

Primjena antenskih nizova za usmjerenu komunikaciju u sustavima 5G

Gec, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:107291>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**PRIMJENA ANTENSKIH NIZOVA ZA USMJERENU
KOMUNIKACIJU U SUSTAVIMA 5G**

**APPLICATION OF ANTENNA ARRAYS FOR
DIRECTIONAL COMMUNICATION IN 5G SYSTEMS**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Mario Muštra

Student: Antonio Gec
JMBAG: 0135241684

Zagreb, veljača 2021.

Zagreb, 18. veljače 2021.

Zavod: **Zavod za informacijsko komunikacijski promet**
Predmet: **Mobilni komunikacijski sustavi**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 5567

Pristupnik: **Antonio Gec (0135241684)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Primjena antenskih nizova za usmjerenu komunikaciju u sustavima 5G**

Opis zadatka:

Objasniti način rada antenskih nizova i matematički formulirati jednodimenzionalne i dvodimenzionalne antenske nizove te navesti ograničavajuće parametre njihove uporabe. Obrazložiti pojam prostornog diverzitija te navesti primjene i pogodnosti koje se ostvaruju primjenom prijamnika koji omogućavaju diverziti prijam. Opisati razlog primjene antenskih nizova u mobilnim mrežama 5. generacije te navesti ograničenja u pogledu frekvencijskog spektra i dimenzija samih nizova. Usporediti komunikacijske sposobnosti mobilnih mreža 5. generacije koje su postignute uporabom antenskih nizova. Navesti i opisati infrastrukturne zahtjeve za implementaciju tehnologije 5G.

Mentor:



izv. prof. dr. sc. Mario Muštra

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



PRIMJENA ANTENSKIH NIZOVA ZA USMJERENU KOMUNIKACIJU U SUSTAVIMA 5G

SAŽETAK

Razvojem tehnologije i sve većom potrebom za velikim kapacitetom mreže, antene koje su se koristile za dosadašnje komunikacije više nisu dostatne. Komunikacije u milimetarskom frekvencijskom spektru omogućile su smanjenje fizičkih dimenzija antena i tako su nastali antenski nizovi koji mogu postići veliki kapacitet i efikasnost kanala. Tehnikama prostornog diverzitija smanjeni su utjecaji fadinga i količina generiranih grešaka u urbanim sredinama. Kako bi komunikacija između mobilni uređaji i bazne stanice bila moguća, mobilni uređaji moraju biti opremljeni posebno dizajniranim antenskim nizovima koji zadovoljavaju proporcije pametnih uređaja i baznih stanica. Zbog nemogućnosti odašiljanja signala na velike udaljenosti, bazne stanice moraju biti efikasno dizajnirane da se uklape u ljudsko okruženje.

KLJUČNE RIJEČI: Antene, antenski nizovi, milimetarski frekvencijski spektar

APPLICATION OF ANTENNA ARRAYS FOR DIRECTIONAL COMMUNICATION IN 5G SYSTEMS

SUMMARY

With the development of technology and the growing need for large network capacity, the antennas used for previous communications are no longer sufficient. Communications in the millimeter frequency spectrum have made it possible to reduce physical dimensions of the antennas and thus have created antenna arrays that can achieve high channel capacity and efficiency. Spatial diversity techniques have reduced the impacts of fading and the amount of errors generated in urban areas. For communication between mobile devices and the base stations to be possible, cellular devices must be equipped with specially designed antenna arrays that meet the proportions of smart devices and base stations. Due to the inability to transmit signals over long distances, base stations must be efficiently designed to fit into human environment.

KEYWORDS: Antenna, antenna array, millimeter frequency spectrum

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Teorija antenskih nizova	3
2.1. Antene	3
2.2. Parametri antena	3
2.2.1. Polarizacija antena	4
2.2.2. Dijagram zračenja	5
2.2.3. Impedancija	6
2.2.4. Usmjerenost	7
2.2.5. Dobitak	7
2.2.6. Efektivna površina	8
2.2.7. Temperatura šuma	8
2.3. Antenski nizovi	9
3. Prostorni diverziti za poboljšanje komunikacijskih parametara	11
3.1. Tehnike prostornog diverzitija	11
3.2. Diverziti prijam	12
3.3. Diverziti prijenos i prostorno-vremenski kodovi	12
4. Antenski nizovi za mobilne mreže 5. generacije	14
4.1. Učinkovite komunikacije u milimetarskom području	14
4.2. Dijagram zračenja antenskog niza	16
4.3. Arhitektura antenskih nizova s područjem rada u milimetarskom frekvencijskom spektru	18
4.4. Čelijska pokrivenost u milimetarskom frekvencijskom spektru	19
4.5. Distribuirani antenski sustavi	20
5. Usporedba komunikacijskih unaprjeđenja postignutih uporabom antenskih nizova	22
5.1. Simulacija velikog horizontalnog niza	23
5.1.1. Učinak jednolikog vodoravnog linearnog niza u odnosu na broj primopredajnika	25

5.1.2. Formiranje snopa vodoravnim jednolikim linearnim nizom.....	28
5.2. Biološki učinci 5G milimetarskog zračenja	29
6. Zahtjevi za infrastrukturu za omogućavanje komunikacije u mobilnim mrežama 5. generacije	31
6.1. Dizajniranje 5G antenskog sustava u milimetarskim područjem rada.....	31
6.2. Prototip i integracija 5G antena koje rade u milimetarskom području	34
7. Zaključak	37
LITERATURA	38
POPIS SLIKA	39
POPIS TABLICA.....	41

1. Uvod

Istraživanja i razvoj bežičnih mreža 5. generacije doživjela su eksplozivni rast unazad nekoliko godina. Na fizičkoj razini, tehnike masivnog *MIMO*-a (engl. *Multiple input, multiple output*) i uporaba visokih GHz pojasa su dva obećavajuća trenda. Milimetarski pojasevi, kao što su 28, 38, 64, i 71 GHz, koji su se prije smatrali neprikladnima za komercijalne ćelijske mreže, igraju važnu ulogu razvoju 5G mreže. Trenutno se većina istraživanja bavi algoritmima i implementacijom modulacijskih i kodnih shema, novim tehnologijama obrade signala, novim mogućnostima spektra, modeliranjem kanala i 5G *proof of concept* sustavima.

Cilj ovog rada je prikazati primjenu antenskih nizova u mrežama 5. generacije, te prednosti i nedostatke koje takva tehnologija donosi. U radu će biti navedene sve informacije potrebne za razumijevanje načina rada antenskih nizova te način primjene istih u 5G mobilnoj mreži.

Završni rad se sastoji od sedam poglavlja:

1. Uvod
2. Teorija antenskih nizova
3. Prostorni diverziteti za poboljšanje komunikacijskih parametara
4. Antenski nizovi za mobilne mreže 5. generacije
5. Usporedba komunikacijskih unaprjeđenja postignutih uporabom antenskih nizova
6. Zahtjevi na infrastrukturu za omogućavanje komunikacije u mobilnim mrežama 5. generacije
7. Zaključak.

U drugom poglavlju opisani su glavni parametri antena: polarizacija antene, impedancija, usmjerenost, dobitak, efektivna površina i temperatura šuma. Objašnjen je način rada antenskih nizova, te podjela, prednosti i nedostaci antenskih nizova.

U trećem poglavlju opisan je princip rada prostornog diverzitija i primjena u mobilnim mrežama. Navedena je i objašnjena podjela tehnika prostornog diverzitija. Opisana je razlika prostornog diverzitija i prostornog multipleksinga i u kojim slučajevima se koristi prostorni diverziteti, a u kojim prostorni multipleksing.

U četvrtom poglavlju opisana je problematika uporabe milimetarskog frekvencijskog područja i učinkovite komunikacije postignute uporabom hardvera koji je prilagođen za takvu komunikaciju. Opisan je primjer uporabe antenskih nizova u vanjskom okruženju u testnoj 5G mreži. Prikazani su i objašnjeni dijagrami zračenja s različitim uvjetima u mreži. Opisana je arhitektura i raspored antenskih sustava koji su se pokazali kao najučinkovitiji za primjenu u urbanim područjima.

U petom poglavlju opisana su unaprjeđenja postignuta uporabom antenskih nizova. Opisana je simulacija velikog horizontalnog niza izvedena u urbanom području i navedeni su zaključci koji su stečeni na temelju simulacije. Prikazani su i opisani učinci na ljudsko zdravlje i napravljena je usporedba negativnih učinaka s nižim komunikacijskim tehnologijama.

U šestom poglavlju opisani su zahtjevi za infrastrukturu koji su potrebni za omogućavanje komunikacije u 5G mrežama, dizajn 5G antenskog sustava, prototip i integracija 5G antena koje rade u milimetarskom području.

2. Teorija antenskih nizova

Antena je uređaj koji služi za zračenje i prijam radiovalova, a zadatak joj je da djeluje kao specifičan posrednik između propagacije valova vođenih u vodovima i propagacije u slobodnom prostoru, tj. služi za pretvaranje elektromagnetske energije u prostorni elektromagnetski val i obratno.

2.1. Antene

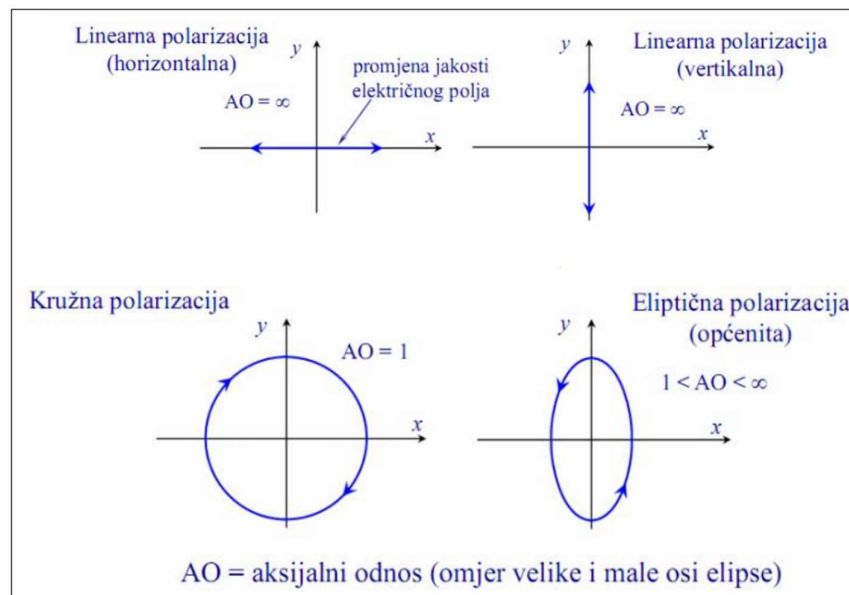
Postoje dva načina kako se elektromagnetska energija može prenositi: zračenjem elektromagnetskog vala u slobodnom prostoru i vođenjem elektromagnetskog vala uzduž prijenosne linije ili valovoda, pri čemu u prvom slučaju nije potrebna nikakva infrastruktura između odašiljača i prijarnika. Antena ima dvije funkcije: služi kao element za prilagodbu između prijenosne linije i slobodnog prostora ili prijenosne linije i valovoda. Antene mogu biti različite geometrijske strukture koje vrlo efikasno zrače elektromagnetsku energiju. Rad svih antena se zasniva na fizikalnom zakonu o elektromagnetizmu, no polazna točka kod analize pojedinih antena su Maxwellove jednačbe jer svaka analiza zahtjeva posebne matematičke metode. Pri različitim frekvencijama, kod istih geometrijskih oblika antena, možemo imati i različita svojstva, stoga je podjela antena prema geometrijskom obliku otežana. Svaka antena djelotvorno funkcionira samo u određenom frekvencijskom području. Antene možemo grubo podijeliti na uskopojasne, širokopojasne i rezonantne. Antene su vrlo važan element u različitim radiokomunikacijskim sustavima. Parametri antena moraju zadovoljavati određene uvjete. Kod usmjerenih antena glavna latica treba biti vrlo uska, a sekundarne latice što manje, kako bi se postigao veći dobitak antene i minimalizirale smetnje zbog interferencije sa sustavima koji rade na sličnim ili istim frekvencijama. [1]

2.2. Parametri antena

Parametri antena su karakteristične veličine koje opisuju svojstva antene neovisno o tom upotrebljava li se antena na odašiljačkoj ili prijarnoj strani. Glavni parametri su: dobitak, dijagram zračenja, polarizacija, impedancija, usmjerenost, efektivna površina i temperatura šuma. [1]

2.2.1. Polarizacija antena

Polarizaciju antene općenito definiramo kao smjer titranja vektora električnog polja kojeg antena zrači [2]. Elektromagnetski val postaje ravan, gdje su vektori magnetskog i električnog polja okomiti, kada se val udalji od antene na minimalno 10 valnih duljina. Vektori polja se mijenjaju u vremenu, a polarizacija se određuje na temelju krivulje koju opisuje vrh vektora električnog polja. Pod polarizacijom antene se podrazumijeva polarizacija vala koja se širi u smjeru maksimalnog zračenja. Polarizaciju dijelimo na eliptičnu, linearnu i kružnu kao što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Vrste polarizacije antene

Izvor: [3]

Kod eliptične polarizacije vrh vektora električnog polja opisuje elipsu, vektor mijenja kutnu brzinu i veličinu ovisno o vremenu. Eliptična polarizacija je određena s aksijalnim odnosom, smjerom velike osi u odnosu na odabrani koordinatni sustav i smjerom rotacije gledano u smjeru širenja vala.

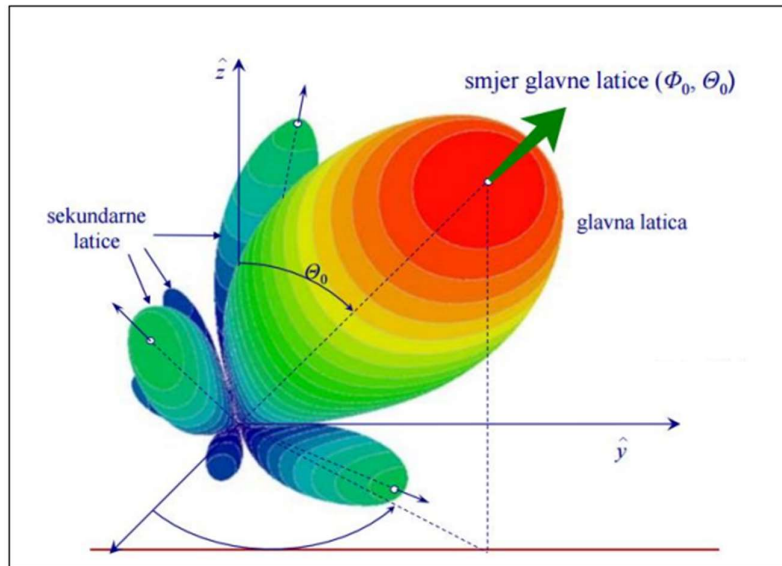
Pri linearnoj polarizaciji smjer električnog polja ostaje konstantan, a mijenja se samo veličina. Smjer linearne polarizacije se definira u odnosu na zemljinu površinu stoga razlikujemo horizontalnu i vertikalnu polarizaciju.

Pri kružnoj polarizaciji veličina vektora električnog polja ostaje konstantna, a mijenja mu se smjer, tj. on rotira konstantnom kutnom brzinom. Razlikujemo lijevu i

desnu polarizaciju, ovisno o tome rotira li vektor električnog polja u desnu ili lijevu stranu gledano u smjeru širenja vala. [1]

2.2.2. Dijagram zračenja

Dijagram zračenja predstavlja geometrijski prikaz raspodjele gustoće snage ili jakosti električnog polja u prostoru oko antene, sastoji se od glavne laticice i sekundarnih laticica kao što je prikazano na slici 2 [2].



Slika 2. Prostorni dijagram zračenja antene

Izvor: [4]

Karakteristične veličine dijagrama zračenja su: širina snopa, kut usmjerenosti i faktor potiskivanja sekundarnih latica.

Zračenje energije iz točkastog izvora je radijalno. Gustoća snage je protok energije u jedinici vremena kroz jediničnu površinu koja se prikazuje kao Poyntingov vektor u smjeru širenja. Dijagram zračenja se redovito daje u relativnim vrijednostima, što znači u odnosu prema maksimalnoj gustoći snage kao jedinici, a može se izraziti ili brojčano ili u decibelima.

Antena koja zrači u svim smjerovima jednako se naziva izotropni radijator. Kod takvog zračenja gustoća snage na površini kugle je konstantna i uzima se kao referentni izvor. Takva antena u stvarnosti ne postoji i ne može se konstruirati, ali se

iskorištava pri matematičkom opisivanju antena. Kod izotropnog radijatora Poyntingov vektor je konstantan, a izračena snaga se izračunava iz jednadžbe:

$$W = P_r 4r^2\pi \quad (1)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- W – zračena snaga
- P_r – Poyntingov vektor
- $r^2\pi$ – površinu kružnice.

2.2.3. Impedancija

Impedanciju predstavlja količnik napona i struje na stezaljkama nekog dvopola. Svaka antena koja se nalazi na odašiljačkoj strani i spojena je na generator preko linije može se predočiti kao pasivni dvopol. Kada se antena nalazi u slobodnom prostoru tako da su svi objekti smješteni na velikoj udaljenosti, govorimo o vlastitoj impedanciji antene. Kako odašiljačka antena zrači u slobodan prostor, gubitak snage može se predstaviti zamišljenim otporom koji je dio omske komponente vlastite impedancije, a naziva se otporom zračenja R_z . Otpor zračenja se prema tome definira kao ekvivalentan otpor na kojem se troši snaga jednaka ukupnoj zračenog snazi antene, ako je struja kroz taj otpor jednaka struji na stezaljkama antene. Budući da su materijali od kojih je načinjena antena konačne vodljivosti, dio elektromagnetske energije pretvorit će se u toplinu. Ekvivalentan otpor na kojem se troši ta disipirana snaga naziva se otporom gubitka R_d . Reaktivna komponenta X_A vlastite impedancije ovisi o indukcijskom polju koje stvara uskladištenu reaktivnu energiju u neposrednoj blizini antene. Prema tome, vlastita impedancija antene može se pisati jednadžbom:

$$Z_A = R_A + jX_A = R_z + R_d + jX_A \quad (2)$$

Da bi se uzeli u obzir gubici zbog disipacije antene, definira se faktor iskorištenja k . On se izražava odnosom zračene snage i ukupne prividne snage, a izračunava se iz jednadžbe

$$k = \frac{I^2 R_z}{I^2 (R_z + R_d)} = \frac{R_z}{R_z + R_d} \quad (3)$$

pri čemu je I struja na priključnicama antene. U praksi je stupanj iskorištenja redovito 50% - 70%, no često su vrijednosti vrlo blizu 100%. [1]

2.2.4. Usmjerenost

Usmjerenost antene je parametar koji prikazuje koliku količinu elektromagnetskog zračenja antena proizvodi u nekom smjeru u odnosu na zamišljenu antenu koja zrači kuglasti val [4]. Kod definicije usmjerenosti uzima se u obzir samo prostorna raspodjela zračene snage. Usmjerenost D je odnos između maksimalne P_{rmaks} i srednje P_{rsred} gustoće snage na fiksnoj udaljenosti r od antene

$$D = \frac{P_{rmaks}}{P_{rsred}} \quad (4)$$

Srednja gustoća snage se izračunava pomoću ukupne zračene snage

$$P_{rsred} = \frac{W}{4r^2\pi} \quad (5)$$

Usmjerenost za izotropni radijator je $D=1$. Usmjerenost antene može se shvatiti kao broj koji prikazuje koliko puta ukupna zračena snaga izotropnog radijatora treba biti veća od ukupne zračene snage razmatrane antene da bi se izotropnim radijatorom na određenoj udaljenosti postigla jednaka gustoća snage što je ima razmatrana antena u smjeru maksimalnog zračenja. [1]

2.2.5. Dobitak

Dobitak je veličina koja pokazuje koliko neka antena zaista zrači, odnosno kolika je njena stvarna korisnost [2]. Kod određivanja dobitka uzima se u obzir raspodjela zračne snage i gubitak snage zbog disipacije u samo anteni. Veza između dobitka G i usmjerenosti D je

$$G = kD \quad (6)$$

pri čemu je k faktor iskorištenja. Dobitak antene je broj koji pokazuje puta ukupna zračena snaga izotropnog radijatora treba biti veća od ukupne privedene snage promatrane antene da bi se s izotropnim radijatorom postigla jednaka gustoća na određenoj udaljenosti što je ima promatrana antena u smjeru maksimalnog zračenja. Kod gotovo svih antena, zbog relativno dobrog faktora iskorištenja, često se poistovjećuju usmjerenost i dobitak, ali ta dva parametra nisu ista. [1]

2.2.6. Efektivna površina

Efektivna površina antene je omjer snage apsorbirane na prilagođenom teretu (prilagodba za maksimalni prijenos snage) koji je priključen na antenu i gustoće snage upadnog elektromagnetskog vala. Antena pri tome mora imati istu polarizaciju kao upadni val, mora biti bez gubitaka i maksimum glavne latice mora biti usmjeren prema izvoru zračenja.[1]

2.2.7. Temperatura šuma

Temperatura šuma je mjera za snagu šuma koju antena predaje na ulazu u prijamnik. Izvori šuma mogu biti umjetni i prirodni, glavni dio šuma ovisi o vanjskim izvorima šuma i njihovom položaju u odnosu prema dijagramu zračenja. Pod umjetnim izvorima šuma podrazumijevaju se svi izvori koji se mogu kontrolirati, ili eventualno izbjeći, a proizvode ih različiti uređaji. Temperatura šuma uzrokovana umjetnim izvorima šuma različita je na raznim mjestima i u različito vrijeme zbog nepoznavanja njihovih lokacija. Prirodni izvori šuma su mnogo stabilniji i mogu se podijeliti na atmosferski šum, kozmički šum, šum zemlje i šum pojedinih svemirskih tijela.

Zbog nejednoliko raspoređenih izvora šuma u prostoru, temperatura šuma antena s velikim dobrotkom (malen kut usmjerenosti) može se bitno mijenjati ovisno o smjeru glavne latice. Temperatura šuma se izračunava prema jednadžbi

$$T_A = \frac{W_s}{kB} \quad (7)$$

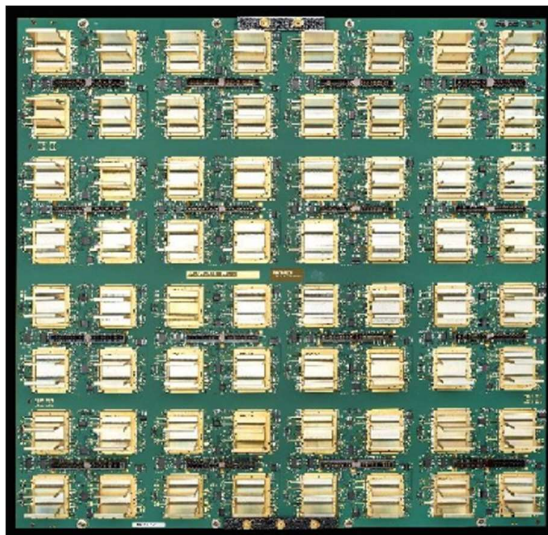
gdje oznake imaju sljedeće značenje:

- W_s – raspoloživa snaga šuma na stezaljkama antene
- k – Boltzmannova konstanta
- B – Širina pojasa.

Da bi se mogla izračunati raspoloživa snaga šuma potrebna je veličina koja određuje zračenje izvora šuma, parametar koji se obično upotrebljava je svjetlina. Raspoloživa snaga šuma se dobiva zbrajanjem doprinosa svih izvora šuma. [1]

2.3. Antenski nizovi

Antenski niz je sustav koji se sastoji od nekoliko identičnih ili vrlo sličnih antena koje su poredane duž ravne linije (kolinearni niz), kruga (kružni niz) ili na ravnoj površini. Male antene nemaju mnogo usmjerenosti, one su omnidirekionalne antene koje zrače u svim smjerovima. Da bi se stvorila antena s visokim dobitkom, koja zrači radiovalove u uskom snopu, mogu se koristiti dvije tehnike. Jedna tehnika je korištenje velikih metalnih površina, kao što su parabolični reflektori ili dielektrične leće, koje mijenjaju smjer radiovalova refleksijom ili refrakcijom. Druga tehnika je korištenje višestrukih antena koje se napajaju iz istog odašiljača ili prijamnika. Oblik zračenja kod takve tehnike sastoji se od jakog snopa u jednom smjeru uz niz slabijih snopova pod različitim kutovima koji obično predstavljaju zaostalo zračenje u neželjenim smjerovima. Na slici 3. je prikazan antenski niz kod *Massive MIMO* sustava. [5]



Slika 3. *Massive MIMO* antenski niz

Izvor: [5]

Pravilnim podešavanjem efektivnih vrijednosti i faza struja kojima se napajaju pojedinačne antene (elementi antenskog niza) može se postići usmjeravanje rezultirajućeg dijagrama zračenja u željenom pravcu, potiskivanje bočnih latica u dijagramu zračenja i potiskivanje šuma koji dolazi iz nepoznatog smjera.

Antenski nizovi su vrlo uska klasa antenskih sustava. Postoji podjela antenskih nizova prema međusobnom prostornom položaju elemenata kao i podjela antenskih

nizova prema raspodjeli amplituda i faza napajanja. Radiovalovi koje zrači svaka pojedinačna antena se kombiniraju i superponiraju kako bi se pojačala snaga koja se zrači u željenim smjerovima te poništava (destruktivna) snaga zračenja u drugim smjerovima. Općenito, što je veći broj pojedinačnih antenskih elemenata, to je veća dobit i širi snop. Pomicanje glavne latice može biti kontinuirano ili kvantizirano (diskretna promjena faze uzbude). [6]

U praksi, jednostavne antene se mogu kombinirati kako bi se postigli željeni učinci usmjeravanja signala. Svaka pojedinačna antena se naziva element dok je kombinacija elemenata - antenski niz.

Vrste antenskih nizova:

- Linearni niz – elementi niza su raspoređeni po ravnoj liniji, smatra se jednim od najjednostavnijih antenskih nizova. Raspored uključuje N elemenata identičnih amplituda, ali progresivnih faza.
- Kružni niz – elementi niza su raspoređeni po kružnici, ponekad je potrebno generirati snop zračenja s jednakim zračenjem u svim smjerovima. To se postiže korištenjem kružnog niza.
- Planarni niz – elementi su raspoređeni po nekoj planarnoj površini (pravokutnik) i općenito pružaju veću usmjerenost. Planarni nizovi imaju elemente u dvije dimenzije i koriste se za usmjeravanje zračenja glavne latice prema bilo kojoj točki u prostoru. Najčešće korišteni planarni niz je pravokutnog oblika, ostale standardizirane opcije su šesterokutni niz i kružni planarni niz.
- Konformni niz – elementi su postavljeni tako da odgovaraju nekoj neravnoj površini (krila aviona), s obzirom na to da su postavljeni na zakrivljenoj površini imaju određenu granicu usmjeravanja zračenja. [7]

3. Prostorni diverziti za poboljšanje komunikacijskih parametara

Prenošenje informacija koristeći nekoliko komunikacijskih veza od točke do točke je osnovni gradivni blok komunikacijskih mreža. Takav prijenos se koristi u žičnim i bežičnim mrežama kako bi se postigla bolja povezanost, učinkovito iskorištenje resursa, kao što su snaga i širina prijenosnog pojasa, ekonomski prihvatljiv prijenos na velike udaljenosti, interoperabilnost između mreža i lakše upravljanje hijerarhijskom mrežnom infrastrukturom.

U bežičnim mrežama, direktni prijenos između jako udaljenih antena može biti jako skup u smislu prenesene snage potrebne za pouzdanu komunikaciju. Prijenos velikih snaga dovodi do bržeg praznjenja baterije, kao i povećanih smetnji na obližnjim antenama. Kao alternative direktnom prijenosu, postoje dva osnovna i često korištena primjera relejnog prijenosa za bežične mreže. U ćelijskim postavkama na primjer, mreže pružaju vezu između mobilnih uređaja male snage i baznih stanica visoke snage, koje su povezane preko žične mreže. U senzorskim mrežama i općenito u vojnim komunikacijskim mrežama, uporaba žične mreže je često onemogućena, a radiostanice mogu biti znatno ograničene u snazi. Kako ovi primjeri sugeriraju, relejni prijenos zahtjeva dvije ili više radiostanica za višestruki prijenos. Prijenosi s kraja na kraj potencijalno mogu imati veće kašnjenje, ali zahtjevi za snagom kod pouzdanog prijenosa mogu biti znatno manji, ako su individualni prijenosi na kraćim udaljenostima (u slučaju bežične mreže), ili preko visokokvalitetnih kabela (u slučaju žične mreže).
[8]

3.1. Tehnike prostornog diverzitija

Za razliku od tehnika prostornog multipleksiranja, čiji je glavni cilj pružiti veće brzine prijenosa u usporedbi sa sustavom s jednom antenom, tehnike prostornog diverzitija dominantno ciljaju na smanjenje količine grešaka. To se postiže na temelju diverziti dobotka i dobotka kodiranja. Neizravno se mogu koristiti i tehnike prostornog diverzitija za povećanje brzine prijenosa kada se koristi zajedno s adaptivnom modulacijom/shemom kodiranja kanala. Postoje dva tipa prostornog diverzitija, nazivaju se makroskopski i mikroskopski diverziti.

Makroskopski diverziti je povezan s efektom fedinga u scenariju bežičnih komunikacija zbog velikih prepreka između odašiljača i prijamnika (kao što su zidovi velikih zgrada). Makroskopski diverziti se može postići ako postoji više odašiljačkih i prijamnih antena, koje su postavljene na velikim udaljenostima jedna od druge. U ovom slučaju, vjerojatnost da će sve veze biti ometane je manja nego kad je samo jedna veza u pitanju. Makroskopski diverziti je dostupan u okruženjima s velikim raspršivanjem, gdje konstruktivne i ne konstruktivne komponente superpozicije raspršenog signala u prijamniku uzrokuju feding amplitude signala (višestazni feding).

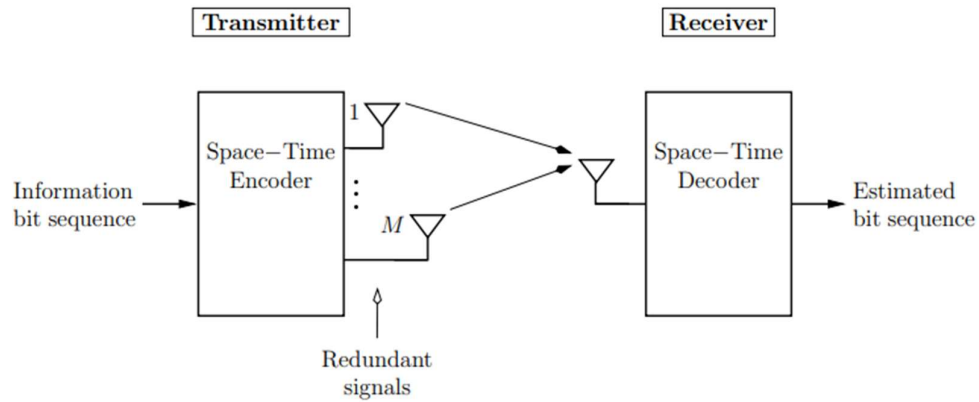
Mikroskopski diverziti se može postići korištenjem više raspoređenih antena. Uobičajeno, razmak između antena od $\lambda / 2$ je dovoljan, kako bi se postigle veze na koje feding neovisno više ili manje utječe. Slično kao kod makroskopskog diverzitija, dobitci diverzitija se postižu s većim brojem korištenih antena zbog čega se smanjuje vjerojatnost utjecaja dubokog fedinga na veze istodobno. [9]

3.2. Diverziti prijam

Tehnike diverziti prijama se primjenjuju u sustavima s jednom odašiljačkom antenom i nekoliko prijamnih antena. One izvedu (linearno) kombiniranje individualnih primljenih signala, kako bi se dobio mikroskopski diverziti dobitak. U slučaju potpunog frekvencijskog fedinga, optimalna strategija kombiniranja u smislu maksimiziranja omjera signal-šum u izlazu sumatora je maksimalni omjer kombiniranja. Kombiniranje jednakog dobitka je jedna od tehnika gdje primjeni signali ko-faziraju i zbrajaju se, ili selektivni diverziti, gdje se odabire primljeni signal s maksimalnim signal-šum omjerom, a svi ostali signali se odbacuju. Sve tri tehnike kombiniranja postižu potpuni diverziti s obzirom na broj prijamnih antena. [9]

3.3. Diverziti prijenos i prostorno-vremenski kodovi

Glavna ideja diverziti prijenosa je pružanje diverziti ili kodnog dobitka slanjem redundantnih signala preko nekoliko odašiljačkih antena (za razliku od prostornog multipleksiranja, gdje se prenose neovisne sekvence bitova). Slika 4. prikazuje osnovni princip prostorno vremenskog kodiranja.



Slika 4. Osnovni princip prostorno-vremenskog kodiranja

Izvor: [9]

Da bi se omogućilo koherentna detekcija na prijamniku, prije prijenosa se izvodi odgovarajuća predobrada signala, obično bez informacija o kanalu na odašiljaču. Kod diverziti prijenosa potrebno je više antena na odašiljaču, dok je na prijamniku dovoljna samo jedna antena. U ćelijskim mrežama, većina ukupnog prometa generira se na silaznoj vezi. Kako bi poboljšali ključnu silaznu vezu, vrlo je učinkovito koristiti odašiljačke tehnike diverzitija, jer je tada korištenje više antena potrebno samo na baznoj stanici.[9]

4. Antenski nizovi za mobilne mreže 5. generacije

Velikim porastom zahtjeva za bežičnim komunikacijama, komunikacija u milimetarskom frekvencijskom području je postala najpoželjnija tehnika u 5G mobilnim komunikacijskim sustavima. Iako je komunikacija u milimetarskom frekvencijskom području uspješno provedena unutar zatvorenih prostora, razni vanjski faktori u vanjskom okruženju ograničavaju primjenu mobilnih komunikacijskih sustava unutar milimetarskog frekvencijskog područja.

Dizajn antena za 5G milimetarske sustave može biti izveden na načine gdje elementi antene mogu biti posloženi u obliku križa, kruga ili šesterokuta, uz uobičajeni oblik pravokutnika. Prema dosadašnjim istraživanjima najbolji se pokazao dizajn antene s kružno postavljenim elementima zbog ravnomjernog dobitka u glavnom smjeru zračenja s različitim kutevima. To kružne antenske nizove čini robusnijima prema promjenama kutova koji se često događaju zbog vibracija u vanjskom okruženju.

Neki od izazova koji se predstavljaju kod implementacije milimetarskih ćelijskih mreža su blokiranja, komunikacijska sigurnost i razvoj hardvera. [10]

4.1. Učinkovite komunikacije u milimetarskom području

Na slici 5. prikazana je potencijalna višeslojna 5G ćelijska mreža s povratnim milimetarskim vezama. Odgovarajući prijenosni dio ovog ćelijskog sustava sastoji se od dva elementa: veze koja povezuje jezgrenu mrežu s pristupnom vezom i pristupne veze. Pristupne veze su obično visoko usmjerene i fleksibilne zrake kako bi zadovoljile zahtjeve kao što su visoke brzine prijenosa podataka i mobilnost. Visoka usmjerenost milimetarskih zraka i efektivna pokrivenost unutar malih ćelija bi trebala garantirati smanjeni nivo smetnji. Za veze koje spajaju jezgrenu mrežu i pristupnu mrežu, gdje su lokacije baznih stanica i pristupnih točaka obično fiksne, kako bi se podržala visoka brzina prijenosa podataka između bazne stanice i pristupne točke koje su relativno udaljene, antenski niz pokazuje više prednosti u prijenosu informacija prema jezgrenoj mreži vezom koja je fleksibilno postavljena.



Slika 5. Mala višeslojna ćelija u milimetarskom frekvencijskom području u vanjskom okruženju

Izvor [10]

Na temelju Friis-ove formule, primljena snaga od antenskog niza koji radi u milimetarskom području ovisi o dobitku antenskog niza i polarizacijskom gubitku između odašiljačkih i prijamnih antena, a formula glasi

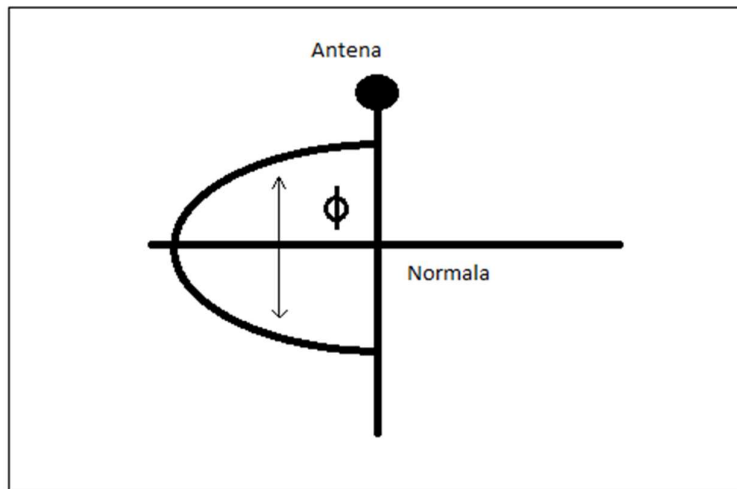
$$P_R = \frac{P_T A_{er} G_t}{4\pi r^2} \cos^2 \phi, \quad (8)$$

gdje P_T i P_R predstavljaju emitiranu i primljenu snagu, r označava udaljenost između odašiljačke i prijamne antene, A_{er} označava efektivni prijam signala prijamne antene,

$$G_t = k D_t = k \frac{4\pi S_{area}}{\lambda^2} \quad (9)$$

označava dobitak antenskog niza, k označava faktor iskorištenja, D_t označava usmjerenost zrake iz antenskog niza, S_{area} označava područje pokrivanja antenskog niza, λ označava valnu duljinu, $\cos^2 \phi$ označava polarizacijski faktor gubitka zbog različitih polarizacijskih vektora između odašiljačke i prijamne antene. Kut ϕ je prikazan na slici 6. Na temelju jednadžbe (8), tri vrste pogodnosti mogu biti iskorištene u milimetarskom frekvencijskom području. U istom području pokrivanja antenskog niza, veći odašiljački dobitak se može ostvariti kraćim valnim duljinama milimetarske zrake, povećavajući tako brzinu prijenosa. Nadalje, s kraćim valnim duljinama, disipacija

izračene snage i snaga smetnji prema ostalim korisnicima može se učinkovito ublažiti s jakim slabljenjem signala i gubitkom puta.



Slika 6. Kut ϕ u odnosu na normalu antene

U međuvremenu, u usporedbi s drugim ključnim tehnikama u budućim 5G bežičnim komunikacijskim mrežama, na primjer, *Massive MIMO*, *CoMP* (engl. *Coordinated Multi-Point*) i *SU MIMO* (engl. *Single-user MIMO*), tehnika komunikacije milimetarskom zrakom pokazuje velike prednosti u kapacitetu zahvaljujući većoj dostupnosti resursima frekvencijskog spektra.

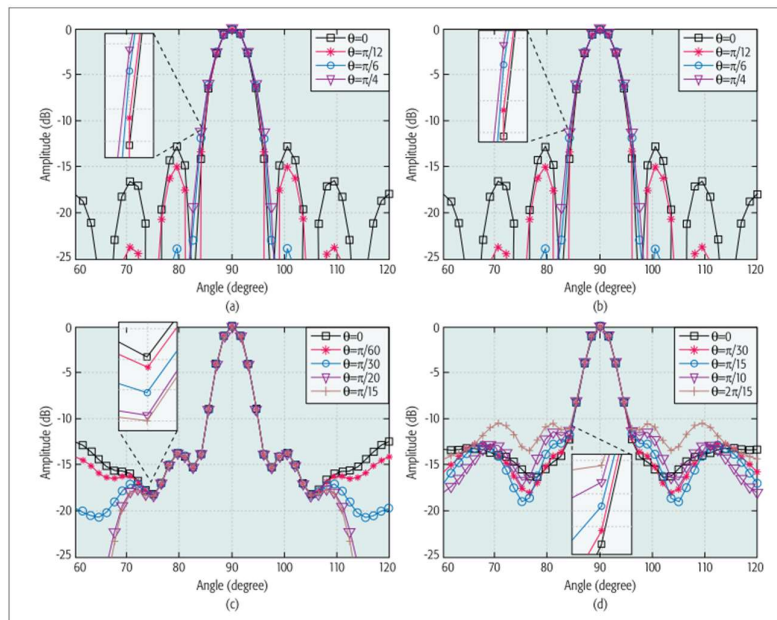
Iako visoko usmjerene antene mogu proizvesti velike dobitke, oni predstavljaju veliki izazov također. Prvo, u povratnoj vezi i pristupnoj vezi, komunikacije u milimetarskom području često mogu biti blokirane zbog različitih prepreka. Može li elektromagnetsko zračenje proći kroz prepreke ovisi o difrakciji i prodornim mogućnostima radio vala. Uz to, u milimetarskom spektru, učinkovite komunikacije generalno zahtijevaju da su odašiljač i odgovarajući prijamnik smješteni u rasponu optičke vidljivosti. Pod takvim okolnostima, obližnje zgrade i drveće mogu predstavljati značajan utjecaj na učinkovitost ćelijske mreže, posebno za korisnike mobilnih uređaja.[10]

4.2. Dijagram zračenja antenskog niza

Kako bi se prevladalo značajno smanjenje gustoće snage i postigla korisnička mobilnost u pristupnim vezama u vanjskim uvjetima, opće je poznato da je shema

kreiranja milimetarske zrake jedna od ključnih tehnologija ćelijske komunikacije da bi bila primijenjena u milimetarskom frekvencijskom pojasu.

Kako bi se optimizirao učinak komunikacijskog sustava u milimetarskom frekvencijskom području, to je moguće primjenom ispravnih prototipa antenskih nizova. U ovom radu bit će spomenut dijagram zračenja milimetarskih zraka različitih arhitektura antenskih nizova. Četiri vrste tipičnih arhitektura antenskih nizova bit će uzete u obzir: 8x8 pravokutni niz, kružni niz sa šezdeset četiri elementa, šesterokutni niz sa šezdeset jednim elementom i ukršteni niz sa šesnaest elemenata, kao što je prikazano na slici 6. U pravokutnom 8x8 antenskom nizu, antenski elementi su postavljeni tako da tvore kvadratnu mrežu s jednakim međusobnim $\lambda \times 2$ razmakom između elemenata u x i y smjeru. Trodimenzionalni dijagram zračenja ukrštenog antenskog niza sa šesnaest elemenata nastaje množenjem dva 8-elementna linearna niza koji su postavljeni vertikalno jedan na drugog. Značajka šesterokutnog antenskog niza je da između svakog susjednog elementa postoji jednak razmak od $\lambda/2$. Kružni antenski niz čine četiri koncentrična antenska niza sa šesnaest elemenata promjera $\lambda/2$, $3\lambda/2$, $5\lambda/2$ i $7\lambda/2$.



Slika 7. Dijagrami zračenja: a) 8x8 pravokutnog antenskog niza; b) ukrštenog antenskog niza sa 16 elemenata; c) kružnog antenskog niza sa 64 elementa; d) šesterokutnog antenskog niza sa 61 elementom u različitim kutovima

Izvor: [10]

S različitim kutovima, očito je da postoji varijacija dobitka od 3 dB do 5 dB u glavnom smjeru zračenja kod pravokutnih i ukrštenih nizova. Međutim, kod kružnog antenskog niza, promjena kutova ne utječe na glavni smjer zračenja zbog aksijalne simetrije arhitekture kružnog antenskog niza. Što se tiče bočnih smjerova zračenja, varijacija dobitka kod pravokutnog i ukrštenog niza je manja nego kod kružnog i šesterokutnog antenskog niza. Međutim, bočni smjerovi zračenja efektivno mogu biti suzbijeni postavljenim uzorkom elemenata iskorištavajući princip množenja uzoraka.

Kod dijagrama zračenja pravokutnog antenskog niza s različitim brojem elemenata uvijek postoji varijabilni dobitak od 3 dB do 5 dB u glavnom smjeru zračenja s različitim kutovima, neovisno od veličine antenskog niza. Iako glavni smjer zračenja postaje sve uži s povećanjem broja elemenata na antenskom nizu, udaljenost između dva antenska elementa varira ovisno o različitim kutovima. [10]

4.3. Arhitektura antenskih nizova s područjem rada u milimetarskom frekvencijskom spektru

U praktičnim scenarijima, na ćelijske mreže u milimetarskom frekvencijskom području s malim ćelijama, koje su raspoređene u vanjskom okruženju, utjecat će mnogi vanjski faktori. Utjecaj vibracija na učinak komunikacijskog sustava treba uzeti u obzir, osobito kad je riječ o antenskim nizovima s puno elemenata koji tvore jako usku zraku za bežični prijenos. S većom usmjerenosti antene, postiže se veći dobitak, ali sustav postaje osjetljiv na vibracije antenskog niza. Iz ove perspektive, arhitektura kružnog antenskog niza je otpornija na vibracije i radi toga je bolja za uporabu u vanjskom okruženju.

Prema definiciji dobitaka antenskog niza, u istom milimetarskom frekvencijskom području i učinkovitosti prijama snage koja je pod utjecajem antenskog elementa, dobitak antenskog niza je proporcionalan površini antenskog niza. Zatim, s istim brojem antenskih elemenata koji su udaljeni za $\lambda/2$, arhitektura kružnog antenskog niza zauzima najveću površinu. Tako, s istim brojem antenskih elemenata, kružni antenski nizovi imaju veći dobitak i veću usmjerenost od drugih arhitektura antenskih nizova.

Kao što je prikazano na slici 6., kod pravokutnog i ukrštenog antenskog niza postoji varijacija dobitka od 3 dB do 5 dB u glavnom smjeru zračenja, dok kod kružnog

antenskog niza ne postoji varijacija dobitka u glavnom smjeru zračenja zbog aksijalne simetrije. Zbog te značajke kružni antenski niz je najpodobniji za vanjsko okruženje. Na primjer, kružni antenski niz je otporan na promjene kutova zbog vibracija, koje se najčešće uzrokovane prolascima vozila, slijetanjem ptica, njihanjem zbog utjecaja vjetra, kao i drugih vanjskih uvjeta.

U dizajnu arhitektura velikih antenskih nizova koji su sposobni proizvesti velike dobitke, ne treba zanemariti odgovarajuće gubitke uzrokovane neusklađenošću snopa. Za normalizirane uzorke snopa antenskih nizova, kružni niz ima veću širinu zrake od pravokutnog i ukrštenog antenskog niza. S većom površinom glavne zrake, neusklađenost snopa uzrokuje smanjenje dobitka. Prema tome, za komunikacijske sustave s kružnim antenskim nizovima, odgovarajući gubitak uzrokovan neusklađenošću snopa će biti manji nego kod drugih arhitektura antenskih nizova. [10]

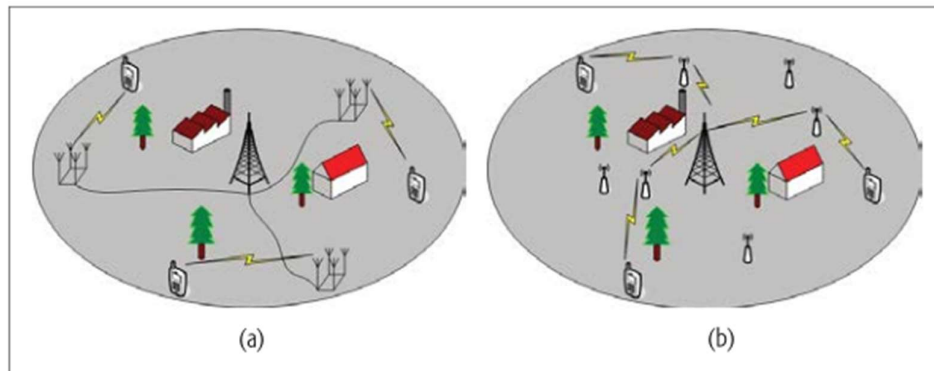
4.4. Čelijska pokrivenost u milimetarskom frekvencijskom spektru

Karakteristike milimetarskih kanala nalikuju novčiću s dvije strane. S jedne strane, ključne tehnike koje ostvaruju visoko usmjerene antene, stvaraju kanale s optičkom vidljivošću s neznatnim fadingom i višestaznim komponentama. To jamči veliki kapacitet sustava koji rade u milimetarskom frekvencijskom spektru dok uzrokuju minimalne smetnje okolnim korisnicima. S druge strane, zbog vrlo visoke frekvencije u milimetarskom spektru, često dolazi do blokade zbog neravnog terena, okolnih prepreka, mobilnosti korisnika, itd. To rezultira s kanalima koji nemaju optičku vidljivost i koji će ozbiljno narušiti učinak milimetarskog komunikacijskog sustava u odnosu na uobičajeni mikrovalni komunikacijski sustav u kojem se višestazne komponente mogu efikasno iskoristiti kako bi se ublažio fading.

Kako bi se održala učinkovita pokrivenost i besprijekorna mrežna povezivost u ćelijskim mrežama koje rade u milimetarskom području, treba obratiti pozornost na problem blokade veze, te milimetarske signale slati vezama koje imaju optičku vidljivost do željenog korisnika. Postojeća tehnika, na primjer, distribuirani antenski sustavi, može poslužiti kao moguće rješenje uključivanjem karakteristika komunikacijskog sustava koji radi u milimetarskom području. [10]

4.5. Distribuirani antenski sustavi

U prigradskim područjima s ravnim terenom, broj prepreka koje se nalaze na putu širenja milimetarskog komunikacijskog kanala je minimalan, i prijenosi u optičkoj vidljivosti se mogu jamčiti. Korištenje centraliziranog antenskog sustava je ekonomično rješenje u tom slučaju, na primjer, 16 x 16 antenski sustav, na baznoj stanici i pristupnoj točki radi pokrivanja određenog područja. Kao što je prikazano na slici 7(a), svaki antenski niz je povezan na zajednički centralni kontroler optičkim kabelom. Međutim, u gustom urbanom području smanjenje gustoće snage uzrokovano neravnim terenom, okolnim preprekama i modernim zgradama s visoko reflektirajućom prirodom može biti iznimno veliko, toliko da primljeni signal može postati preslab da bi bio koristan čak i na kratkoj udaljenosti, na primjer 200 metara i manje. Zatim, umjesto centraliziranog antenskog sustava, bilo bi učinkovitije koristiti više manjih antenskih nizova, na primjer, šesnaest pojedinačnih 4 x 4 antenskih nizova, koji su prostorno raspoređeni na određenom području. Distribuirani antenski sustav prikazan je na slici 7(b).



Slika 8. Prikaz ćelijske mreže koja radi u milimetarskom frekvencijskom spektru s tehnologijom koja poboljšava pokrivenost: a) sustav sa zajedničkim centraliziranim kontrolerom; b) distribuirani antenski sustav

Izvor: [10]

Uzimajući u obzir različite primjene distribuiranih antenskih sustava i karakteristike komunikacijskog sustava koji radi u milimetarskom frekvencijskom području, praktična primjena distribuiranih antenskih sustava varira pod različitim uvjetima. Neki od uvjeta su učinkovito pokrivanje uz pružanje velike brzine prijenosa, optimalne lokacije antenskih nizova i odgovarajući dizajn obrade signala. S prostorno

distribuiranim antenskim nizovima, koji se nalaze na unaprijed planiranim lokacijama s obzirom na teren i položaj zgrada, pristupne točke su pomaknute bliže krajnjim korisnicima. Gubitci energije zbog penetracije, refleksije i blokiranja / fedinga signala su manji. Budući da je veza u optičkoj vidljivosti češće dostupna nego kod centraliziranih antenskih sustava, s kraćim kašnjenjem signala dolazi do manjih gubitaka uslijed fedinga. Drugim riječima, podjelom prijenosne snage na manje antenske nizove koji su odvojeni u prostoru, potrošnja električne energije se može efektivno smanjiti dok značajno poboljšavamo efektivnu pokrivenost, pouzdanost i dostupnu mrežnu propusnost. [10]

5. Usporedba komunikacijskih unaprjeđenja postignutih uporabom antenskih nizova

Razvojem pametnih telefona potražnja za mrežnim prometom je u porastu, što je direktno vezano za povećanje korištenja usluga koje zahtijevaju veći kapacitet mreže. Kako bi se zadovoljile potrebe za kapacitetom potrebna su nova rješenja. Uvođenjem *MIMO* sustava dešava se velika promjena. Veliki dobitci u performansama mogu biti ostvareni korištenjem višestrukih antena na baznim stanicama i u korisničkim uređajima. Višestruke antene mogu se koristiti na različite načine, ovisno o tome što je optimalno u određenom scenariju. Oblikovanje snopa može se, na primjer, koristiti za poboljšanje omjera signal-šum za korisničke uređaje na rubu ćelije. Također, odašiljanje više zasebnih tokova podataka može se koristiti za povećanje maksimalne brzine kod korisničkih uređaja s dobrim omjerom signal-šum.

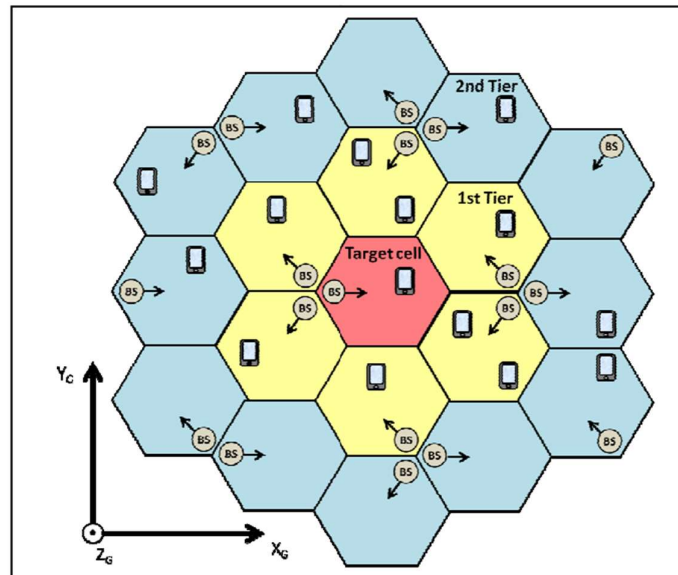
Preduvjet za brzo dinamičko oblikovanje snopa i prostorni odašiljački / prijamni multipleksing je da se pobuda elemenata antenskog niza dinamički mijenja i da obrada signala u osnovnom pojasu ima pristup primljenom signalu po antenskom elementu ili grupi elemenata. To podrazumijeva da je primopredajnik spojen na svaki antenski element ili podsklop. *MIMO* napredni antenski sustavi obično imaju 2 – 8 primopredajnika.

S većim brojem primopredajnika/antenskih elemenata postoji potencijal za velika poboljšanja:

- Dobitak antene: S povećanjem dobitka antene izlazna snaga može se smanjiti s održavanjem efektivne izotropne izračene snage. Manja izlazna snaga je korisna u smislu uštede energije i nižih zahtjeva za radiofrekvencijskim komponentama.
- Oblikovanje / upravljanje snopom: Više antenskih elemenata olakšava oblikovanje užeg snopa, šireći manje smetnji unutar mreže.
- Dobitci prostornog multipleksinga: Broj paralelnih tokova podataka ograničen je minimalnim brojem antena na baznoj stanici i korisničkom uređaju, omjerom signal-šum i svojstvima okoline. Iako je broj antena na korisničkim uređajima ograničen dimenzijom uređaja, prostorno multipleksiranje višeg reda zanimljivo je u perspektivi korištenja *MIMO*-a za više korisnika. [11]

5.1. Simulacija velikog horizontalnog niza

Simulacija je rađena u sklopu znanstvenog rada [11] za makro lokacije u urbanim područjima. Središnja ciljana ćelija je okružena s dva sloja ometajućih ćelija kao što je prikazano na slici 9.



Slika 9. prikazuje ciljanu ćeliju okruženu s dva sloja ometajućih ćelija

Izvor: [11]

Ometajuće ćelije su opremljene sa sektorskim antenama. Simulacije su rađene za tri slučaja opterećenja mreže: 100%, 50% i 0% interferirajućih aktivnih baznih stanica (na uzlaznoj i silaznoj vezi). 0% opterećenja odgovara scenariju s ograničenim smetnjama. Antenski elementi korišteni na baznoj stanici i u korisničkom uređaju su polarizirani $\pm 45^\circ$ i imaju 3 dB širinu snopa s 80 stupnjeva na azimutu i na visinskom planu. Postavke antena su prikazane na slici 10.

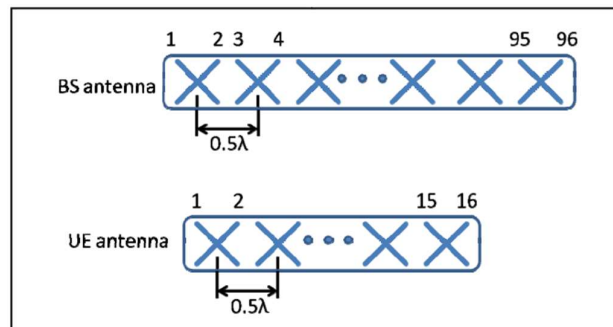
Bazna stanica je jednoliki vodoravni linearni niz s do 48 dvostruko polariziranih elemenata s razmakom između elemenata od $1/2$ valne duljine. Antena korisničkog uređaja je također jednoliki vodoravni linearni niz s do 8 dvostruko polariziranih elemenata. Razmak između elemenata je $1/2$ valne duljine. [11]

Detalji o parametrima simulacije su navedeni u tablici 1.

Tablica 1. Parametri simulacije

Izvor [11]

Parametri	Vrijednosti
Visina bazne stanice	32 m
Udaljenost između baznih stanica	500 m
Izlazna snaga bazne stanice	46 dBm
Faktor gušenja signala na baznoj stanici	2 dB
Tip korištenih antenskih elemenata	dvostruko polarizirani $\pm 45^\circ$
Antenski element širine snopa 3dB	80°
Broj antenskih elemenata na baznoj stanici	1 - 48
Razmak između antenskih elemenata	$0,5 \lambda$
Broj antenskih elemenata na korisničkom uređaju	1 - 8
Izlazna snaga korisničkog uređaja	23 dBm
Faktor gušenja signala na korisničkom uređaju	7 dB
Broj mreža	19
Okruženje u kojem se vrši propagacija	C2
Vrsta smetnji	sektorske antene
Mrežno opterećenje	[0 50 100]%

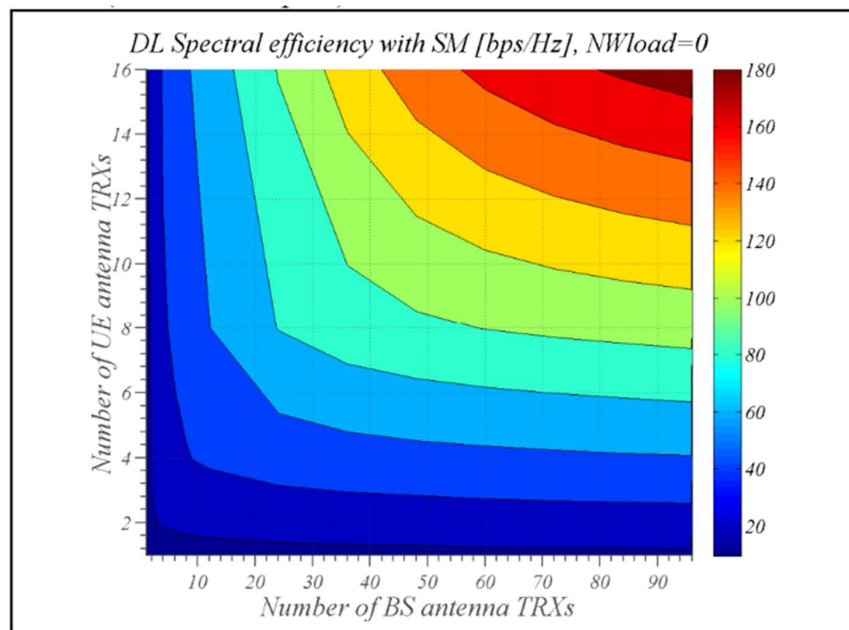


Slika 10. Postavke bazne stanice i korisničkog uređaja

Izvor: [11]

5.1.1. Učinak jednolikog vodoravnog linearnog niza u odnosu na broj primopredajnika

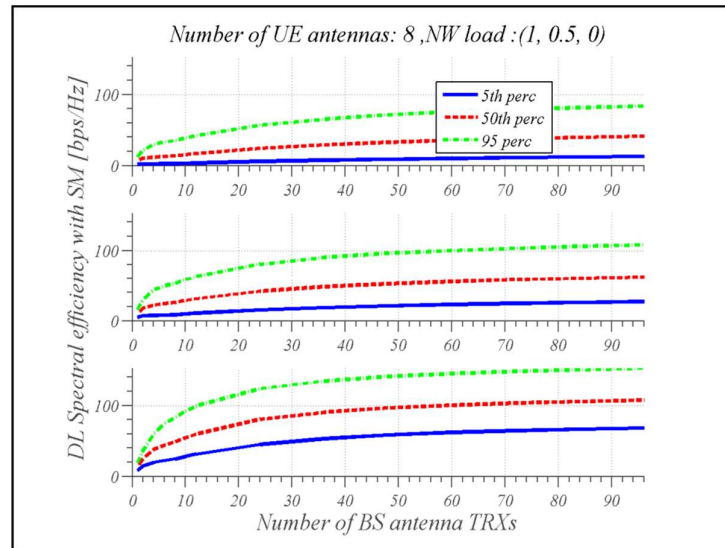
Jednoliki vodoravni linearni niz radi u prostornom multipleksing *single user MIMO* načinu rada. Podatci se prenose preko nekoliko paralelnih svojstvenih kanala. Maksimalni teoretski broj svojstvenih kanala koji se mogu iskoristiti ovisi o minimalnom broju antena na baznoj stanici i korisničkom uređaju, što odgovara rangi H-matrice. Slika 11. prikazuje spektralnu učinkovitost silaznog kanala u ovisnosti o broju primopredajnih antena na baznoj stanici i korisničkom uređaju. Vidljivo je da, kako bi se iskoristio potencijal naprednog antenskog sustava s mnogo antena, korisnički uređaj također mora imati mnogo antena. Dobitak u sustavu s korisničkim uređajem koji sadrži dvije antene ostaje malen neovisno o povećanju broja antena na baznoj stanici. Međutim, s većim brojem antena na korisničkom uređaju, naprimjer 16, spektralna učinkovitost se višestruko povećava s povećanjem broja antena na baznoj stanici.



Slika 11. Prikazuje spektralnu učinkovitost silaznog kanala u uvjetima s ograničenim smetnjama u ovisnosti na broj primopredajnih antena na baznoj stanici i korisničkom uređaju

Izvor: [11]

Izlazna snaga iz korisničkog uređaja i bazne stanice u susjednim ćelijama uzrokuje smetnje na uzlaznoj i silaznoj vezi u ciljanoj ćeliji. To može imati veliki učinak na spektralnu učinkovitost. Slika 12. prikazuje kako spektralna učinkovitost varira u odnosu na razinu smetnji: 100% aktivnost susjednih ćelija, 50% aktivnost susjednih ćelija i 0% aktivnost susjednih ćelija.

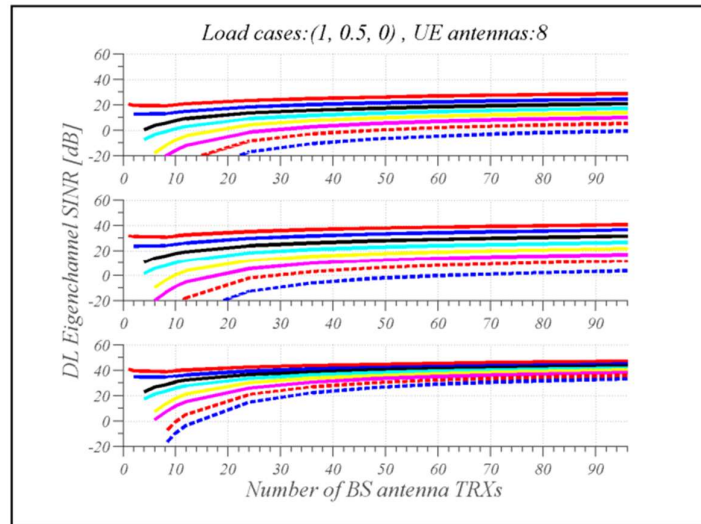


Slika 12. Postotak spektralne učinkovitosti na silaznoj vezi u sustavu s korisničkim uređajem koji ima 8 primopredajnika za tri scenarija jakosti smetnji

Izvor: [11]

Na slici 12. je vidljivo da je maksimalni broj svojstvenih kanala dostignut kada je broj antena na baznoj stanici 8. Međutim, može se primijetiti da se spektralna učinkovitost povećava i nakon tog slučaja.

Objašnjenje za to se može naći na slici 13. koja pokazuje omjer signal-šum za pojedinačne svojstvene kanale. Kada je broj primopredajnika na baznoj stanici dovoljan da se ostvari maksimalni broj svojstvenih kanala (tj. 8), kanali višeg reda mogu imati niži omjer signal-šum. To znači da je doprinos ukupnoj spektralnoj učinkovitosti od svojstvenih kanala vrlo mali i snaga koja im je dodijeljena nije učinkovito iskorištena. Veća spektralna učinkovitost bi se postigla kada bi se snaga dodijelila boljim svojstvenim kanalima, tako poboljšavajući njihov omjer signal-šum. Povećanje spektralne učinkovitosti s povećanjem broja primopredajnika na baznoj stanici dolazi zbog poboljšanja slabih svojstvenih kanala višeg reda.



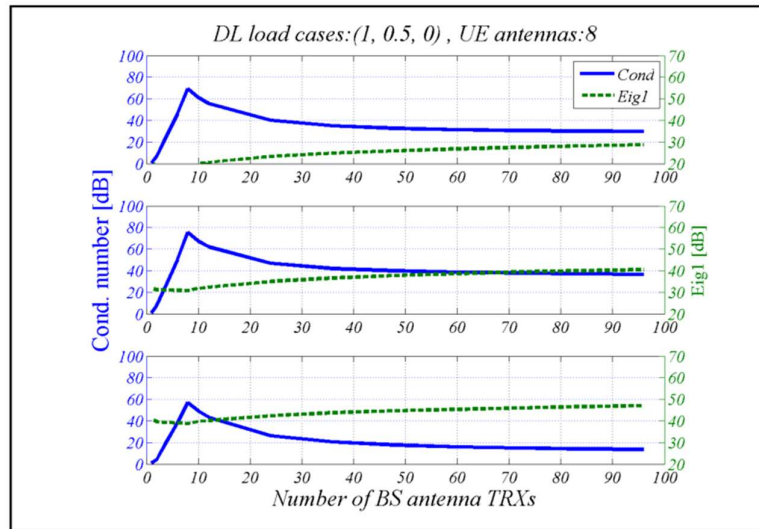
Slika 13. Pedeset postotni omjer signal-šum svojstvenih kanala u ovisnosti o broju primopredajnika na baznoj stanici i mrežnog opterećenja

Izvor: [11]

Drugi način na koji bismo mogli opisati različitost između jačanja svojstvenih kanala je broj uvjetovanosti. Definirano je kao omjer između svojstvenih kanala s najjačim i najslabijim omjerom signal-šum. S time se daje raspon omjera signal-šum svojstvenih kanala. Što je broj uvjetovanosti bliže 0 dB, svi svojstveni kanali jednako pridonose ukupnoj spektralnoj učinkovitosti.

Broj uvjetovanosti u ovisnosti o broju primopredajnika na baznoj stanici je prikazan na slici 14. Visoki broj uvjetovanosti podrazumijeva svojstvene kanale višeg reda s niskim omjerom signal-šum. Ovakva situacija se najčešće događa kada je broj primopredajnika na baznoj stanici i korisničkom uređaju jednak, u ovom slučaju osam. Povećavanjem broja primopredajnika na baznoj stanici broj uvjetovanosti se značajno poboljšava i prethodno slabi svojstveni kanali pridonose značajan doprinos ukupnoj spektralnoj učinkovitosti. Na slici 14. omjer signal-šum najsnažnijeg svojstvenog kanala je vidljiv na prvom grafu u slučaju Eig1. Omjer signal-šum kod svojstvenih kanala se može povećati, što se održava na porast dobitka antene ostvarenim dodavanjem primopredajnika na baznu stanicu. Zanimljivo zapažanje je da je broj uvjetovanosti nešto veći u slučaju kad je mrežno opterećenje na 50% nego kad je mrežno opterećenje na 100%. Vjeruje se da je to zbog razlike u karakteristikama smetnji između ta dva scenarija. Međutim, najjači svojstveni kanal ima mnogo bolji

omjer signal-šum u slučaju s 50% mrežnim opterećenjem što ukazuje da je spektralna učinkovitost veća kada je mrežno opterećenje manje. [11]



Slika 14. Broj uvjetovanosti i najjači omjer signal-šum svojstvenog kanala (Eig1) u ovisnosti na broj primopredajnika na baznoj stanici i mrežnom opterećenju

Izvor: [11]

5.1.2. Formiranje snopa vodoravnim jednolikim linearnim nizom

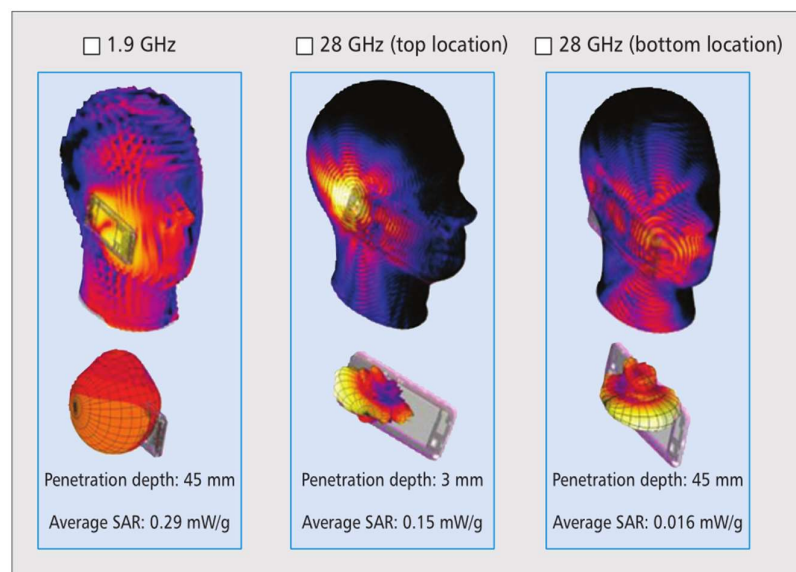
Drugi način rada antenskog niza na baznoj stanici je formiranje snopa. U tom načinu rada ukupna snaga bazne stanice je dodijeljena najjačem svojstvenom kanalu, formirajući snop s karakteristikama koje optimiziraju primljeni signal u korisničkom uređaju (npr. u smislu polarizacije i usmjeravanja snopa). Stoga se poboljšava omjer signal-šum svojstvenog kanala, ali postoji samo jedan kanal koji prenosi podatke. Na slici 15. prikazana je usporedba spektralne učinkovitosti prostornog multipleksiranja i formiranja snopa za mrežno opterećenje od 5%, 50% i 95%. Generalno bolja spektralna učinkovitost postignuta je uporabom prostornog multipleksinga nego formiranjem snopa, ali u slučaju 5% korisnika formiranje snopa nadmašuje prostorni multipleksing. Obično je to slučaj kod korisnika koji se nalaze na rubu ćelije, i u slučaju malih i srednjih veličina antena na baznim stanicama. Korisnicima koji se nalaze na rubu ćelije susjedne ćelije stvaraju velike smetnje, a dobivaju slab signal od bazne stanice na koju su povezani. Omjer signal-šum i spektralna učinkovitost u tom slučaju su mali. Za te korisnike je korisnije je poboljšati omjer signal-šum za jedan svojstveni kanal nego za prijenos preko nekoliko svojstvenih kanala. Za antene većih dimenzija

na baznim stanicama prostorni multipleksing nadmašuje formiranje snopa i kod korisnika na rubu ćelije. Razlog je što antena ima veći dobitak, što znači da se snaga bazne stanice može smanjiti, a da omjer signal-šum ostaje nepromijenjen. Snaga bazne stanice je dovoljna da se prijenos može vršiti preko više svojstvenih kanala. To je prednost koju omogućuju velike antene na baznim stanicama. Prednost kod formiranja snopa je manje stvaranje smetnji u susjednim ćelijama. Uži snop stvara manje smetnje nego npr. sektorska antena širokog snopa. [11]

5.2. Biološki učinci 5G milimetarskog zračenja

Procjena bioloških učinaka na korisnike možda jedan je on najvažnijih parametara za mobilne uređaje koji odašilju 5G milimetarsku zraku. Razina elektromagnetske apsorpcije u ljudsko tijelo je strogo regulirana po smjernicama za specifičnu gustoću apsorpcije elektromagnetskog zračenja. Svaki mobilni uređaj mora proći standardizirani test apsorpcije elektromagnetskog zračenja prije nego što se izda certifikat za njegovu uporabu. Isto tako, iako dopuštena razina apsorpcije elektromagnetskog zračenja za 5G milimetarsko područje ne postoji, moguće je analizirati i usporediti razine apsorpcije elektromagnetskog zračenja za 5G milimetarsko područje s 3G i 4G mobilnim uređajima. Kako bi se to istražilo, autori rada [12], izmjerene uzorke zračenja dva antenska niza s ukrštenim elementima unijeli su u SEMCAD-X simulator.

Na prikazu ljudske glave izračunavaju se prosječne razine apsorpcije elektromagnetskog zračenja. Kao što je vidljivo na slici 15., elektromagnetska polja koja djeluju na korisnika pri frekvenciji od 28 GHz imaju tendenciju da budu lokalizirana u odnosu na frekvencijski pojas koji se koristi u 3G i 4G mrežama. Dubina prodiranja u ljudsku kožu kod emitiranja signala od 28 GHz je približno 3 mm. Za usporedbu, dubina prodiranja u kožu na 1,9 GHz prelazi 45 mm. To implicira da je većina apsorbirane energije ograničena na epidermu kod milimetarske zrake. Utvrđeno je da je prosječna izračunata razina apsorpcije elektromagnetskog zračenja na 28 GHz u donjem dijelu mobitela manja 18 puta u usporedbi s razinama apsorpcije elektromagnetskog zračenja na 1,9 GHz. Smatra se da će sposobnost upravljanja zrakom u budućnosti još smanjiti razinu apsorbirane energije. [12]



Slika 15. Analiza i usporedba specifične razine apsorpcije elektromagnetskog zračenja kod 4G i 5G milimetarskih antenskih sustava

Izvor: [12]

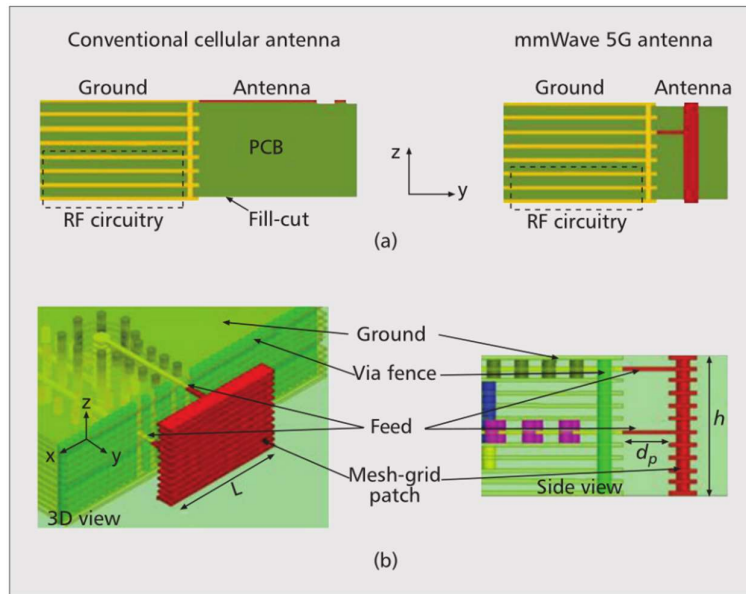
6. Zahtjevi za infrastrukturu za omogućavanje komunikacije u mobilnim mrežama 5. generacije

Unutar industrije bežičnih uređaja, mnogi inženjeri proces dizajniranja antena za mobilne uređaje opisuju kao umjetnost inženjeringa. To se može pripisati značajnoj razlici u ponašanju antena u idealnim uvjetima slobodnog prostora i antena koje su ugrađene u mobilne uređaje. Antena ne može biti dizajnirana i testirana u slobodnom prostoru, i da se od nje očekuje identično ponašanje nakon ugradnje bez dodatnog inženjerskog angažmana. Struja na površini antene inducira različite interakcije polja u obliku električnog i magnetskog ispreplitanja, što utječe na karakterističnu impedanciju i učinkovitost zračenja antene. Ovo može biti iznimno štetno za svojstva zračenja antene u blizini visoko električni vodljivih materijala kao što su metalni dijelovi. Veliki LCD (engl. *liquid crystal display*) zaslon i baterija zauzimaju najviše prostora u mobilnom uređaju. Metalni okvir smješten iza LCD zaslona uvelike ograničava postavljanje antena na rubove uređaja. Dostupan prostor za postavljanje antena se sve više smanjuje zbog sve većeg broja senzora kao i kamera, zvučnika i mikrofona, koji isto tako sadrže metalne okvire. Mobilnost zahtijeva da mobilni uređaj funkcionira bilo gdje u prostoru. Statistički i empirijski je nemoguće predvidjeti kut dolaska najjačeg signala. Signali omnidirekcionalnih 3G i 4G mobilnih antena su u ovakvim slučajevima u prednosti. Isto tako, na milimetarskim frekvencijama predviđa se da će dolazni signali koji nailaze na antenu biti raspoređeni po cijeloj sferi. To stvara paradoksalnu situaciju za inženjere: s obzirom na ograničen kapacitet baterije, antena mora zračiti izuzetno visokim intenzitetom približno sferičnim dijagramom zračenja. Budući da istodobno zračenje pod svim kutevima krši zakone klasične fizike, cilj je osmisliti metodologiju upravljanja antenskim snopom s vremenom pomicanja snopa od desetine mikrosekunde. [12]

6.1. Dizajniranje 5G antenskog sustava u milimetarskim područjem rada

Kako bismo stvorili visoko usmjereni snop, moramo odrediti maksimalan broj antenskih elemenata unutar mobilnog uređaja. Nepotrebne gubitke zračenja treba izbjegavati u slučaju komunikacija u milimetarskom području zbog uske povezanosti

s potrošnjom baterije i cijenom bežične mreže. Stoga je svaki antenski element dizajniran da bude velik najmanje četvrtinu λ_g , što je minimalni prag prije nego što se efikasnost zračenja počne naglo pogoršavati zbog povećanja uskladištene energije u blizini polja antene. Isključujući 3D otvor antene, kao što su lijevak i reflektor, plosnata dipol antena veličine $\lambda_g/2$ je daleko najbolji izbor za mikrovalne komunikacije. Međutim, karakteristike zračenja plosnatog dipola se mogu zadržati jedino ako se uklone svi metalni dijelovi ispod metalne konstrukcije plosnatog dipola. Razlog tome je nekonstruktivno miješanje elektromagnetskih polja emitiranih iz plosnatog dipola i elektromagnetskih polja reflektiranih od metalnih dijelova ispod plosnatog dipola. Uklanjanje metalnih dijelova postaje problematično, posebno pojavom pametnih telefona, zbog povećanog stupnja integracije tiskanih pločica. Tiskane pločice mobilnih uređaja obično sadrže 6 do 12 slojeva ukupne debljine manje od milimetra. Unutar tog prostora prolaze različiti signalni vodovi, od sučelja male brzine do sučelja velike brzine i rasprostranjene mreže za napajanje. Vertikalni metalni spojevi s promjerom od nekoliko desetina milimetra zovu se *vias* rupe koje služe za povezivanje signalnih vodova koji se nalaze u različitim slojevima. Uklanjanje tragova signalnih linija za implementaciju plosnate poluvodičke strukture dipola ozbiljno ugrožava raspored tiskane pločice. Kao alternativa predlaže se upotreba antene niskog profila koja može koegzistirati s tragovima signalnih linija i sadržati zadovoljavajuće karakteristike zračenja. Za razliku od plosnatih dipol antena koje se prostiru preko xy ravnine, nova struktura je smještena duž zx ravnine što može smanjiti veličinu antene s prethodnih $\lambda_g/2$ na $\frac{1}{100}\lambda_g$, kao što je prikazano na slici 16.



Slika 16. a) Pojednostavljena usporedba između standardne topologije ćelijske antene i preporučene 5G antene koja radi u milimetarskom području; b) detaljan prikaz mreže mikrotrakastih antena

Izvor: [12]

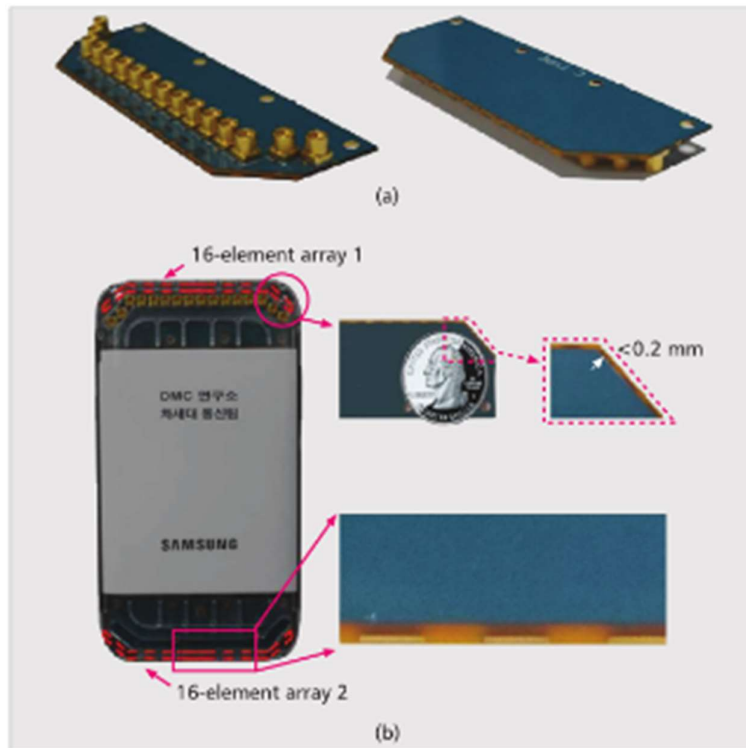
Zauzeće prostora u xy ravnini određeno je s duljinom signalnih linija za napajanje dvostrukih antena, označenih kao d_p . Tijelo antene sastoji se od usko razmaknutih vertikalnih rupa koje tvore rešetkastu strukturu, kao što se može vidjeti sa zx ravnine. Dimenzije rešetkaste strukture mikrotrakastih antena kreću se od četvrtine do polovine λ_g uzduž x osi. Visina se označava s h , što predstavlja broj potrebnih slojeva tiskane pločice za specifični dizajn rešetkaste strukture mikrotrakastih antena i utječe na širinu snopa pod kutem θ . Rešetkasta struktura mikrotrakastih antena je dizajnirana kako bi podržavala multipolarizirani *MIMO* neovisno o kombinaciji vertikalne, horizontalne i kružne polarizacije. Mjerenja provedena u sjedištu Samsung Electronics-a u Suwon-u u Južnoj Koreji, potvrđuju više od 130° širinu snopa u visinskoj ravnini, što je usporedivo s prethodno navedenom plosnatom dipol antenom. Izmjereni koeficijent refleksije od -10 dB koji definira širinu pojasa antene od 1 GHz s centralnom frekvencijom od 27,9 GHz. To je dovoljno da podrži širinu snopa od 520 MHz centriranu na noseću frekvenciju od 27,925 GHz za Samsung 5G prototip sustave. [12]

6.2. Prototip i integracija 5G antena koje rade u milimetarskom području

Rješenje antenskog niza koji radi u milimetarskom području integrirano u Samsung prototip mobitela prikazano je na slici 17. Antenski elementi postavljeni su u dva 1x16 fazna niza koji su postavljeni u gornjem i donjem dijelu tiskane pločice mobilnog uređaja. Veliki dobitak antene realiziran je rekonfigurabilnim i skalabilnim nizom od 16 antenskih elemenata koji ublažava zahtjeve linearnosti i potrošnje energije 5G pojačala. Antenski elementi su postavljeni u svim kutevima tiskane pločice pod kosim kutom od približno 50° u odnosu na stranicu mobilnog telefona. Konformna topologija maksimizira raspon skeniranja kutova snopa u ravnini azimuta. Štoviše, kosa topologija prilagođava se mobilnom uređaju i omogućava da antenski niz izgleda kao niskoprofilna metalna linija na rubovima tiskane pločice. Širina metalnih linija je manja od 0,2 mm što je manje od 1 mm prostora tiskane pločice potrebnog za konvencionalne tehnologije montiranja. S gledišta rasporeda hardvera, antena od ukupno 32 antenska elementa zauzima zanemariv dio prostora tiskane pločice. Na temelju ovog antenskog rješenja, masivni MIMO sustav zapravo može biti dugoročno ostvariv za 5G mreže.

Dijagram zračenja svakog seta faznih antenskih nizova antena sintetizira 28 GHz radiofrekvencijska jedinica, sastavljena od 32 6-bitna mjenjača faze, pojačivača snage, i pojačala s niskim šumom za odlazne i dolazne kanale. Faze 28 GHz radiofrekvencijskog signala su pojedinačno upravljane kako bi tvorile zraku u željenom smjeru duž ravnine azimuta. Svaki antenski element unutar dva seta povezan je s 28 GHz radiofrekvencijskom jedinicom preko koaksijalnog konektora tipa K. Informacije o fazi radiofrekvencijskog signala potrebne za upravljanje glavne latice su pohranjene i preuzimaju se iz *baseband* modema.

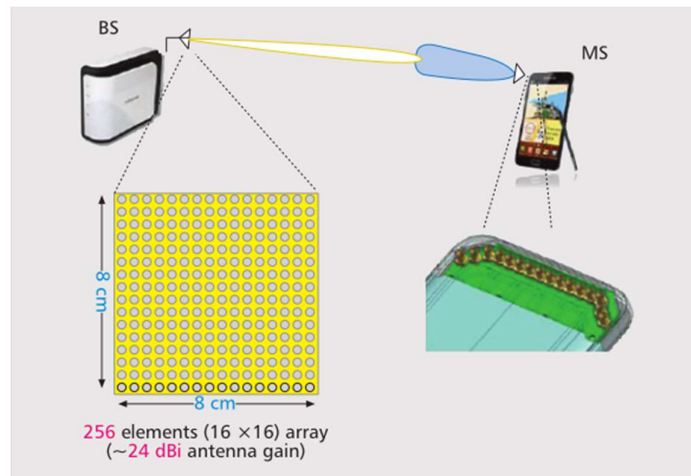
Analogni kontroler, koji se nalazi na modemu, spojen je s radiofrekvencijskim priključkom radiofrekvencijske jedinice za odašiljanje i prihvatanje kompleksnih analognih signala. Algoritam za oblikovanje snopa je dizajniran za pretraživanje i detekciju najjačeg odlaznog i dolaznog snopa unutar 45 ms.



Slika 17. Fotografije prototipa 5G antenskog sustava: a) prikaz antenskog niza s koaksijalnim priključcima tipa K; b) prikaz antenskog sustava integriranog u Samsung mobilni uređaj i uvećani prikaz područja antene

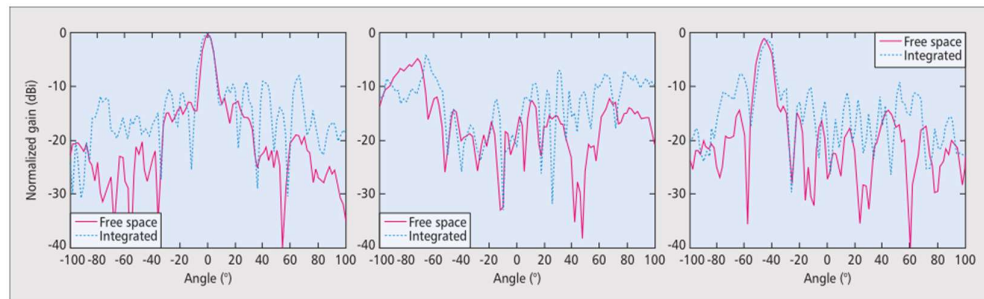
Izvor: [12]

Na slici 18. prikazan je prototip mobilnog uređaja i modema koji se koriste u testiranju u kontroliranim uvjetima. Prototip mobilnog uređaja je postavljen na 6 metara od prototipa bazne stanice. Oba antenska niza su povezana na dvije silazne veze radiofrekvencijske jedinice. 16-QAM signal s brzinom prijenosa podataka od 528 Mb/s odašilje se iz bazne stanice. Svaki antenski niz se aktivira naizmjenično kako bi se odvojeno izmjerila veličina vektora pogreške za svaki diskretni kut upravljanje zrake i kako bi potvrdio 10^{-6} vjerojatnost blokiranja bloka. Na temelju ovog mjerenja, dobiveni su normalizirani dijagrami zračenja svih antenskih nizova. Identičan postupak ponovljen je za scenarij u uvjetima slobodnog prostora. Na slici 19. prikazani su dijagrami zračenja antenskih nizova u oba slučaja.



Slika 18. Prototip konfiguracije 5G mobilnog uređaja i modema korištenih u testiranju

Izvor: [12]



Slika 19. Izmjereni i normalizirani dijagrami zračenja za različite smjerova snopa

Izvor: [12]

Mjerenjem je utvrđen raspon skeniranja kutova od približno 70° . Kombiniranjem dva antenska niza može se postići gotovo sferno zračenje. Odstupanja u dijagramu zračenja između slobodnog prostora i integriranog stanja ukazuju na pojavu deformacije dijagrama zračenja uzrokovane difrakcijom i refrakcijom elektromagnetskih valova između elemenata antene i kućišta antene. Očekuje se da će stupanj deformacije varirati ovisno o sastavu materijala mobilnog uređaja. Širina snopa od 3 dB u ravnini azimuta približno iznosi 12° . Najveći izračunati dobitak antenskog niza unutar mobilnog uređaja je više od 10,5 dBi. Glavni izvori gubitaka uključuju gubitak od 2,8 dB od mreže napajanja antenskih elemenata do koaksijalnih konektora tipa K, gubitak od 2,2 dB između koaksijalnih konektora tipa K i radiofrekvencijske jedinice, i procijenjeni gubitak od 1,8 dB zbog dielektričnih svojstava koja nastaju na kućištu prototipa korištenog u ovom mjerenju. [12]

7. Zaključak

Zbog sve većeg razvoja tehnologija kao što su internet stvari, autonomna vozila i raznih pametnih uređaja koji se spajaju na internet, razvila se potreba za novim i bržim načinom prijenosa podataka. Svake godine promet kojeg generiraju korisnici pomoću raznih terminalnih uređaja višestruko raste. Spektar ekstremno visoke frekvencije postaje sve zanimljiviji znanstvenicima kako bi se razvila tehnologija koja može omogućiti dovoljno kvalitetan prijenos podataka.

Zbog toga se razvila mreža 5. generacije koja koristi milimetarsko područje valnih duljina elektromagnetskog spektra što će omogućiti zadovoljavanje potražnje za velikim kapacitetom u budućnosti. Elementi antenskog niza su malih dimenzija i zauzimaju malu površinu što je velika prednost kod uporabe u mobilnim uređajima. Najveći problem takve tehnologije je što milimetarski valovi ne mogu prenositi informacije na velikim udaljenostima jer je gušenje u slobodnom prostoru veće kvadratno s linearnim porastom frekvencije, prema Friisovoj formuli.

Jedino rješenje za taj problem je postavljanje baznih stanica na međusobno malim udaljenostima. Zbog malih dimenzija, bazne stanice koje će sadržavati antenske nizove bit će postavljene u okruženje blisko čovjeku kao što su zgrade, drveće, stupovi, itd. Broj baznih stanica će se višestruko povećati u čovjekovom okruženju, no to ne bi trebalo predstavljati prijetnju zdravlju jer signali na visokoj frekvenciji nemaju veliku penetracijsku moć. Mreže 5. generacije, zbog male izračene snage i visoke frekvencije, predstavljaju najmanju prijetnju ljudskom zdravlju u odnosu na prethodne generacije mobilnih mreža.

LITERATURA

- [1] Zentner, E., Antene i RADIOSUSTAVI, Zagreb : Graphis, 2001.
- [2] Autorizirana predavanja i materijali za vježbe, Mario Muštra (Merlin)
- [3] S. Krile, A. Bjelopera, Predavanje „Antene”, Sveučilište u Dubrovniku, 2008
- [4] Z. Šipuš, J. Bartolić, Predavanje „Antene”, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2012
- [5] 5G Technology, Semiconductors & Patents, Kolovoz 2017
URL: <http://5gsmarts.com/5g-tech/massive-mimo-5g/> (pristupljeno: srpanj 2020.)
- [6] Mailloux, Robert J., Phased Array Antenna Handbook (Second Edition), Lipanj 2005.
- [7] Hirokawa, J., Plate-laminated waveguide slot array antennas and its polarization conversion layers . // Automatika, Zagreb, Siječanj 2012.
- [8] J. Nicholas Laneman, Gregory W. Wornell, Exploiting distributed spatial diversity in wireless networks. Cambridge, MA 02139
- [9] Jan Mietzner, Spatial diversity in MIMO communication systems with distributed or co-located antennas, Universitz of Christian Albrechts, Kiel 2007
- [10] Jing Zhang, Xiaohu Ge, Qiang Li, Mohsen Guizani, Yanxia Zhang, 5G millimeter-wave antenna array: design and challenges, IEEE Wireless Communications, vol. 24, Issue: 2, April 2017
- [11] Martin Alm, Mattias Gustafsson, Network benefits of a large advanced antenna systems, 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), April 2013
- [12] Wonbin H., Kwang-Hyun B., Youngju L., Yoongeon K., Seung-Tae K., Study and prototyping of practically large-scale mmwave antenna systems for 5G cellular devices, IEEE Communications Magazine, vol. 52, Issue: 9, September 2014

POPIS SLIKA

Slika 1. Vrste polarizacije antene	4
Slika 2. Prostorni dijagram zračenja antene	5
Slika 3. Massive MIMO antenski niz.....	9
Slika 4. Osnovni princip prostorno-vremenskog kodiranja.....	13
Slika 5. Mala višeslojna ćelija u milimetarskom frekvencijskom području u vanjskom okruženju.....	15
Slika 6. Kut ϕ u odnosu na normalu antene.....	16
Slika 7. Dijagrami zračenja: a) 8x8 pravokutnog antenskog niza; b) ukrštenog antenskog niza sa 16 elemenata; c) kružnog antenskog niza sa 64 elementa; d) šesterokutnog antenskog niza sa 61 elementom u različitim kutovima	17
Slika 8. Prikaz ćelijske mreže koja radi u milimetarskom frekvencijskom spektru s tehnologijom koja poboljšava pokrivenost: a) sustav sa zajedničkim centraliziranim kontrolerom; b) distribuirani antenski sustav	20
Slika 9. prikazuje ciljanu ćeliju okruženu s dva sloja ometajućih ćelija	23
Slika 10. Postavke bazne stanice i korisničkog uređaja	24
Slika 11. Prikazuje spektralnu učinkovitost silaznog kanala u uvjetima s ograničenim smetnjama u ovisnosti na broj primopredajnih antena na baznoj stanici i korisničkom uređaju	25
Slika 12. Postotak spektralne učinkovitosti na silaznoj vezi u sustavu s korisničkim uređajem koji ima 8 primopredajnika za tri scenarija jakosti smetnji	26
Slika 13. Pedeset postotni omjer signal – šum svojstvenih kanala u ovisnosti o broju primopredajnika na baznoj stanici i mrežnog opterećenja.....	27
Slika 14. Broj uvjetovanosti i najjači omjer signal-šum svojstvenog kanala (Eig1) u ovisnosti na broj primopredajnika na baznoj stanici i mrežnom opterećenju	28
Slika 15. Analiza i usporedba specifične razine apsorpcije elektromagnetskog zračenja kod 4G i 5G milimetarskih antenskih sustava	30

Slika 16. a) Pojednostavljena usporedba između standardne topologije ćelijske antene i preporučene 5G antene koja radi u milimetarskom području; b) detaljan prikaz mreže mikrotrakastih antena.....	33
Slika 17. Fotografije prototipa 5G antenskog sustava: a) prikaz antenskog niza s koaksijalnim priključcima tipa K; b) prikaz antenskog sustava integriranog u Samsung mobilni uređaj i uvećani prikaz područja antene.....	35
Slika 18. Prototip konfiguracije 5G mobilnog uređaja i modema korištenih u testiranju	36
Slika 19. Izmjereni i normalizirani dijagrami zračenja za različite smjerova snopa...	36

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri simulacije	24
---------------------------------------	----

POPIS KRATICA

MIMO – *Multiple-input, multiple-output*

CoMP – *Coordinated Multi-Point*

SU MIMO – *Single-user multiple-input, multiple-output*

LCD – *Liquid crystal display*



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.
Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.
Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.
Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ završnog rada
pod naslovom **Primjena antenskih nizova za usmjerenu komunikaciju u sustavima 5G**
na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 23.2.2021. _____

Student:

Antonio Gec

(potpis)