su ispitivani imajući u vidu prostiranje mmWave signala u realnim urbanim oblastima. Rezultati pokazuju da čak i jednostavne šeme donose značajna poboljšanja u realnim okruženjima. Da bi se postiglo veliko pokrivanje i sigurna konektivnost u mmWave mrežama, mora se razmatrati heterogena arhitektura mreže koja se sastoji od mikro baznih stanica, koje rade na mmWave frekvencijama, i makro baznih stanica, koje rade na mikrotalasnim frekvencijama. Makro ćelije bi se koristile za signalizacionu mrežu i prenos kontrolnih kanala gdje je neophodna velika pouzdanost prenosa, dok bi mikro ćelije formirale podmrežu koja omogućava velike brzine korisnicima koje poslužuje, [10].

3.1.6 Interferencija

MmWave linkovi podrazumijevaju vrlo uske snopove zračenja. Kombinujući ih sa antenama velikog dobitka, moguće je uspješno prevazići velike propagacione gubitke. Energija predajnika se koncentriše u uzak snop upućen od predajnika ka prijemniku, smanjujući interferenciju predajnog snopa sa okolinom. Ovo omogućava upotrebu više nezavisnih linkova sa velikim nivoom fleksibilnosti i skalabilnosti. Više radio linkova, češća upotreba frekvencija i manja intereferencija značajno doprinose poboljšanju performansi komunikacionog sistema. Ipak, praktična implementacija takvog antenskog sistema na frekvencijama mmWave opsega predstavlja veliki izazov, zbog hardverskih ograničenja. Implementacija velikih antenskih sistema zahtijeva izmjene u dizajnu sistema, da bi se iskoristili dobitci i na strani predajnika i na strani prijemnika. Digitalni *beamforming* se ne može implementirati direktno na mmWave frekvencijama, zbog visoke potrošnje snage. Potrebni su hibridni dizajni, kombinovanje analognog i digitalnog segmenta, da bi se povećala fleksibilnost u dizajnu antenskih sistema i time prevazišle prepreke, [27].

3.1.7 Potrošnja energije

Po Šenonovoj jednačini za računanje kapaciteta kanala, jasno je da se predajna snaga mora povećati sa povećanjem širine opsega, ukoliko se želi zadržati isti SNR. U tu svrhu mogu biti korišćene usmjerene antene ili MIMO tehnologija za prostorno usmjeravanje glavnog snopa signala, što dovodi do povećanja dobitka antene. Iako su MIMO sistemi potpuno digitalni na opsegu ispod 6 GHz, još uvijek nisu isplativi niti jednostavni za implementaciju, zbog konvertora i pojačavača snaga. Zato se trenutno razmatraju hibridne analogno-digitalne arhitekture, gdje odgovarajuće tehnike obrade signala moraju biti redizajnirane da bi omogućile dobar kompromis između spektralne efikasnosti i potrošnje energije, tj. cijene hardvera, [10].

3.1.8 Uskopojasno zračenje

Da bi se povećao domet prenosa na frekvencijama mmWave opsega, antenski dobitak može biti ostvaren upotrebom direkcionih antena, MIMO i *beamforminga*, što uzrokuje uzak snop mmWave signala. Jasno, direkciona antena ima veći antenski dobitak u smjeru glavnog snopa zračenja, koji kompenzuje povećane propagacione gubitke i time povećava domet prostiranja signala i smanjuje vjerovatnoću prekida komunikacionog linka. Kada se vrši modelovanje direktivnosti, vrši se idealizacija: uzak glavni snop i bez bočnih snopova. Ipak, realni šabloni zračenja antena su složeniji i zavise od implementacije. Stoga, efekat bočnih snopova ne smije biti zanemaren.

3.1.9 Hardverski nedostaci i izazovi prilikom dizajna

Pored prethodno navedenih izazova treba istaći da realni predajnici imaju značajne nesavršenosti: fazni šum, nelinearnost pojačivača snage, disbalans I i Q grana. Ovi nedostaci ograničavaju kapacitet sistema, naročito kada se ima na umu da je neophodna visoka spektralna efikasnost. Sa druge strane, dokazano je da su MIMO komunikacioni linkovi manje osjetljivi na hardverske nesavršenosti, u odnosu na linkove realizovane pomoću jedne antene. Zbog visoke frekvencije, mmWave signali su osjetljiviji na fazni šum. Još jedan

izazov je nelinearnost pojačavača, jer je teško postići linearno pojačanje signala vrlo širokog opsega, [10].

3.2. Modelovanje kanala na frekvencijama mmWave opsega

Studije mmWave frekvencija datiraju još iz 19. vijeka. Eksperimente na talasnim dužinama od 5 i 6 mm su izvodili Bose i Lebedev, 1890ih godina. Što se tiče njihove upotrebe u radio komunikacijama, mmWave komunikacija je predložena u 90-im godinama 20. vijeka i ranim 2000-im, kada su rađena mjerenja kanala i dizajn sistema, [36].

Kako je talasna dužina mmWave talasa mnogo kraća u poređenju sa talasima iz opsega ispod 6 GHz, parametri radio kanala će biti znatno drugačiji. Stoga, razumijevanje propagacionih karakteristika je prvi zadatak za razvoj i dizajn mmWave sistema. Uopšteno govoreći, parametri kao što su propagaciono slabljenje, fading, *delay spread*, i *angular spread* se koriste za karakterisanje propagacije radio signala, i mogu se prikupiti kroz analizu i mjerenja u raznim okruženjima. Razna ekstenzivna mjerenja su sprovedena, za opsege frekvencija oko 10 GHz, 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz i 82 GHz.

Modelovanje kanala je važno zbog procjene i analize performansi u simulacijama. U poslednjih nekoliko godina akademska i industrijska zajednica razvili su nekoliko modela kanala za mmWave komunikacione sisteme. Neki od najistaknutijih projekata su:

1) IEEE 802.11ad model

Ovaj model je razvijen 2010.godine za potrebe *indoor* komunikacije na kratkim rastojanjima, kao što su kuće i kancelarije, na frekvenciji od 60 GHz. U pitanju je kvazi-deterministički model: LOS putanja i jednostruko i dvostruko reflektovani signali se modeluju determinističkim putem u 3D propagacionom okruženju, dok se signali dobijeni ostalim mehanizmima prostiranja modeluju stohastički kao nasumične komponente klastera. Jedna od važnijih karakteristika ovog modela je što uključuje blokiranje signala, [37].

2) Mi-WEBA model

Ovaj model je dalja razrada IEEE 802.111ad modela prema implementaciji *outdoor* komunikacije i direktne komunikacije između dva korisnička uređaja bez ili sa djelimičnim korišćenjem mrežne infrastrukture (*device-to-device*, D2D) komunikacije. Pristup je takođe kvazi-deterministički. Prvi model propagacionog slabljenja na 60 GHz u urbanom mikro scenariju je razvijen kroz Mi-WEBA. Efekat refleksije o zemlju, kao putanje koja je blizu LOS putanje se pokazala kao vrlo značajna, [38].

3) IMT-Advanced model

Ovaj model se sastoji od primarnog i dodatnog modula (koji nije isključivo za mmWave), gdje je primarni baziran na WINNER II modelu kanala, a dodatni poboljšava podršku za različite visine antena na strani bazne stanice, širinu ulica i generalno strukturu grada, [39].

4) METIS model

Ovaj model se sastoji od determinističkog, stohastičkog i hibridnog modela koji je kombinacija oba pređašnja. Stohastički model je nastavak WINNER+ modela i 3GPP-3D modela uz podršku 3D feding mapama, mmWave parametrima i frekvencijski zavisnim modelima propagacionog slabljenja. Zahvaljujući iscrpnim mjerenjima, dostupni su parametri kanala na frekvencijama ispod 6 GHz i od 50 do 70 GHz, [40].

5) mmMAGIC model

Ovo je statistički model kanala koji obuhvata opseg od 6 do 100 GHz uz mnoštvo scenarija u kojima se može primijeniti. Ovaj model koristi teorijski pristup već postojećeg 3GPP 3D modela kanala i unapređuje ga na sljedeće načine: značajno poboljšava distribuciju i tačnost glavnih i sporednih putanja, uključuje realističnu neuniformnu distribuciju amplituda putanja, konzistentan je za cijeli opseg od 6 do 100 GHz, uključuje modele antena

koje zavise od frekvencije, obezbjeđuje kontinuirane varijacije u zavisnosti od vremena, uključuje nasumično blokiranje signala kao i rasipanje i refleksiju od poda, [41].

6) 3GPP-like 5G model

U [42], *outdoor* model je uspostavljen za opseg od 6 do 100 GHz. Inicijalni 3D model kanala uključuje tipičan urbani scenario sa mikro i makro ćelijama i osnovni model koji uključuje propagaciono slabljenje, fading, vjerovatnoću ostvarivanja LOS konekcije, gubitke usljed penetracije i blokiranje signala. Takođe, uključuje i *indoor* model za kancelarije i trgovinske centre. Ovaj model obezbjeđuje i podršku za dvodimenzionalne antenske sisteme, i to dodavanjem elevacije, što pogoduje modelovanju budućih 5G sistema.

7) ITU-R M model

Ovaj model kanala, [43], je baziran na 3GPP SCM (*3GPP Spatial Channel Model*, model kanala na 2 GHz), i dalje ga produbljuje modelovanjem atmosferskih gubitaka i antenskih sistema u gusto naseljenim urbanim okruženjima. Fokusiran je na mobilnost korisnika i gusto naseljene urbane oblasti gdje su neophodne visoke brzine prenosa podataka: kancelarije, trgovački centri, gradski trgovi i slično.

8) QuaDRiGa (*Quasi Deterministic Radio Channel Generator*) model

Ovaj model je razvijen da bi omogućio modelovanje MIMO kanala za mreže određene konfiguracije, kao što su *indoor*, satelitske ili heterogene mreže. U pitanju je geometrijski stohastički model koji se oslanja na 3GPP SCM i WINNER. Ovaj model mmWave kanala donosi podršku za kontinuiranu mobilnost korisnika i masivni MIMO na više frekvencija (10, 28, 43, 60, 82 GHz), [44].

9) COST 2100

Ovo je geometrijski stohastički model kanala koji može da reprodukuje stohastičke karakteristike MIMO kanala kroz vrijeme, frekvenciju i prostor. Ovaj model kanala uključuje

prepreke u simulacionim scenarijima, i analizira koja *multipath* komponenta može stići do određene mobilne stanice u određenom vremenskom i frekvencijskom intervalu, [45].

10) NYU WIRELESS

Ovaj model kanala je baziran na mjerenjima u Njujorku i podržava frekvencije 28, 38, 60 i 73 GHz, kako u *outdoor* tako i u *indoor* okruženjima. Uključuje i modelovanje blokiranja kanala, LOS/NLOS okruženje, i implementirano je u NYU mmWave modulu za ns-3 simulacioni alat.

Glava 4

Analiza performansi mmWave komunikacionih sistema

Simulacioni alat koji je korišćen u ovom istraživanju je ns-3, tačnije njegov modul za frekvencije milimetarskog opsega. ns-3 je mrežni simulator baziran na programskom jeziku C++, u kojem je implementirano mnoštvo mrežnih protokola sa različitih nivoa komunikacione mreže, zbog čega je posebno pogodan za simulaciju komunikacije između različitih nivoa mreže. Sadrži module za simuliranje WiFi, WiMAX, LTE i drugih mreža. Njegov mmWave modul je jedan od prvih koji je pružio mogućnost simulacije potencijalnih 5G mreža. Razvijen je od strane Univerziteta u Njujorku, 2015.godine, [46]. Iako u mnogome predstavlja nadogradnju LTE modula, ipak je ponudio vrijedan uvid u mogućnosti i domete koji se mogu očekivati od mmWave komunikacionih sistema.

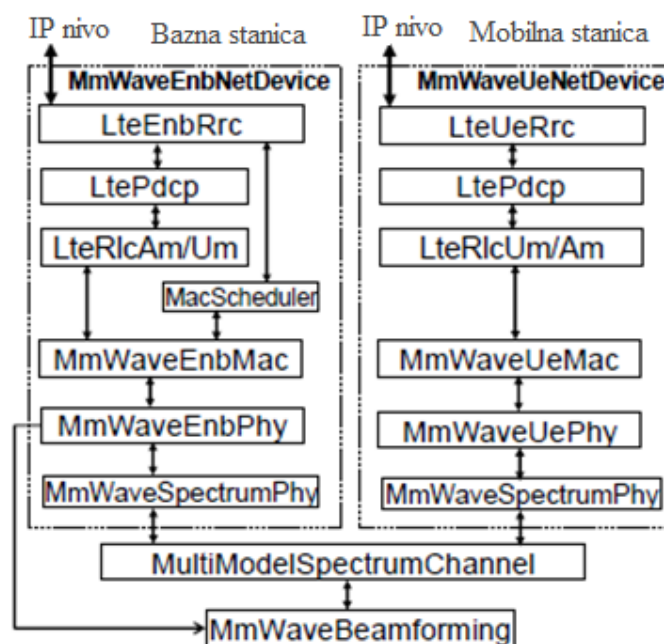
Da bi simulacija bila vjerodostojna, neophodno je precizno okarakterisati model kanala. Ovaj modul obuhvata tri modela kanala na frekvencijama 28 GHz i 73 GHz. To su:

1. model Univerziteta u Njujorku, baziran na mjerenjima u istom gradu,
2. model napravljen korišćenjem *ray-tracing* softvera i
3. 3GPP TR 38.900 model kanala

Takođe, podržava i povezivanje sa LTE modulom u cilju analize komunikacije između različitih celularnih mreža, kao i krajnjih performansi 5G mmWave sistema. Simulacioni alat pruža mogućnost prilagođavanja modela kanala, i to podešavanjem parametara kao što su: frekvencija nosioca, širina opsega, struktura frejma, model propagacije, broj antena, zahtijevani BER i drugih parametara koji karakterišu mmWave kanal. Dodatno, nudi mogućnost definisanja parametara okoline, pa se tako može definisati više vrsta prepreka od

različitih materijala, način kretanja mobilne stanice (MS) i slično. U ovom istraživanju korišćen model kanala Univerziteta u Njujorku, koji je baziran na iscrpnim mjerenjima u Njujorku na frekvencijama 28 GHz i 73 GHz, [47]. Ovaj model ujedno predstavlja i prvi detaljni statistički model mmWave kanala za više parametara, uključujući propagacione gubitke, prostorne karakteristike i vjerovatnoću prekida linka. Model je otkrio da signali na ovim frekvencijama mogu biti detektovani na 100 do 200 metara od potencijalne pozicije BS, čak i bez linije optičke vidljivosti između komunikacionih terminala. Drugi važan rezultat ovih mjerenja je i analiza kapaciteta mmWave sistema. Predikcije predviđaju da će kapacitet sistema baziranih na ovom modelu biti za red veličine veći od postojećih 4G sistema, uz razumne pretpostavke o poboljšanjima koja će donijeti novi vidovi antena, beamforminga i širi opseg, [47].

Na slici 7 je dat pojednostavljen prikaz objekata pomoću kojih su definisani BS i MS u simulacionom alatu i pokazuju način na koji se odvija proces komunikacije između njih, na različitim definisanim nivoima. Objekti *MmWaveEnbPhy* i *MmWaveUePhy* modeluju fizički nivo sa strane bazne i mobilne stanice, respektivno, [46].



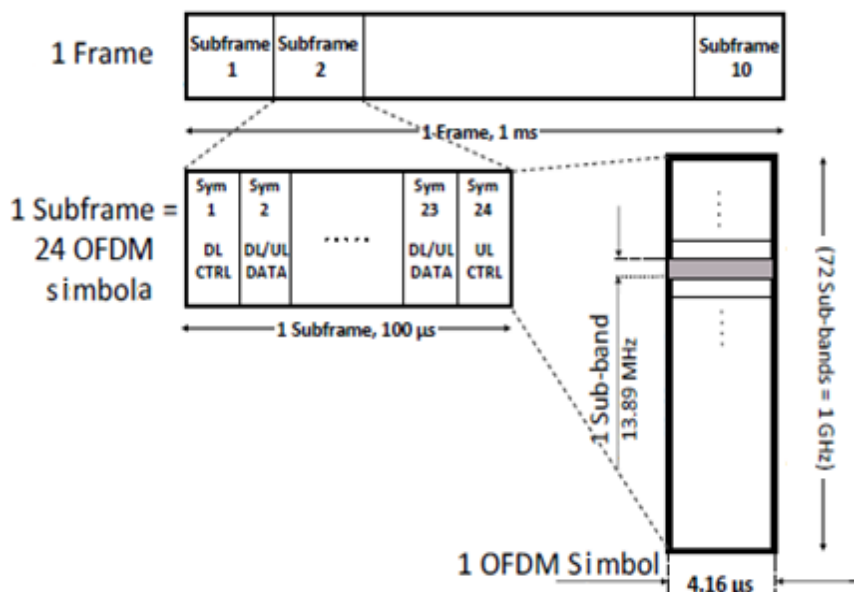
Slika 7: Pojednostavljeni dijagram mmWave ns-3 modula

Ukratko, na fizičkom nivou se odvija prenos i prijem signala, inicira početak i kraj frejmova

(eng. *frame*), podfrejmova (eng. *subframe*) i slotova i dalje isporučuju MAC nivou paketi i kontrolne poruke primljene putem kanala, izračunavaju metrike kao što je SINR.

Najistaknutije funkcionalnosti koje su implementirane u simulacionom alatu na fizičkom nivou su: potpuno prilagodljiva struktura TDD (*Time Division Duplex*) frejma, karakteristike radio kanala koje uključuju feding, podršku za MIMO i *beamforming*, dekodiranje grešaka na prijemu, model interferencije i povratna sprega za adaptaciju kanala.

Iako nije u potpunosti potvrđeno, vrlo je izvjesno da će se u 5G sistemima koristiti TDD umjesto FDD (*Frequency Division Duplex*) zbog potrebe za što manjim kašnjenjem. Iz tog razloga, struktura frejma je znatno promijenjena ne bi li odgovorila toj potrebi. Predloženo je kraće trajanje simbola i kraće trajanje slotova da bi se smanjilo kašnjenje na radio linku. Struktura TDD frejma je dizajnirana tako da bude konfigurabilna i da bude prilagodljiva različitim servisima. Struktura frejma i podfrejma je donekle slična onoj u LTE tehnologiji, u smislu da je svaki frejm podijeljen u fiksni broj podfrejmova, koji dalje prenose određeni broj simbola na više frekvencijskih podnosilaca (Slika 8).



Slika 8: Predložena struktura mmWave frejma

Ipak, u ovom simulacionom alatu je dozvoljena potpuna fleksibilnost, pa je moguće prilagođavati značajan broj parametara koji karakterišu fizički nivo (Tabela II). U ovom istraživanju, struktura frejma je definisana na sljedeći način. Svaki frejm traje 1 ms i podijeljen je u 10 podfrejmova, koji traju po 100 μs i koji nose po 24 OFDM simbola, od

kojih svaki traje 4.16 μ s. Prvi i poslednji simbol u podfrejmu su namijenjeni DL i UL kontrolnim kanalima, respektivno. Zaštitni period u trajanju od jednog simbola se uvodi svaki put kada se smjer prenosa podataka promijeni, iz *downlinka* u *uplink* ili obratno. U frekvencijskom domenu, opseg od 1 GHz je podijeljen u 72 podopsega širine 13.89 MHz, od kojih svaki ima 48 podnosilaca, [46].

Tabela II: Parametri fizičkog nivoa

Parametar	Vrijednost	Opis
<i>SubframePerFrame</i>	10	Broj podfrejmova u frejmu
<i>SubframeLength</i>	100	Trajanje jednog podfrejma (μ s)
<i>SymbolsPerSubframe</i>	24	Broj OFDM simbola po podfrejmu
<i>SymbolLength</i>	4.16	Trajanje OFDM simbola (μ s)
<i>NumSubbands</i>	72	Broj podopsega
<i>SubbandWidth</i>	13.89	Širina podopsega (MHz)
<i>SubcarrierPerSubband</i>	48	Broj podnosilaca u svakom podopsegu
<i>CenterFreq</i>	28/73	Frekvencija nosioca (GHz)
<i>NumRefScPerSymbol</i>	864	Broj referentnih podnosilaca po podfrejmu
<i>NumDlCtrlSymbols</i>	1	Broj kontrolnih simbola po podfrejmu u UL
<i>NumUlCtrlSymbols</i>	1	Broj kontrolnih simbola po podfrejmu u DL
<i>GuardPeriod</i>	4.16	Zaštitni interval za prelaske iz UL u DL
<i>NumHarqProcesses</i>	20	Broj HARQ procesa za DL i UL

U mmWave modulu, računanje propagacionih gubitaka je definisano u zavisnosti od stanja kanala, pa se tako u LOS scenariju gubici računaju po formuli, [46]:

$$PL = P_{Tx} - P_{Rx} + G_{Tx} + G_{Rx} \quad (7)$$

gdje je P_{Tx} predajna snaga, P_{Rx} snaga na prijemu, a G_{Tx} i G_{Rx} dobiti predajnih i prijemnih antena. U ovim mjerenjima P_{Tx} je 30 dBm, a G_{Tx} i G_{Rx} po 24.5 dBi. Korišćene su visoko usmjerene antene sa 10 stepeni širine snopa u horizontalnoj i vertikalnoj ravni. Za NLOS scenarije, propagacioni gubici se računaju po formuli, [46]:

$$PL(d)[dB] = \alpha + \beta * 10 * \log(d) + \xi, \xi \sim N(0, \sigma^2) \quad (8)$$

gdje je d rastojanje u metrima, α i β su izračunati iz mjerenja na terenu, a σ^2 je varijansa lognormalnog fedinga. Vrijednosti ovih parametara u različitim scenarijima i u zavisnosti od frekvencije nosioca su date u Tabeli III.

MmWave kanal je u simulacionom alatu modelovan kombinacijom klastera, od kojih se svaki sastoji od više putanja. Matrica kanala se zapisuje kao, [46]:

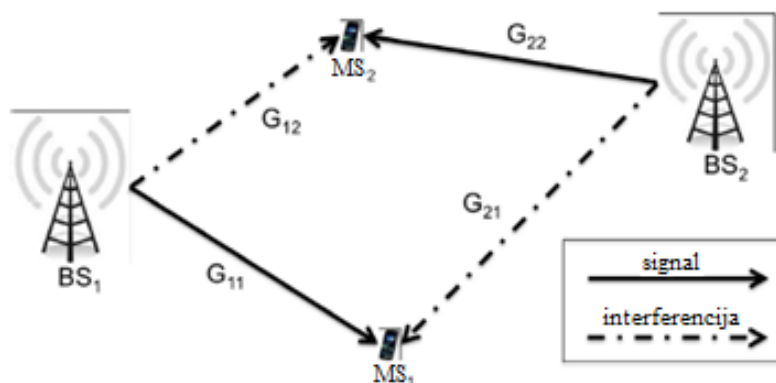
$$H(t, f) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L g_{kl}(t, f) * u_{rx}(\theta_{kl}^{rx}, \varphi_{kl}^{rx}) * u_{tx}^*(\theta_{kl}^{tx}, \varphi_{kl}^{tx}) \quad (9)$$

gdje je K broj klastera, L broj putanja u klasteru, $g_{kl}(t, f)$ je multipath feding; $u_{rx}()$ i u_{tx} su prostorna funkcija antenskog sistema na prijemu i na predaji, respektivno.

Na osnovu matrica kanala, proračunava se vektor zračenja, kako za predajnik, tako i za prijemnik. Dobitak usljed korišćenja *beamforminga* od predajnika i ka prijemniku j se računa kao, [46]:

$$G(t, f)_{ij} = |w_{rx,ij}^* * H(t, f)_{ij} * w_{tx,ij}|^2 \quad (10)$$

gdje je $H(t, f)_{ij}$ kanalna matrica ij linka, $w_{tx,ij}$ je *beamforming* vektor predajnika i kada prenosi podatke prijemniku j , a $w_{rx,ij}$ je *beamforming* vektor prijemnika j kada prima podatke od predajnika i . Zbog visoke direktivnosti antena koje se koriste, interferencija nema toliko degradirajuću ulogu u mmWave komunikacionim sistemima, ali ona je i dalje značajan faktor koji se mora uzeti u obzir prilikom simulacije. Zato se pri proračunu interferencije u ovom simulacionom alatu uzimaju u obzir i *beamforming* smjerovi povezani sa svakim linkom. Primjer je dat na slici 9, gdje je prilikom proračuna SINR između BS_1 i MS_1 , prvo potrebno izračunati dobitke povezane, kako sa korisnim, tako i sa interferirajućim signalom.



Slika 9: Model interferencije

Koristeći jednačinu (10), dobijamo:

$$G_{11} = |w_{rx,11}^* * H(t, f)_{11} * w_{tx,11}|^2 \quad (11)$$

$$G_{21} = |w_{rx,11}^* * H(t, f)_{21} * w_{tx,22}|^2 \quad (12)$$

Odakle se može izračunati SINR:

$$SINR_{11} = \frac{\frac{P_{tx,11}}{PL_{11}} G_{11}}{\frac{P_{tx,22}}{PL_{21}} G_{21} + BW * N_0} \quad (13)$$

gdje je $P_{tx,11}$ predajna snaga BS_1 , PL_{11} su propagacioni gubici prilikom propagacije signala između BS_1 i MS_1 , a $BW * N_0$ je termalni šum.

Komunikacija između mobilne i bazne stanice u simulacionom alatu realizovana je tako da se u prvom koraku određuje stanje kanala, koje se ažurira na osnovu relativne pozicije predajnika, prijemnika i prepreka, kako se MS kreće kroz definisanu okolinu. Zamišljena linija se povlači od predajnika ka prijemniku i, ako ta linija presijeca neku od prepreka, smatra se da je stanje kanala NLOS, u suprotnom je LOS. U simulaciji je uključeno i treće stanje linka: prekid. U slučaju prekida pretpostavlja se da link između predajnika i prijemnika nije uspostavljen, tj. da je propagaciono slabljenje beskonačno veliko. Definišući novo stanje koje se događa sa određenom vjerovatnoćom, ovaj model bolje oslikava realno stanje prilikom propagacije mmWave signala. Statistički, funkcije vjerovatnoće svakog od tri stanja su definisana kao, [47]:

$$p_{out}(d) = \max(0, 1 - e^{-a_{out}d + b_{out}}) \quad (14a)$$

$$p_{LOS}(d) = (1 - p_{out}(d))e^{-a_{los}d} \quad (14b)$$

$$p_{NLOS}(d) = 1 - p_{out}(d) - p_{LOS}(d) \quad (14c)$$

gdje se parametri a_{out} , a_{LOS} i b_{out} parametri koji su izračunati zahvaljujući mjerenjima na terenu, [47]. Njihove vrijednosti su date u Tabeli III.

Tabela III: Propagacioni parametri NYU modela kanala

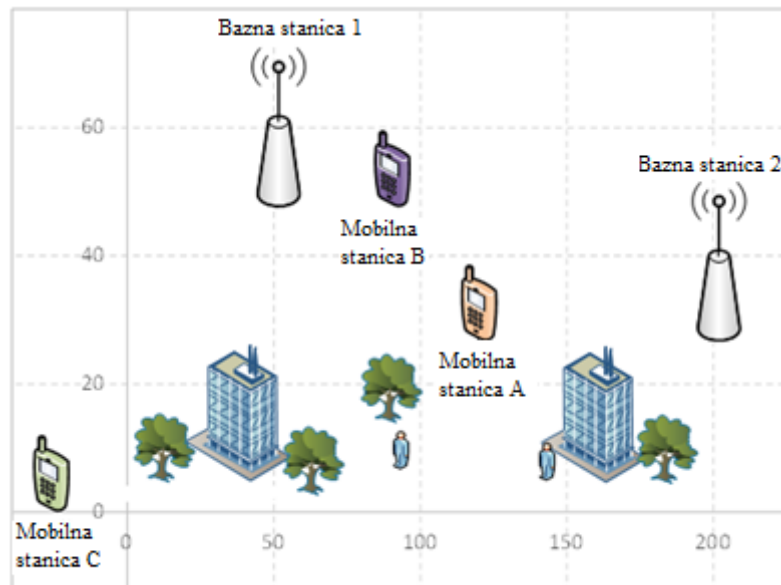
Promjenljive	Vrijednosti parametara	
	28 GHz	73 GHz
Omnidirekciono propagaciono slabljenje i lognormalni fading	NLOS:	NLOS:
	$\alpha=72, \beta=2.92, \sigma=8.7$ dB	$\alpha=82.7, \beta=2.69, \sigma=7.7$ dB
	LOS:	LOS:
	$\alpha=61.4, \beta=2, \sigma=5.8$ dB	$\alpha=69.8, \beta=2, \sigma=5.8$ dB
Vjerovatnoća stanja: NLOS, LOS i Prekid linka	$1/a=30$ m, $b=5.2$, $1/c=67.1$ m	

Nakon prijema paketa, na fizičkom nivou se proračunava SINR primljenog signala, uzimajući u obzir dobitke ostvarene putem MIMO *beamforminga*. Nakon toga, na fizičkom nivou na strani mobilne stanice se izračunati SINR mapira u CQI vrijednost, koji se kao informacija vraća nazad do bazne stanice za potrebe alokacije resursa. Pretpostavlja se da se kontrolni signali prenose idealno, tj. bez gubitaka. Na fizičkom nivou je takođe implementiran model greške, gdje se pomoću principa vjerovatnoće određuje da li paket treba da bude odbačen ili ne. Ispravno primljeni paketi se prosleđuju na MAC nivo, na kojem je, između ostalog funkcionalnosti, implementiran HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*), dvije vrste *scheduling* algoritma i adaptivna modulacija i kodiranje. Definisani su i viši nivoi protokol *stack-a*: RLC (*Radio Link Control*), PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), RRC (*Radio Resource Control*).

4.1 Simulacioni scenariji

Zbog ograničenog dometa mmWave signala, većina aplikacija celularnih mmWave sistema fokusira se na ćelije malih dimenzija, pretpostavljajući *outdoor* okruženje sa linijom vidljivosti između predajnika i prijemnika. Za potrebe evaluacije performansi ranije opisanog sistema i njegovog potencijala da isporuči brzine prenosa podataka koje se očekuju od 5G tehnologije, kreirana su tri realna scenarija. Kako se eMBB servisi primarno fokusiraju na korisnike koji su stacionarni, ili se kreću malom brzinom (šetnja ili ubrzan hod), dva scenarija uključuju takvu vrstu kretanja, a u trećem scenariju su analizirane performanse servisa u slučaju kada se korisnik kreće srednjom brzinom. Sva tri scenarija su analizirana za oba

frekvencijska opsega dostupna u simulacionom alatu, 28 GHz i 73 GHz. Okruženje u kom su smješteni je gradski trg, sa tri bazne stanice koje ga pokrivaju. Pozicije baznih i mobilnih stanica su prikazane na Slici 10. Simulirano vrijeme prenosa podataka je 80 sekundi u sva tri scenarija.



Slika 10: Simulaciono okruženje

Sljedeći scenariji su analizirani:

Scenario A

U scenariju A je primijenjen *Constant Position* model kretanja MS, koji podrazumijeva da se svake 2 sekunde MS pomjeri za 5 metara duž x ose, a da je stanica između tih kretanja statična. Početna pozicija MS koja prati ovaj model je prikazana na Slici 10 i označena je sa "*Mobilna Stanica A*".

Scenario B

U scenariju B je primijenjen *Constant Velocity* model kretanja MS, koji podrazumijeva da se MS kreće duž x ose konstantnom brzinom od 36 km/h. Za vrijeme trajanja simulacije, MS u ovom scenariju pređe 800 metara. Početna pozicija MS koja prati ovaj model je prikazana na Slici 10 i označena je sa "*Mobilna Stanica B*".

Scenario C

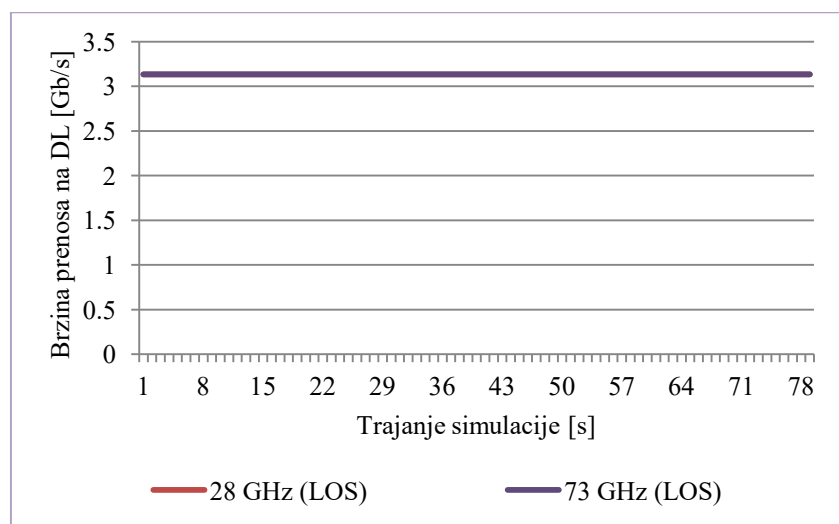
U scenariju C je primijenjen *Random walk* model kretanja MS-a, koji podrazumijeva da se MS kreće brzinom 1.5 m/s u definisanoj oblasti, ali u nasumičnim smjerovima. Tokom 80 sekundi koliko traje simulacija, smjer se mijenja 120 puta. Takođe, ovaj scenario uključuje prepreke: dvije zgrade i 6 prepreka koje modeluju ljude i drveće. Obje zgrade su definisane kao rezidencijalni objekti na 4 sprata i sa po jednom prostorijom na spratu. Definisano je da su spoljašnji zidovi napravljeni od betona i da imaju prozore. Početna pozicija MS koja prati ovaj model je prikazana na Slici 10 i označena je kao "*Mobilna Stanica C*".

4.2 Rezultati simulacije

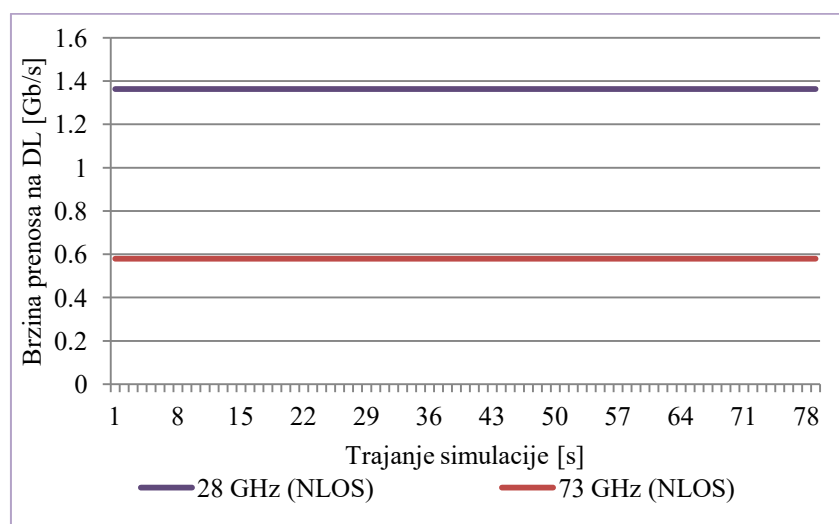
4.2.1 Scenario A: statična mobilna stanica

Rezultati simulacije za ovaj scenario pokazuju da se, u slučaju manje pokretnih MS, sa dobrim pokrivanjem i LOS vidljivošću, postignuta brzina prenosa podataka ne mijenja kako se frekvencija nosioca povećava, Slika 11. Zapravo, u oba slučaja, brzine prenosa podataka su konstantne i dostižu maksimum koji simulacioni alat dozvoljava. Razlog ovome je što alat za sve linkove sa SINR vrijednošću većom od 20.5 dB, koristi modulaciju najvećeg stepena čime se postiže maksimalna brzina.

U NLOS slučaju, (Slika 12) prosječna brzina prenosa podataka je takođe konstantna, ali značajno niža. Takođe, različite propagacione karakteristike na različitim frekvencijama nosioca dolaze do izražaja, pa je tako prosječan SINR na frekvenciji od 73 GHz za 55% manji od prosječnog SINR na 28 GHz. Rezultati su ohrabrujući, obzirom da je ovo primarni scenario na koji se eMBB servis fokusira: otvoreni prostori bez ili sa vrlo malo prepreka, ali sa mnoštvom konektovanih uređaja, kao što su gradski trgovi, koncertne i sportske dvorane i slično.



Slika 11: Scenario A: LOS

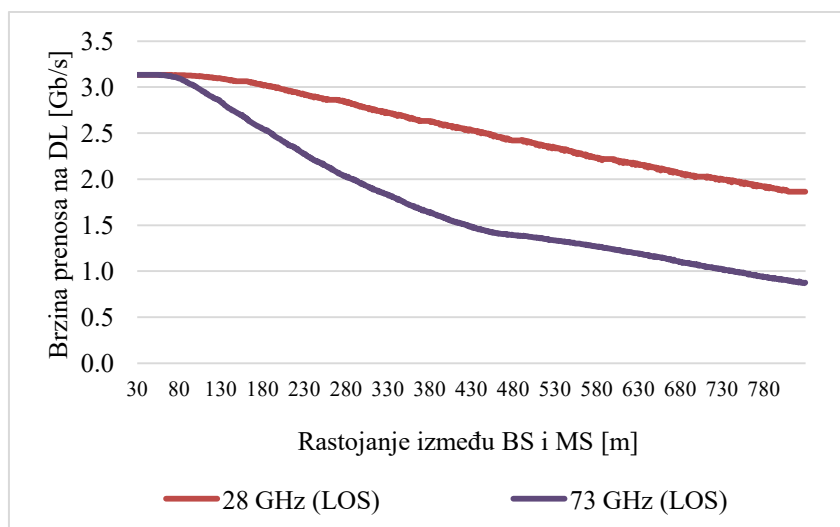


Slika 12: Scenario A: NLOS

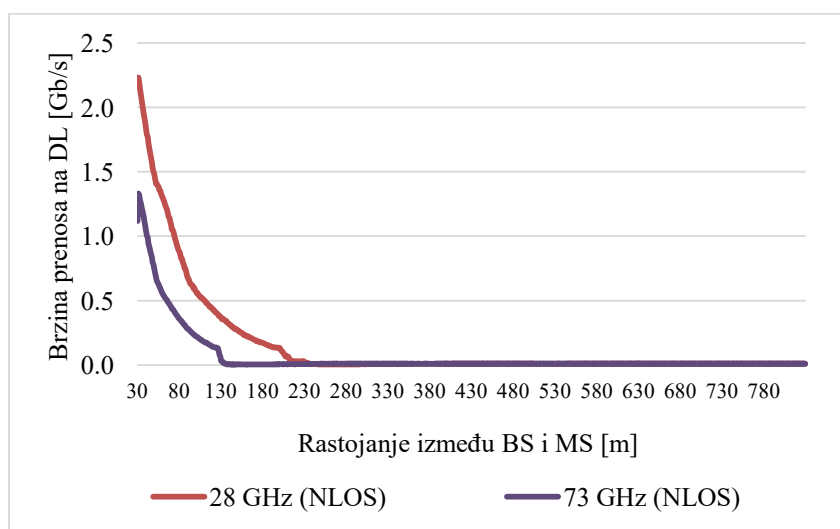
4.2.2 Scenario B: kretanje MS konstantnom brzinom

Ovaj scenario pokazuje uticaj koji rastojanje između BS i MS ima na brzinu prenosa podataka na *downlinku*. Kao što je prikazano na slici 13, brzina prenosa podataka na 28 GHz i 73 GHz je konstantna samo dok je rastojanje manje od 100 metara. Nakon toga, brzina se smanjuje i na kraju putanje, kada je rastojanje između BS i MS 830 m, iznosi 60% početne brzine. Na 73 GHz je brzina degradacija veća, što rezultira smanjenjem od 70%. Ipak, i na 830 m, korisnici su još uvijek mogli da ostvare značajne brzine, oko 2 Gb/s na 28 GHz i oko 1 Gb/s na 73 GHz. U NLOS scenariju, slika 14, potvrđeni su rezultati iz [47]: signal je

detektovan i na više od 100m od BS (230m za frekvenciju od 28 GHz i 130m za frekvenciju 73 GHz).



Slika 13: Scenario B: LOS

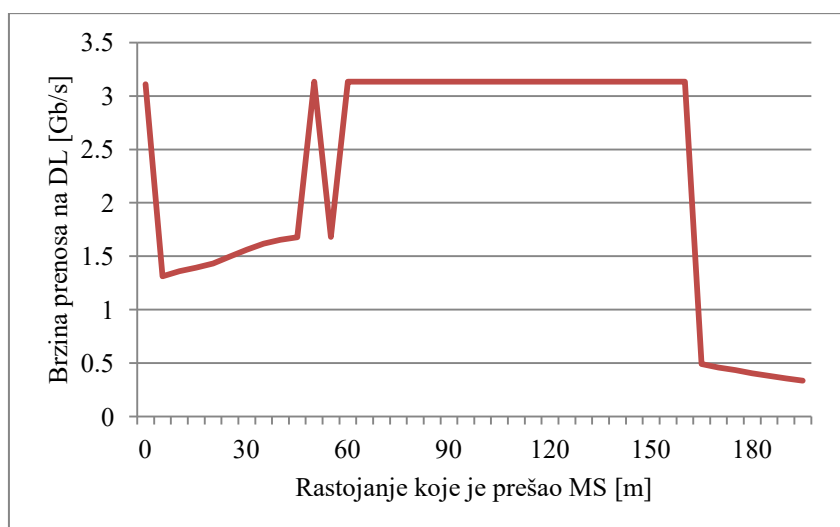
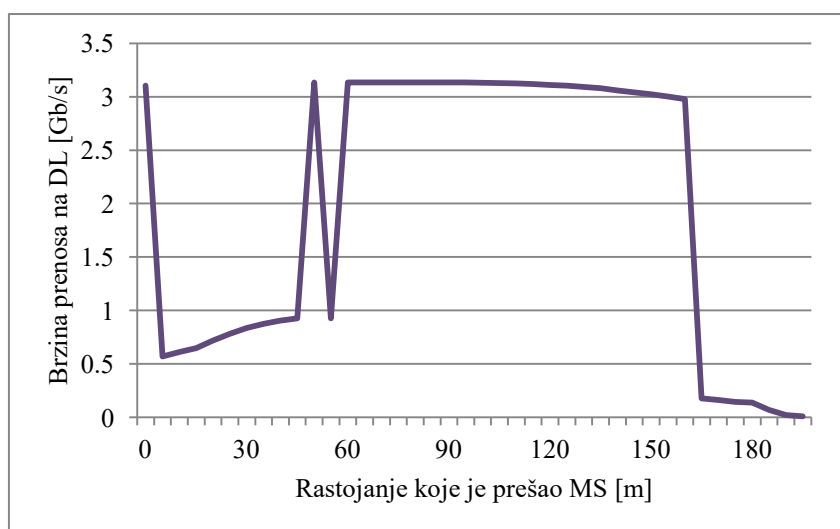


Slika 14: Scenario B: NLOS

4.2.3 Scenario C: nasumično kretanje MS

Ovaj scenario uključuje prepreke i MS koja se kreće brzinom kao prosječan pješak, bez definisane putanje i u nasumičnim smjerovima. Zbog nepredvidive prirode kretanja, ovaj scenario uključuje samo NLOS scenario. Grafici na slikama 15 i 16 pokazuju da bilo kakva vrsta prepreke značajno slabi performanse na prijemu: prva degradacija brzine prenosa

podataka se desila zbog blokiranja usled nailaska na zgradu, a druga zbog nailaska na ljude i drveće. Ovi rezultati su u skladu sa prethodno opisanim propagacionim karakteristikama mmWave talasa, čime se potvrđuje njihova osjetljivost na bilo kakvu vrstu prepreke.

Slika 15: Scenario C, $f_c = 28 \text{ GHz}$ Slika 16: Scenario C, $f_c = 73 \text{ GHz}$

U Tabeli IV su sumirani rezultati sva tri scenarija, za obje frekvencije nosioca koje su razmatrane. Prikazan je prosječan ostvareni SINR, kao i prosječna brzina prenosa podataka na *downlinku*, za LOS i NLOS scenarije. Uočava se da je povećavanje frekvencije imalo sličan efekat na *Constant Velocity* i *Random Walk* scenarije, gdje je brzina prenosa smanjena za 50% za NLOS konekcije. Za LOS scenarije, ove degradacije su znatno blaže, od 10% do

30%. Iz ovih rezultata se zaključuje da u NLOS *Constant Velocity* scenariju mmWave model ne može ispuniti ciljeve koji su definisani za 5G, u pogledu brzine prenosa podataka. Rezultati u tom scenariju su reda veličine kao u LTE mrežama, što potvrđuje tezu da su mmWave komunikacije primarno namijenjene za korišćene u odličnim i stabilnim radio uslovima. Sa druge strane, u svim LOS scenarijima postignuti su odlični rezultati što dokazuju da se u takvim uslovima 5G ciljevi zaista mogu postići uz korišćenje frekvencija mmWave opsega.

Tabela IV: Rezultati simulacija

Scenario	Vidljivost	28 GHz		73 GHz	
		Prosječna brzina prenosa na DL [Gb/s]	Prosječan SINR na DL [dB]	Prosječna brzina prenosa na UL [Gb/s]	Prosječan SINR na UL [dB]
<i>Scenario A</i> (<i>Constant Position Model</i>)	LOS	3.13	39.89	3.13	31.49
	NLOS	1.36	11.22	0.58	5.04
<i>Scenario B</i> (<i>Constant Velocity Model</i>)	LOS	2.53	21.3	1.75	14.29
	NLOS	0.16	-11.52	0.07	-16.34
<i>Scenario C</i> (<i>Random Walk Model+Prepreke</i>)	N/A	2.25	24.54	2	17.05

Glava 5

Predlog novog makrodiverziti algoritma

Kao što je ranije istaknuto, frekvencije mmWave opsega su znatno osjetljivije na prepreke u poređenju sa nižim frekvencijama. To uzrokuje često blokiranje signala, a to je i pokazano u simulacijama čiji su rezultati opisani u prethodnoj glavi, gdje su ljudska tijela i drveće izazivali blokiranje signala. U ovoj glavi biće analizirano okruženje koje je ranije opisano, ali uz predlog novog algoritma za makrodiverziti kao potencijalnog rješenja za problem blokiranja signala.

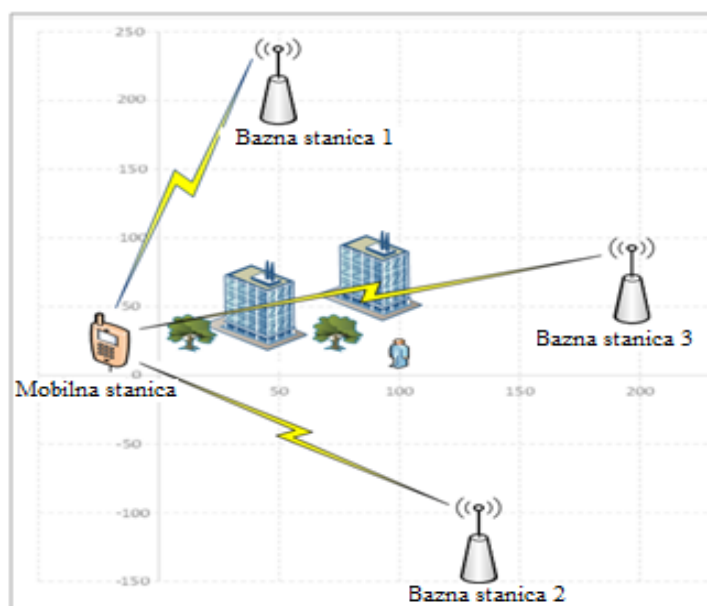
Svaki od scenarija podrazumijeva tri bazne stanice i jednu mobilnu stanicu. U prethodnoj glavi, mobilne stanice su ostvarivale komunikaciju sa najbližom baznom stanicom, dok su signali od druge dvije bazne stanice tretirani kao interferencija tokom cijelog trajanja simulacije. U predlogu novog makrodiverziti modela, mobilna stanica kontinuirano mjeri kvalitet signala koji dobija sa svake bazne stanice, a zatim vrši selektivno kombinovanje na osnovu CQI. Ova makrodiverziti šema bazirana na CQI pomaže u ublažavanju posledica blokiranja signala i poboljšava kvalitet ostvarenog servisa. Proces estimacije CQI je baziran na CQI mapiranju implementiranom u LTE tehnologiji [48], i uzima u obzir SINR vrijednosti zabilježene na strani MS. CQI vrijednosti se kreću od 0 (što se mapira u SINR vrijednost -6.15 dB) do 15 (što se mapira u SINR vrijednost 20.54 dB). Da bi se izbjegli česti prelasci sa jedne na drugu baznu stanicu, predloženo je da uslov koji treba da bude zadovoljen u ovom makrodiverziti rješenju:

$$CQI_{Cell B} \geq CQI_{Cell A} + 2 \quad (15)$$

Iz jednačine je jasno da će MS preći sa bazne stanice na koju je trenutno povezana (*Cell A*), na baznu stanicu sa koje je kvalitet kanala mnogo bolji, tj. CQI veći za najmanje 2 (*Cell B*) u poređenju sa kanalom koji trenutno koristi. U scenariju bez implementiranog makrodiverzitija, MS bi ostao povezan na najbližu baznu stanicu, bez obzira na kvalitet signala.

5.1 Simulacioni scenariji

I u ovom dijelu, simulirana su tri scenarija opisana u glavi 4. Sva tri scenarija su analizirana za oba frekvencijska opsega dostupna u simulacionom alatu, 28 GHz i 73 GHz. Okruženje u kom su smješteni je gradski trg, sa tri bazne stanice koje ga pokrivaju. Pozicije baznih i mobilne stanica su prikazane na Slici 17. Simulirano vrijeme prenosa podataka je 20 sekundi u sva tri scenarija.



Slika 17: Simulaciono okruženje za makrodiverziti scenarije

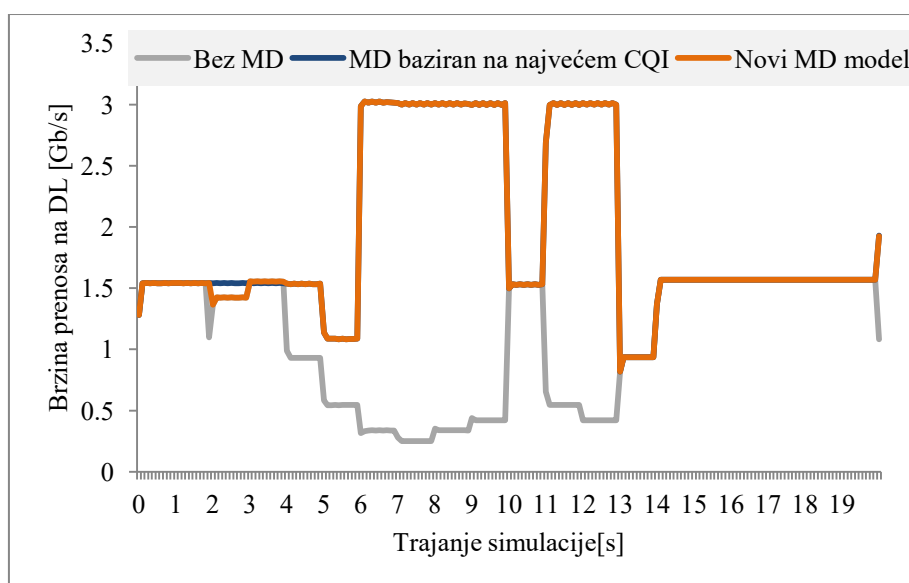
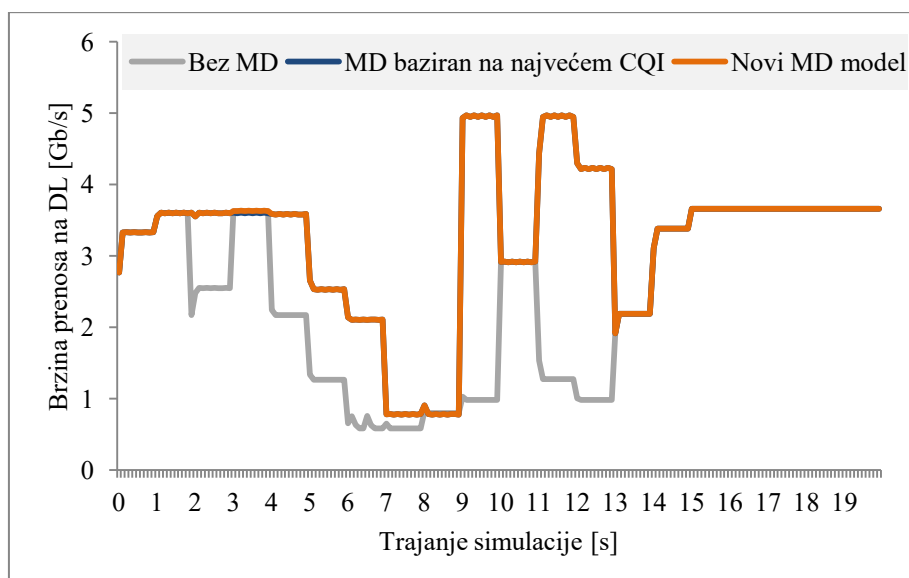
5.2 Rezultati simulacija

U nastavku su analizirani rezultati dobijeni primjenom ovog makrodiverziti rješenja.

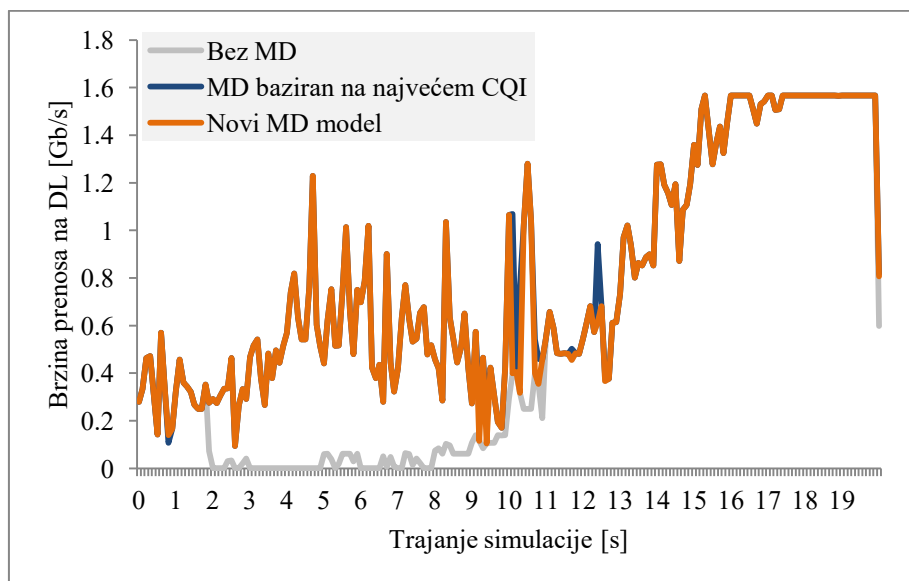
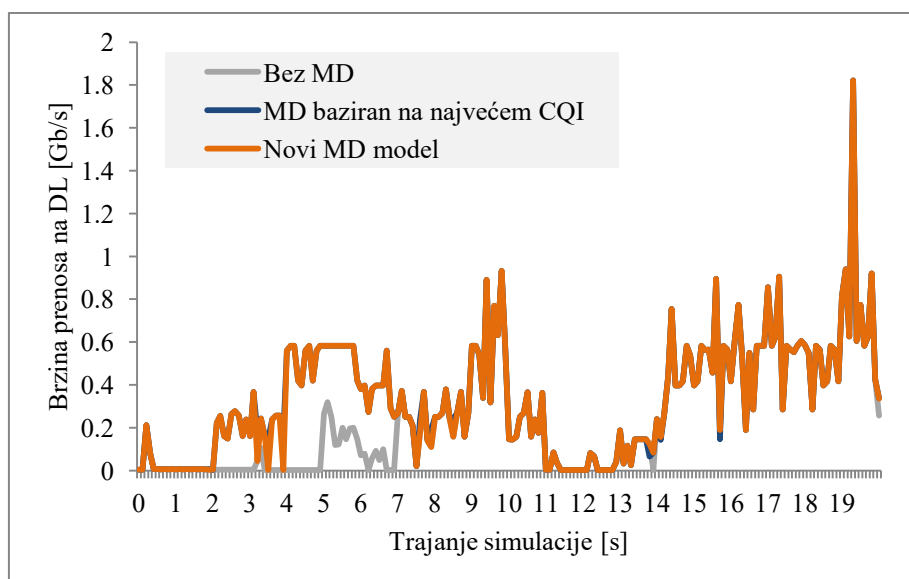
5.2.1 Scenario A: statična mobilna stanica

Rezultati dobijeni simulacijom ovog scenarija pokazuju da za statične korisnike, sa dobrim radio uslovima, dobrim pokrivanjem i dominantno ostvarenim LOS konekcijama, brzine prenosa podataka koje su projektovane za 5G sisteme lako su ostvarive. Brzine prenosa podataka na *downlinku* od 3 Gb/s i 5 Gb/s su ostvarene u ovom scenariju, za

frekvencije nosioca od 28 GHz i 73 GHz, respektivno, ali samo u slucaju kada je MD implementiran, kao što je prikazano na slikama 18 i 19. Naime, iako MS u ovom scenariju ostvaruje najčešće LOS komunikaciju, blokiranje signala se i dalje javlja i degradira ostvarene brzine prenosa podataka kada nije implementiran makrodiverziteti. Na primjer, na frekvenciji 28 GHz, brzina prenosa podata na *downlinku* je ispod 0.5 Gb/s tokom značajnog dijela trajanja simulacije u sistemu bez MD, dok u isto vrijeme, oba analizirana sistema sa implementiranim makrodiverzitetijem ostvaruje brzine prenosa od 3 Gb/s.

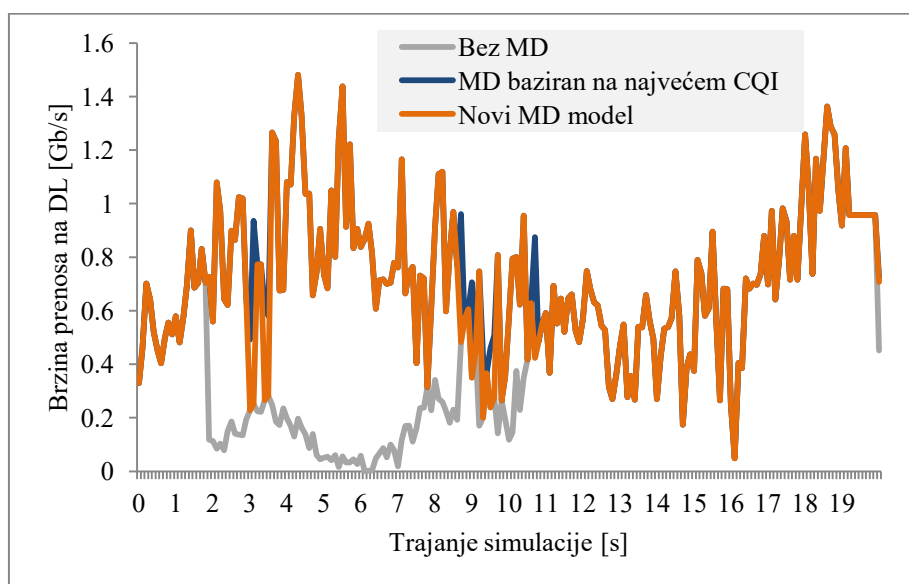
Slika 18: Scenario A, $f_c=28\text{ GHz}$, LOSSlika 19: Scenario A, $f_c = 73\text{ GHz}$, LOS

Ukoliko se u obzir uzmu i NLOS konekcije, rezultati su drugačiji. MD modeli su i dalje, očekivano, dominantniji u odnosu na sistem bez njega, ali se pojavljuje nekoliko pikova u kojima MD model baziran na najvećem CQI ostvaruje veće brzine prenosa, na uštrb stabilnosti konekcije, što je prikazano na slici 20. Razmatra li se scenario na 73 GHz, uočljivo je da tamo nema značajnijeg odstupanja između ova dva modela, a čak je i poboljšanje koje MD modeli unose mnogo manje u odnosu na scenario na 28 GHz, što se uočava na slici 21.

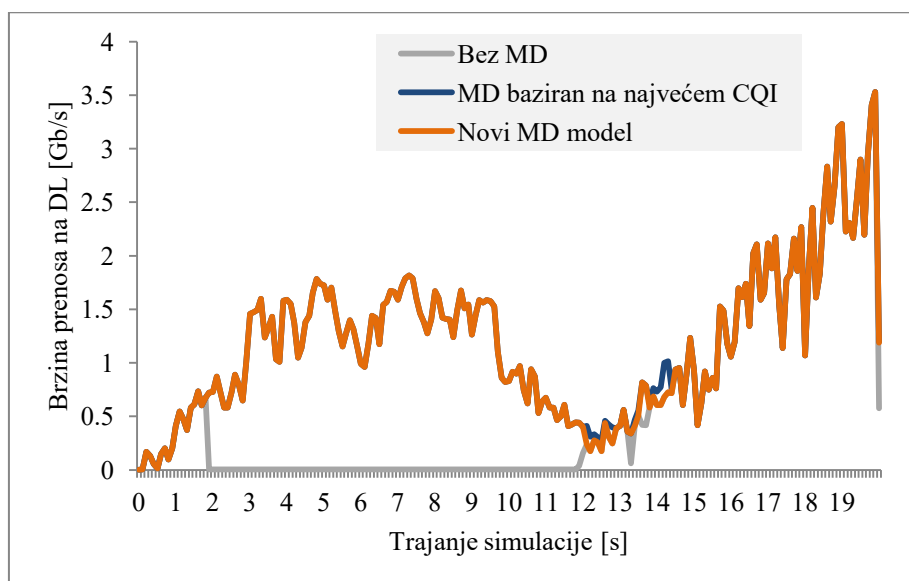
Slika 20: Scenario A, $f_c = 28 \text{ GHz}$ LOS/NLOSSlika 21: Scenario A, $f_c = 73 \text{ GHz}$, LOS/NLOS

5.2.2 Scenario B: kretanje MS konstantnom brzinom

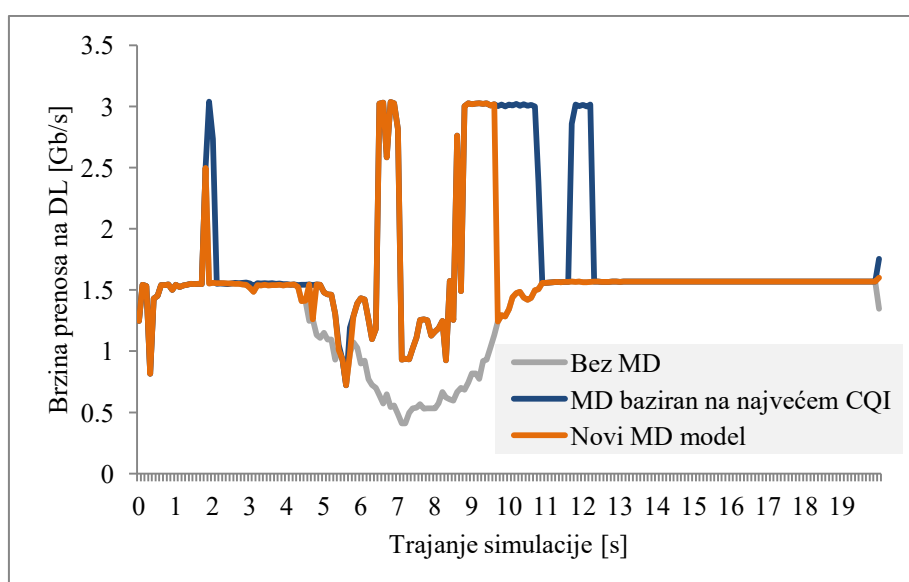
Ovaj scenario uključuje i LOS i NLOS konekcije, nasumično distribuirane. Sa predloženim modelom makrodiverzitija, gdje se prelazak na drugu BS dešava kada je CQI kanala ka drugoj BS veći za najmanje dva stepena (približno 3.5-4 dB) od CQI kanala ka BS koju trenutno koristi, vidljivo je da su degradacije uspješno zaobiđene i da su najveće dostignute vrijednosti 1.5 Gb/s ($f_c = 28 \text{ GHz}$) i 3.5 Gb/s ($f_c = 73 \text{ GHz}$), kao što je prikazano na slikama 22 i 23. Zbog šireg opsega alociranog na frekvenciji od 73 GHz, ostvarena brzina prenosa podataka u DL-u na ovoj frekvenciji je skoro tri puta veća u poređenju sa 28 GHz. U Tabeli V je dat prikaz prosječnih brzina prenosa podataka na *downlinku* i benefita koje donosi predloženi MD algoritam, kada se uporedi sa sistemom bez makrodiverzitija: povećanje brzine od 20% (u LOS scenarijima) do 106% u scenarijima gdje je MS imao izuzetno loše radio uslove (NLOS scenariji u kojima se MS kreće brzinom 36 km/h).



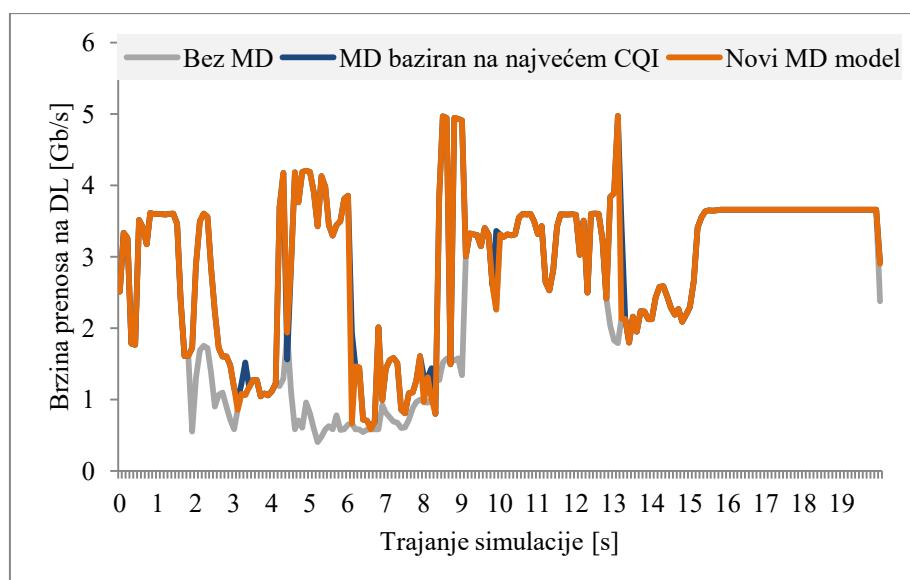
Slika 22: Scenario B, $f_c = 28 \text{ GHz}$, LOS/NLOS

Slika 23: Scenario B, $f_c = 73 \text{ GHz}$, LOS/NLOS

Ukoliko se scenario prilagodi, tako da su dominantne LOS konekcije, jasno je da je prosječna brzina prenosa podataka skoro dva puta veća (1.5 Gb/s u poređenju sa 0.8 Gb/s), sa pikovima i do 3 Gb/s. Na slici 24 se uočava da je u pojedinim trenucima MD model baziran na najvećem CQI ostvarivao bolje performanse u poređenju sa novim MD modelom, ali su u pitanju pikovi kratkog trajanja što sa aspekta krajnjeg korisnika i ne donosi neko poboljšanje u korisničkom iskustvu.

Slika 24: Scenario B, $f_c = 28 \text{ GHz}$, LOS

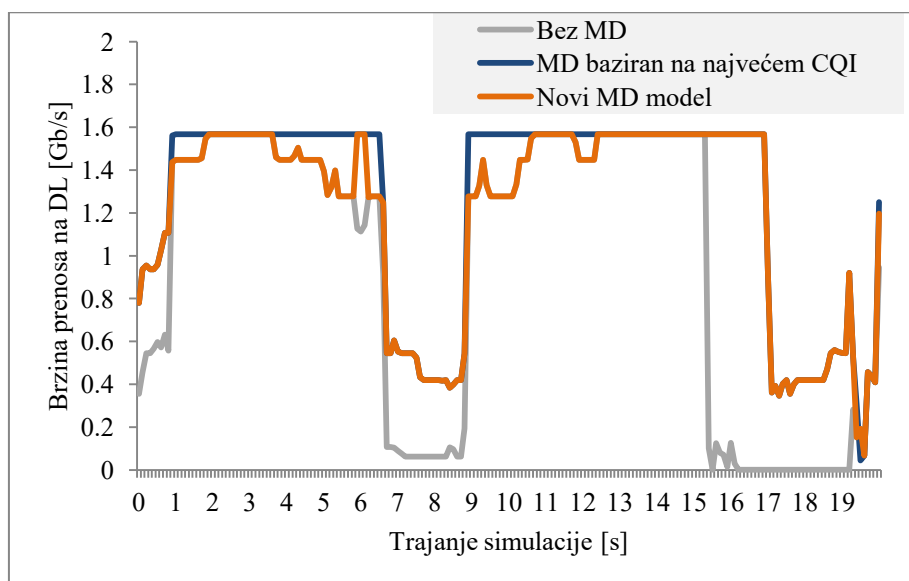
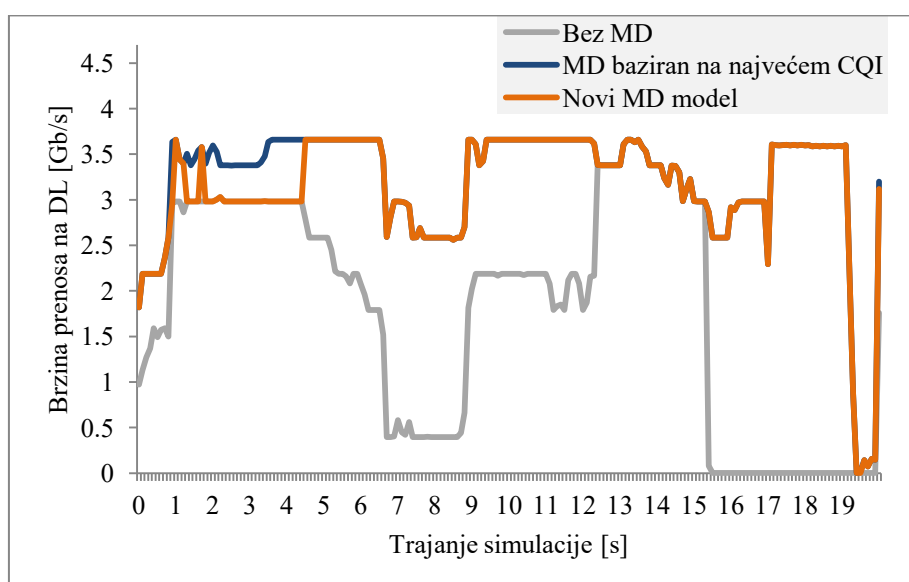
U scenariju za 73 GHz (slika 25) prosječna brzina prenosa podataka je takođe značajno uvećana (na oko 3.5 Gb/s) dok su pikovi u performansama modela sa MD baziranim na najvećem CQI mnogo manji.



Slika 25: Scenario B, $f_c = 73$ GHz, LOS

5.2.3 Scenario C: nasumično kretanje MS

Kako ovaj scenario uključuje prepreke, slika 26 pokazuje njihov efekat na krajnje performanse: degradacija brzine prenosa podataka na *downlinku* koja počinje samo 7 sekundi nakon početka simulacije uzrokovana je blokiranjem zbog nailaska signala na zgradu, dok druga degradacija (koja počinje 15.5s nakon početka simulacije) je posledica nailaska signala na ljude i drveće. Rezultati su u skladu sa prethodno opisanim propagacionim karakteristikama mmWave talasa. Iako u razmatranom scenariju predloženi MD algoritam ne može u potpunosti da se izbori sa efektom blokiranja, on u značajnoj mjeri poboljšava performanse, naročito na frekvenciji 73 GHz (slika 27), gdje je drugi pad brzine skoro u potpunosti ublažen. Ukoliko se porede prosječne brzine prenosa podataka (Tabela V), vidljivo je jasno poboljšanje, naročito na frekvenciji 73 GHz (ostvareno povećanje prosječne brzine prenosa podataka na *downlinku* od 80%).

Slika 26: Scenario C, $f_c = 28 \text{ GHz}$ Slika 27: Scenario C, $f_c = 73 \text{ GHz}$

Poređenje prosječnih ostvarenih brzina prenosa podataka za period simulacije od 20 sekundi daje bolji uvid u poboljšanja performansi koja se ostvaruju implementacijom makrodiverziti modela u analiziranim sistemima. Tabela V pokazuje prosječne brzine prenosa na *downlinku* za sve opisane scenarije, za sva tri sistema (bez, sa MD rješenjem baziranim na izboru najvećeg CQI i sa novim MD rješenjem), na oba dostupna frekvencijska opsega. Jasno je da, iako u nekim scenarijima nema značajnije razlike između performansi sistema sa implementiranim jednim od dva MD modela, evidentno je poboljšanje, u poređenju sa

sistemom bez MD. Takvo poboljšanje je naročito značajno u uslovima lošeg radio kvaliteta, tj. u NLOS scenarijima sa prekidima linka. Iako sistem sa implementiranim MD baziranim na najvećem CQI nudi neznatno veće prosječne brzine prenosa, ipak treba uzeti u obzir rizik od čestog prelaska sa jedne BS na drugu, što je izbjegnuto u predloženom novom MD modelu.

Tabela V: Rezultati simulacija

Scenario	Vidljivost	28 GHz: Prosječna brzina prenosa na DL na [Gb/s]			73 GHz: Prosječna brzina prenosa na DL na [Gb/s]		
		Bez MD	MD baziran na najvećem CQI	Novi MD model	Bez MD	MD baziran na najvećem CQI	Novi MD model
<i>Scenario A (Constant Position Model)</i>	LOS	1.08	1.93	1.93	2.42	3.23	3.23
	NLOS	0.6	0.82	0.81	0.26	0.34	0.34
<i>Scenario B (Constant Velocity Model)</i>	LOS	1.35	1.76	1.6	2.38	2.92	2.9
	NLOS	0.45	0.73	0.71	0.58	1.2	1.19
<i>Scenario C (Random Walk Model + Prepreke)</i>	N/A	0.95	1.25	1.2	1.76	3.2	3.12

Glava 6

Zaključak

Nezaustavljiv rast mobilnog Internet saobraćaja koji je počeo uvođenjem 3G, a nastavio sa LTE i LTE-*Advanced* tehnologijama, i ujedno nadmašio sve predikcije, uslovio je rani početak razgovora o 5G tehnologiji. Imajući u vidu da, osim saobraćaja, eksponencijalan rast bilježi i broj uređaja povezanih na Internet, stvara se slika o onome što će 5G biti: krovna tehnologija pod čijim okriljem će se razvijati više različitih servisa: eMBB, mMTC, URLLC. Iako su servisi ka kojima se ide različiti, ipak je identifikovan skup indikatora performansi, čije poboljšanje se očekuje. Osim ostvarene brzine prenosa podataka koja treba da je uvećana najmanje 10 puta, očekuje se i smanjivanje kašnjenja na red veličine 1 ms, povećanje spektralne efikasnosti, povećanje gustine konekcija. Identifikovano je dosta mogućnosti za poboljšanje, u odnosu na postojeće sisteme, a očekuje se da će najveći doprinos ostvarenju ciljeva dati uvođenje prenosa signala na opsegu milimetarskih talasa.

U radu su analizirane performanse sistema u kontekstu ostvarivanja zahtjeva koje treba da ispuni 5G tehnologija. Istraživanje obuhvata više realnih scenarija, relevantnih za 5G komunikacije. Korišćenjem ns-3 simulatora analizirane su performanse komunikacionih sistema na 28 GHz i 73 GHz opsezima milimetarskih talasa, u *outdoor* okruženju. Takođe, razmatrani su i slučajevi komunikacije uz postojanje linije direktne vidljivosti, kao i oni bez linije direktne vidljivosti između predajnika i prijemnika. Pri tome se za mjeru ostvarenog kvaliteta komunikacije uzima brzina prenosa podataka, koja predstavlja jedan od najvažnijih indikatora performansi u 5G sistemima. Detaljnom analizom ostvarenih brzina prenosa podataka identifikovani su neki od glavnih problema primjene razmatranih frekvencijskih opsega u 5G sistemima, a to su najprije veliki gubici usljed propagacije, zatim gubici usljed penetracije kroz objekte, kao i pojava blokiranja signala.

U radu je prezentovan i predlog rješenja za prevazilaženje ovih problema, u vidu novog makrodiverziti algoritma baziranog na CQI, kao i ocjena poboljšanja koja se na taj način mogu ostvariti. Zaključeno je da, u dobrim radio uslovima i u scenarijima sa linijom direktne vidljivosti, brzine koje su projektovane za 5G komunikaciju su ostvarive. Poboljšanja koja je novi makrodiverziti model donio su naročito vidljiva u okruženju bez linije direktne vidljivosti, gdje je u jednom scenariju ostvareno povećanje prosječne brzine prenosa od 108%, u odnosu na sistem bez markodiverzitija.

Istraživanje je pokazalo da komunikacioni sistemi na opsezima milimetarskih talasa mogu ostvariti brzine prenosa podataka koje su neophodne u budućim mrežama, kao i da je, uz implementaciju predloženog makrodiverziti algoritma, moguće prevazići glavne nedostatke komunikacije na opsezima milimetarskih talasa.

Literatura

- [1] Cisco, VNI Complete Forecast Highlights Tool / Mobile Highlights, 2017
- [2] ITU-R "*Recommendation ITU-R M.2083-0 / IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*", 2015
- [3] ITU-R "*Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)*", Feb 2017
- [4] G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. Hanly, A. Lozano, A. C.K. Soong, J. C. Zhang, "What Will 5G Be?" , IEEE Journal on Selected Areas in Comm., vol.32, no. 6, pp. 1065- 1082, Sept. 2014
- [5] 5G-PPP The European Commission and the 5G Infrastructure Association "5G Vision", Mar 2015
- [6] mmMagic " *6–100 GHz Channel Modelling for 5G: Measurement and Modelling Plans in mmMAGIC*", Feb 2016
- [7] NGMN Alliance "*NGMN 5G Initiative White Paper*", Feb 2015
- [8] 5G Forum "*5G White Paper*", Feb 2015
- [9] <http://www.3gpp.org/>
- [10] M.Xiao et al. "*Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks*" Guest Editorial, IEEE Journal on selected areas In Communications, 2017
- [11] Huawei Technologies "*5G Spectrum Public Policy position*", Nov 2017
- [12] Arnd Sibila "*5G Overview - Mobile Technologies and the way to 5G*", Rhode & Schwarz, Feb 2017
- [13] Hyoungju Ji, Sunho Park, Jeongho Yeo, Younsun Kim, Juho Lee, Byonghyo Shim "*Introduction to Ultra Reliable and Low Latency Communications in 5G*", China Communications, Apr 2017

- [14] R.Ford, M. Zhang, M. Mezzavilla, S. Dutta, S. Rangan, M. Zorzi, "*Achieving Ultra-Low Latency in 5G Millimeter Wave Cellular Networks*," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 3, pp. 196–203, Mar 2017
- [15] GSMA "3GPP Low Power Wide Area Technologies White Paper", Okt 2016
- [16] Fan, Pingzhi, Jing Zhao, I. Chih-Lin. "5G high mobility wireless communications: Challenges and solutions" China Communications 13.Supplement2 (2016): 1-13.
- [17] S. Larew, T. Thomas, A. Ghosh, "Air interface design and ray tracing study for 5G millimeter wave communications," in Proc., IEEE Globecom B4G Workshop, Dec. 2013.
- [18] A. Sadri, "*Evolution of mmWave Technology from WiGig to Cellular and Backhaul Systems*," IEEE The Brooklyn 5G Summit, Apr. 2014.
- [19] J. Hoydis, S. ten Brink, M. Debbah, "Massive MIMO in the UL/DL of cellular networks: How many antennas do we need?" IEEE Journal on Sel. Areas in Communications, vol. 31, no. 2, pp. 160–171, Feb. 2013.
- [20] B. L. Ng, Y. Kim, J. Lee, Y. Li, Y.-H. Nam, J. C. Zhang, K. Sayana, "Fulfilling the promise of massive MIMO with 2D active antenna array," in Proc., IEEE Globecom Workshop on Emerging Technologies for LTE-Advanced and Beyond-4G, Dec. 2012,
- [21] Björnson, Emil, Erik G. Larsson, Thomas L. Marzetta. "Massive MIMO: Ten myths and one critical question." IEEE Communications Magazine 54.2 (2016): 114-123.
- [22] Al-Imari, Mohammed, et al. "Uplink non-orthogonal multiple access for 5G wireless networks." Wireless Communications Systems (ISWCS), 2014 11th International Symposium on. IEEE, 2014.
- [23] Qualcomm Technologies "5G Waveform and Multiple Access Techniques", Nov 2015
- [24] Cai, Yunlong, et al. "Modulation and Multiple Access for 5G Networks." arXiv preprint arXiv:1702.07673 (2017).
- [25] A. S. Marciano, H. L. Christiansen, "Performance of nonorthogonal multiple access (NOMA) in mmWave wireless communications for 5G networks," in Proc. IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (IEEE ICNC'17), Jan. 2017,
- [26] Kim, Hyunsoo, et al. "Multiple Access for 5G New Radio: Categorization, Evaluation, and Challenges." arXiv preprint arXiv:1703.09042 (2017).

- [27] Ichkov, Aleksandar, Vladimir Atanasovski, Liljana Gavrilovska. "*Potentials for Application of Millimeter Wave Communications in Cellular Networks.*" *Wireless Personal Communications* 92.1 (2017): 279-295.
- [28] Rangan, Sundeep, Theodore S. Rappaport, Elza Erkip. "*Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges.*" *Proceedings of the IEEE* 102.3 (2014): 366-385.
- [29] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, F. Gutierrez, "*Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!*" *IEEE Access*, vol. 1, no. 1, pp. 335–349, Aug. 2013.
- [30] Niu, Yong, et al. "*A Survey of Millimeter Wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and Challenges.*" arXiv preprint." arXiv 1502 (2015).
- [31] S.J. Dudzinsky, Jr "*Atmospheric Effects on Terrestrial Millimeter Wave Communications*", Mar 1974
- [32] Federal Communications Commission "*Millimeter Wave Propagation: Spectrum Management Implications*", Jul 1997
- [33] S. Collonge, G. Zaharia, G. E. Zein, "*Influence of human activity on wide-band characteristics of the 60GHz indoor radio channel,*" *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 3, no. 6, pp. 2369–2406, 2004.
- [34] MacCartney, George R., et al. "*Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells.*" *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2013 IEEE. IEEE, 2013.
- [35] D. Maamari, N. Devroye, D. Tuninetti, "*Coverage in mmwave cellular networks with base station co-operation,*" *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 4, pp. 2981–2994, Apr 2016
- [36] D. T. Emerson, "*The work of Jagadis Chandra Bose: 100 years of millimeter-wave research,*" *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 45, no. 12, pp. 2267–2273, Dec 1997
- [37] Maltsev, Alexander, et al. "*Statistical channel model for 60 GHz WLAN systems in conference room environment.*" *Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2010 *Proceedings of the Fourth European Conference on.* IEEE, 2010.
- [38] MiWEBA "*Channel modeling and characterization,*" FP7-ICT-608637, Deliverable 5.1, Jun 2014

- [39] ITU-R M.2135-1, “*Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT Advanced*,” Dec 2009
- [40] METIS Channel Models, ICT-317669 METIS, Deliverable 1.4, Jul 2015
- [41] mmMAGIC Deliverable D2.1, “*Measurement Campaigns and Initial Channel Models for Preferred Suitable Frequency Ranges*,” Mar. 2016
[Online] <https://5g-mmmagic.eu/results/#deliverables>.
- [42] K. Haneda et. al., “*5G 3GPP-like Channel Models for Outdoor Urban Microcellular and Macro cellular Environments*,” IEEE Vehicular Technical Conferences (VTC), 2016.
- [43] Zhang, Menglei, et al. “*ns-3 Implementation of the 3GPP MIMO Channel Model for Frequency Spectrum above 6 GHz*.” arXiv preprint arXiv:1702.04822 (2017).
- [44] S. Jaeckel, L. Raschkowski, K. Borner, L. Thiele, “*QuaDRiGa: A 3-D multi-cell channel model with time evolution for enabling virtual fieldtrials*,” IEEE Trans. Antenna Propag., vol. 62, no. 6, pp. 3242–3256, Jun 2014.
- [45] L. Liu et al., “*The COST 2100 MIMO channel model*,” IEEE Commun. Mag., vol. 19, no. 6, pp. 92–99, Dec 2012.
- [46] Ford, Russell, et al. “*A framework for end-to-end evaluation of 5G mmwave cellular networks in ns-3*.” Proceedings of the Workshop on ns-3. ACM, 2016.
- [47] M.R.Akdeniz, Y.Liu, M.K.Samimi, S.Sun, S.Rangan, T.S. Rappaport, E.Erkip, “*Millimeter Wave Channel Modeling and Cellular Capacity Evaluation*,” IEEE Journal on Selected Areas in Comm., vol. 32, no. 6, pp. 1164–1179, Jun 2014.
- [48] 3GPP TS 136 213 (2009-10) “*Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (version 8.8.0 Release 8)*”, 2017

Lista skraćenica

- 3GPP - *Third Generation Partnership Program*
- 5GPPP - *The 5G Infrastructure Public Private Partnership*
- ARQ - *Automatic Repeat Request*
- BER - *Bit Error Rate*
- BS - *Bazna stanica*
- CDMA - *Code Division Multiple Access*
- CSI - *Channel State Information*
- CQI - *Channel Quality Indicator*
- D2D - *Device-to-device*
- eMBB - *Enhanced Mobile Broadband*
- FBMC - *Filter Bank Multi Carrier*
- FDD - *Frequency Division Duplex*
- FDMA - *Frequency Division Multiple Access*
- FFT/IFFT - *Fast Fourier Transform/ Inverse Fast Fourier Transform*
- f-OFDM - *Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
- GFDM - *Generalized Frequency Division Multiplexing*
- GI DFT-s OFDM - *Guard Interval Discrete Fourier Transform Spread OFDM*
- DSL - *Digital Subscriber Line*
- IMT-2020 - *International Mobile Telecommunications for 2020 and beyond*
- IoT - *Internet of Things*
- ISI - *Inter-simbolska interferencija*
- ITU - *International Telecommunications Union*
- ITU-R - *International Telecommunications Union Radiocommunication Sector*
- LOS - *Line of Sight*
- LTE - *Long Term Evolution*

MAC - *Medium Access Control*

MD - *Makrodiverziti*

METIS - *Mobile and wireless communications Enablers for Twenty-twenty (2020) Information Society*

MIMO - *Multiple Input Multiple Output*

Mi-WEBA - *Millimeter-Wave Evolution for Backhaul and Access*

mMTC - *Massive Machine Type Communications*

mmWave - *Millimeter wave*

MS - *Mobilna stanica*

NLOS - *Non Line of Sight*

NOMA - *Non-Orthogonal Multiple Access*

OFDM - *Orthogonal Frequency Divison Multiplexing*

OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*

OTFS - *Orthogonal Time Frequency And Space*

PDCP - *Packet Data Convergence Protocol*

PDMA - *Pattern Division Multiple Access*

PDU - *Protocol Data Unit*

PAPR - *Peak-to-Average Power Ratio*

PSD - *Power Spectral Density*

QuaDRiGa - *Quasi Deterministic Radio Channel Generator*

RLC - *Radio Link Control*

RRC - *Radio Resource Control*

SC-FDE - *Single Carrier Frequency Domain Equalization*

SCMA - *Sparse Code Multiple Access*

SC-QAM - *Single Carrier Quadrature Amplitude Modulation*

SDMA - *Spatial Division Multiple Access*

SNR - *Signal to Noise Ratio*

SINR - *Signal to Interference+Noise Ratio*

SDN - *Software Defined Networks*

SP-OFDM - *Spectrally-Precoded OFDM*

TDD - *Time Divison Duplex*

TDMA - *Time Division Multiple Access*

TTI - *Travel Time Interval*

UFMC - *Universal Filtered Multi Carrier*

URLLC - *Ultra Reliable and Low Latency Communications*

V2V - *Vehicle to vehicle*

VFN - *Virtualization of Network Functions*

ZT SC-FDM - *Zero tail Single Carrier Frequency Division Multiplexing*