

# Antene za 5G komunikacijske sustave

---

**Gregurović, Lorena**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University North / Sveučilište Sjever**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:061453>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**



*Repository / Repozitorij:*

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER  
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



DIPLOMSKI RAD 090-MMD-2023

**Antene za 5G komunikacijske sustave**

Lorena Gregurović

Varaždin, rujan, 2023.



**SVEUČILIŠTE SJEVER  
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



DIPLOMSKI RAD 090-MMD-2023

**Antene za 5G komunikacijske sustave**

**Student:**

Lorena Gregurović

**Mentor:**

izv. prof. dr. sc. Emil Dumić

Varaždin, rujan 2023.



# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za multimediju

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Multimedija

PRISTUPNIK Gregurović Lorena

JMBAG 0336024928

DATUM 26.06.2023.

KOLEGIJ Multimedijaska videotehnologija

NASLOV RADA Antene za 5G komunikacijske sustave

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Antennas for 5G communication systems

MENTOR Emil Dumić

ZVANJE izv.prof.dr.sc.

ČLANOVI POVJERENSTVA

- doc. art. dr. sc. Mario Periša - predsjednik
- izv. prof. dr. sc. Dean Valdec - član
- izv. prof. dr. sc. Emil Dumić - mentor
- doc. dr. sc. Andrija Bernik - zamjenski član
- 

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 090-MMD-2023

OPIS

U ovom radu će biti opisane i analizirane različite vrste antena koje se mogu koristiti za 5G komunikacijske sustave.

Operateri mobilnih mreža počeli su postavljati 5G mreže na srednjoj frekvenciji pojaseva (tj. 3-6 GHz) uz postojeće 4G mobilne mreže. Pojas srednjih frekvencija može znatno povećati performanse postojeće mreže dodatnim spektrom (tj. 50 MHz-100 MHz). Međutim, visokofrekventni pojasevi (tj. 24 GHz-100 GHz) mogu ponuditi širi spektar (tj. 400-800 MHz), koji je potreban zbog stalno rastućih zahtjeva za kapacitetom, višim brzinama prijenosa (~20 Gb/s vršno) i nižim kašnjenjem. U teorijskom dijelu će se opisati osnovne vrste antena i njihove karakteristike, te dati pregled antena koje se mogu koristiti na frekvencijskim pojasevima od interesa u 5G mrežama. Opisat će se i načini oblikovanja snopa (beamforming) nizova antena (analogno, digitalno ili hibridno), kao i MIMO sustavi, pomoću kojih se može povećati kapacitet mreže. Također će se opisati potencijalni budući bežični sustavi (iza 5G, 6G) koji bi mogli koristiti spektar iznad 100 GHz (tzv. THz pojas).

U praktičnom dijelu rada će se analizirati neke od mogućih izvedbi antena za 5G komunikacijske sustave na srednjim i višim frekvencijama, koristeći CST studio suite. Analizirat će se antene za 2,4 GHz, 3,6 GHz i 24 GHz te dati njihove karakteristike (vrsta antena, dijagram zračenja, usmjerenost, dobitak, S11, centralna frekvencija, pojasna širina).

ZADATAK URUČEN 01.09.2023.

POTPIS MENTORA

Emil Dumić

## **Predgovor**

Zahvaljujem se svim profesorima i asistentima na Sveučilištu Sjever koji su mi prenijeli mnogo znanja u ovih pet godina studiranja. Posebno se zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Emilu Dumiću na svemu što me naučio tokom studija i na pomoći tokom izrade diplomskog rada.

## **Sažetak**

Ovaj diplomski rad istražuje evoluciju mobilnih mreža, počevši od 2G tehnologije i napredujući do najnovijih 5G sustava. Na početku se pruža pregled 5G mreža i njihovih svrha, ističući ključne zahtjeve za antenskim sustavima. Poglavlje 4 pruža osnovne koncepte elektromagnetskih valova i propagacije, dok se u poglavlju 5 razmatraju zahtjevi 5G antena, uključujući visoke brzine prijenosa podataka, veliki kapacitet mreže i povezivanje velikog broja uređaja (IoT) te nisku latenciju i pouzdanost.

MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) tehnologija, koja je ključna za 5G sustave, opisana je u poglavlju 6, zajedno s njezinim prednostima i algoritmima obrade signala. Poglavlje 7 razmatra tehnike oblikovanja snopa, uključujući digitalni i analogni oblikovanje snopa te MIMO oblikovanje snopaza povećanje kapaciteta mreže.

Na kraju, u poglavlju 8, istražuje se CST Studio kao alat za projektiranje i simulaciju antenskih sustava u 5G mrežama. U programu je odrađeni i praktični dio u kojemu su dizajnirane četiri različite antene različitih frekvencija.

Rad pruža duboko razumijevanje antenskih sustava, posebno u kontekstu 5G tehnologije, te ih povezuje s naprednim tehnikama kao što su MIMO i oblikovanje snopa za poboljšanje performansi mobilnih mreža.

**Ključne riječi:** 5G mreža, MIMO, IoT, Beamforming, Antena



## **Summary**

This master's thesis explores the evolution of mobile networks, starting from 2G technology and advancing to the latest 5G systems. At the outset, an overview of 5G networks and their purposes is provided, highlighting key requirements for antenna systems. Chapter 4 presents fundamental concepts of electromagnetic waves and propagation, while Chapter 5 discusses the requirements of 5G antennas, including high data transfer rates, extensive network capacity, connectivity of a large number of devices, and low latency and reliability.

MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) technology, crucial for 5G systems, is described in Chapter 6, along with its advantages and signal processing algorithms. Chapter 7 examines beamforming techniques, encompassing digital and analog beamforming, as well as MIMO beamforming to enhance network capacity.

Lastly, in Chapter 8, CST Studio is explored as a tool for designing and simulating antenna systems in 5G networks. The practical aspect of the program includes the design of four different antennas operating at different frequencies.

The thesis provides an in-depth understanding of antenna systems, particularly in the context of 5G technology, and connects them with advanced techniques such as MIMO and beamforming to enhance the performance of mobile networks.

**Key words:** 5G network, MIMO, IoT, Beamforming, Antenna

## **Popis korištenih kartica**

**IoT** Internet of things

**MIMO** Multiple Input Multiple Output

**GSM** Global System for Mobile Communications

**CDMA** Code Division Multiple Access

**FDMA** Frequency Division Multiple Access

**TDMA** Time Division Multiple Acces

**UMTS** Universal Mobile Telecommunications System

**CDMA 2000** Code Division Multiple Access 2000

**LTE** Long-Term Evolution

**WiMA X** Worldwide Interoperability for Microwave Access

**VoIP** Voice over Internet Protocol

**VR** Virtual reality

**AR** Augmented realit

**MEMS** Micro-electromechanical systems

**mmWave** Extremely high frequency

**ML** Machine learning

**MMSE** Minimum Mean Square Erro

**ZF** Zero-Forcing

**SD** Sphere Decoding

**GA** Genetic Algorithm

**MMSE** Minimum mean square erro

**BER** Bit error rate

**QoS** Quality of service

**DSS** Dynamic spectrum sharing

## Sadržaj

1. Uvod .....	3
2. Mobilne mreže .....	4
2.1. 2G.....	5
2.2.3G .....	7
2.3. 4G.....	7
3. Uvod u 5G tehnologiju .....	9
3.1. Pregled 5G mreža i njezine svrhe .....	10
3.2. Zahtjevi za antenskim sustavima u 5G mrežama.....	12
4. Osnove antena.....	14
4.1. Osnovni koncepti elektromagnetskih valova i propagacije .....	16
4.2. Maxwellove jednadžbe .....	18
4.3. Ključne karakteristike antenskih sustava .....	20
4.4. Tipične vrste antena i njihove primjene.....	20
5. Zahtjevi 5G antena.....	22
5.1. Visoke brzine prijenosa podataka .....	23
5.2. Veliki kapacitet mreže i povezivanje velikog broja uređaja (IoT) .....	25
5.3. Niska latencija i pouzdanost .....	27
6. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) tehnologija.....	29
6.1. Pregled MIMO tehnologije i njezine prednosti u 5G sustavima .....	30
6.2. Algoritmi obrade signala za MIMO sustave.....	31
6.3. Implementacija MIMO antena za 5G mreže.....	33
7. Tehnike usmjeravanja snopa.....	34
7.1. Digitalno i analogno usmjeravanje snopa .....	35
7.2. MIMO beamforming za povećanje kapaciteta.....	36
8. CST Studio.....	37
8.1. Antena sa 2,4 GHz .....	37

8.2. Antena sa 3,6 GHz .....	41
8.3. Antena sa 24 GHz .....	47
8.4. Usporedba svih antena .....	50
9. Zaključak .....	51
10. Literatura.....	52
Popis slika.....	56

# 1. Uvod

U današnjem digitalnom dobu, brzi razvoj tehnologije i porast potrebe za brzim i pouzdanim bežičnim komunikacijama doveo je do pojave 5G tehnologije. 5G je peto generacijsko bežično mrežno rješenje koje obećava revoluciju u telekomunikacijskoj industriji, pružajući veće brzine prijenosa podataka, manju latenciju i veću pouzdanost.

Jedan od ključnih faktora koji omogućuje postizanje visokih performansi i optimalne pokrivenosti u 5G mrežama su napredni antenski sustavi. Antene su ključne za prijenos i prijem signala u bežičnim komunikacijama, a u kontekstu 5G mreža, imaju posebnu važnost zbog povećanih zahtjeva u smislu brzine prijenosa podataka, kapaciteta mreže, niske latencije i šire pokrivenosti [1].

Ovaj rad ima cilj pružiti uvid u značaj antena za 5G komunikacijske sustave i istražiti različite aspekte njihovih karakteristika i zahtjeva. Pregledat ćemo osnove antena i elektromagnetske propagacije, kao i tipične vrste antena koje se koriste u 5G mrežama. Također ćemo istražiti ključne zahtjeve koje 5G antene moraju zadovoljiti, poput visokih brzina prijenosa podataka, kapaciteta za povezivanje velikog broja uređaja (*engl. Internet of Things, IoT*), niske latencije, pouzdanosti, pokrivenosti i energetske učinkovitosti.

Razumijevanje uloge antena u 5G komunikacijskim sustavima i zadovoljavanje zahtjeva koje postavlja 5G tehnologija ključno je za osiguravanje visokih performansi i poboljšane korisničke doživljaje. Napredne tehnike poput MIMO (*engl. Multiple-Input Multiple-Output*) tehnologije i oblikovanja snopa pružaju mogućnosti za poboljšanje kapaciteta, performansi i efikasnosti 5G antena.

U nastavku ovog rada, detaljnije ćemo istražiti MIMO tehnologiju i tehnike oblikovanja snopa te njihovu primjenu u 5G antenama. Razumijevanje tih tehnika i njihov utjecaj na 5G mreže omogućit će nam bolje razumijevanje [2].

## 2. Mobilne mreže

Mobilne mreže su infrastruktura koja omogućava bežičnu komunikaciju između mobilnih uređaja poput pametnih telefona, tableta, laptopova i drugih uređaja koji podržavaju bežično povezivanje. Glavna svrha mobilnih mreža je omogućiti korisnicima da komuniciraju, razmjenjuju podatke i pristupaju internetu dok su u pokretu, bez potrebe za fiksnim žičanim povezivanjem. Mobilne mreže se razvijaju kroz generacije, koje se označavaju brojevima kao što su 2G, 3G, 4G i 5G. Svaka generacija donosi napredak u brzini prijenosa podataka, kapacitetu mreže i sposobnostima za podršku različitim uslugama.

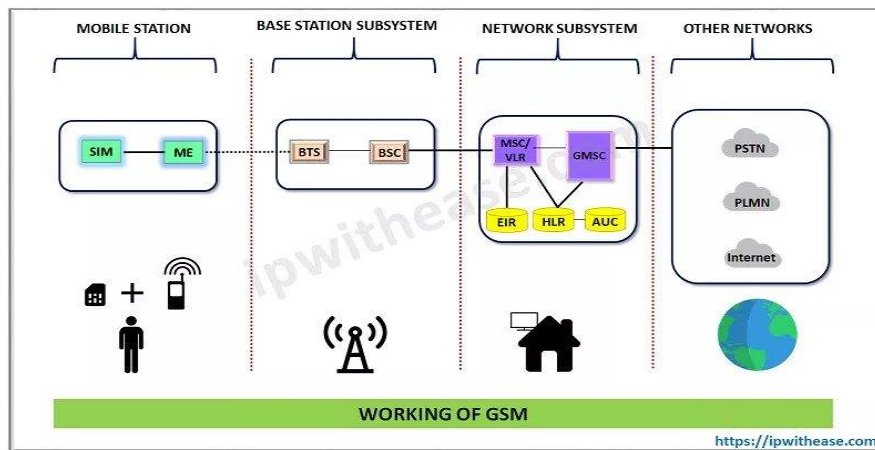
Mobilne mreže se oslanjaju na bazne stanice, koje su postavljene diljem teritorija kako bi pokrile široko područje. Svaka bazna stanica ima određeni domet, a uređaji se prebacuju s jedne stanice na drugu kako se korisnik kreće, osiguravajući neprekidnu komunikaciju. Važno je napomenuti da razvoj mobilnih mreža nije samo tehnički, već i regulatorni i ekonomski proces. Države i telekomunikacijske kompanije igraju ključnu ulogu u razvoju, standardizaciji i implementaciji mobilnih mreža kako bi omogućili korisnicima bolju povezivost i nove tehnološke mogućnosti.

	Multipleksiranje	Tehnologija	Tehnologija prijenosa	Algoritam za ispravljanje pogrešaka	Brzina prijenosa	Frekvencijski pojas	Širina pojasa	Aplikacija
1G	FDMA,	AMPS	komutacija linija	-	2,4 kbit/s	800 MHz		Glas
2G	FDMA, TDMA, CDMA	GSM	komutacija linija	-	10 kbit/s	800 / 900 / 1800 / 1900 MHz	25 MHz	Glas, podaci
3G	CDMA	WCDMA, UMTS, CDMA 2000, HSPA / HSDPA	komutacija linija komutacija paketa	Turbo kodovi	384 kbit/s – 5 Mbit/s	800 / 850 / 900 / 1800 / 1900 / 2100 MHz	25 MHz	Glas, podaci, video poziv
4G	OFDMA	LTEA, SCFDMA, WIMAX	komutacija paketa	Turbo kodovi	100 Mbit/s – 200 Mbit/s	2-8 GHz	100 MHz	Glas, podaci, video poziv, HDTV, online igre
5G	BDMA, OFDMA, NOMA, FBMC	NR	komutacija paketa	LDPC	10 Gbit/s – 50 Gbit/s	FR1: 410 - 7125 MHz FR2: 24,25 – 71 GHz	FR1: 100 MHz FR2: 800 MHz	Glas, podaci, video poziv, UHDTV, virtualna stvarnost

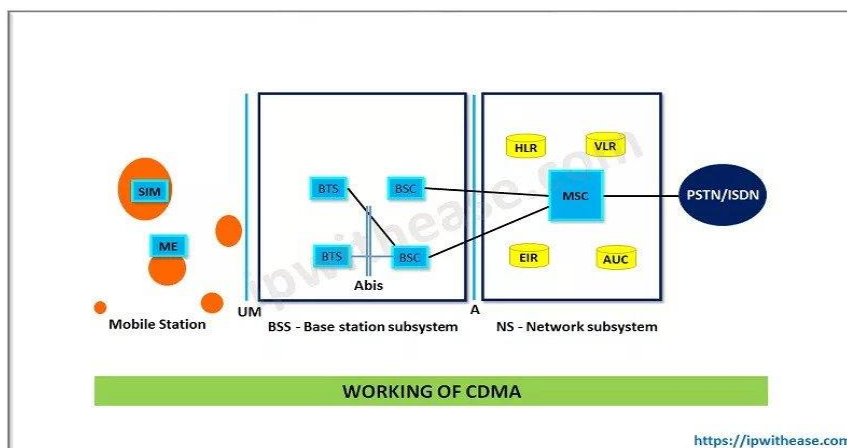
Slika 2.1 Usporedba mobilnih mreža, Emil Dumić, Osnove antena, 2023.

## 2.1. 2G

2G mreže su uvedene su kao nasljednica analogne 1G tehnologije i donijele su značajna poboljšanja u usporedbi s prethodnom generacijom. Ključne karakteristike 2G mreža uključuju digitalnu komunikaciju, više usluga, digitalnu modulaciju (Gaussian minimum-shift keying, GMSK), globalnu dostupnost, brži prijenos. 2G tehnologije uključuju GSM (*Global System for Mobile Communications*) i CDMA (*Code Division Multiple Access*), koje su bile dominantne u različitim dijelovima svijeta. GSM je bio najčešći standard u Europi i većem dijelu svijeta, dok je CDMA bio više prisutan u Sjedinjenim Američkim Državama i nekim drugim regijama [4].



Slika 2.2: GSM, Izvor: Rashmi Bhardwaj, *CDMA vs GSM: Detailed Comparison of Mobile Technologies*, IP With Ease, 2021.



Slika 2.3: CDMA, Izvor: Rashmi Bhardwaj, *CDMA vs GSM: Detailed Comparison of Mobile Technologies*, IP With Ease, 2021.

Digitalna komunikacija 2G mreže koriste digitalne signale umjesto analognih, što rezultira boljim kvalitetom glasa, smanjenjem šuma i interferencija te efikasnijim korištenjem raspoloživog spektra. Više usluga omogućile su slanje SMS poruka i neke osnovne podatkovne usluge. Ovo je predstavljalo korak naprijed u odnosu na isključivo glasovne 1G mreže. Digitalni modulacija digitalne modulacijske tehnike kao što su (FDMA *Frequency Division Multiple Access*) i TDMA (*Time Division Multiple Access*) kako bi omogućile više korisnika da dijele istu frekvenciju. Globalna dostupnost omogućila je širenje mobilnih usluga na globalnoj razini, što je važan korak prema stvaranju globalno povezane mreže. U usporedbi s 1G mrežama, 2G mreže su omogućile brže prijenos podataka, što je otvorilo vrata za osnovne podatkovne usluge [5].



### **2.2.3G**

3G je treća generacija mobilne mreže. Ova mreža donosi poboljšane kapacitete za prijenos podataka i omogućuje širok spektar naprednih usluga koje su se oslanjale na mobilni internet i multimedijalne aplikacije. 3G ima brži prijenos podataka, multimediju, video pozive i globalnu dostupnost. Dvije glavne tehnologije koje su se koristile za implementaciju 3G mreža bile su UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) i CDMA2000 (*Code Division Multiple Access 2000*). Ovisno o regiji, jedna od ovih tehnologija dominirala je u implementaciji 3G usluga.

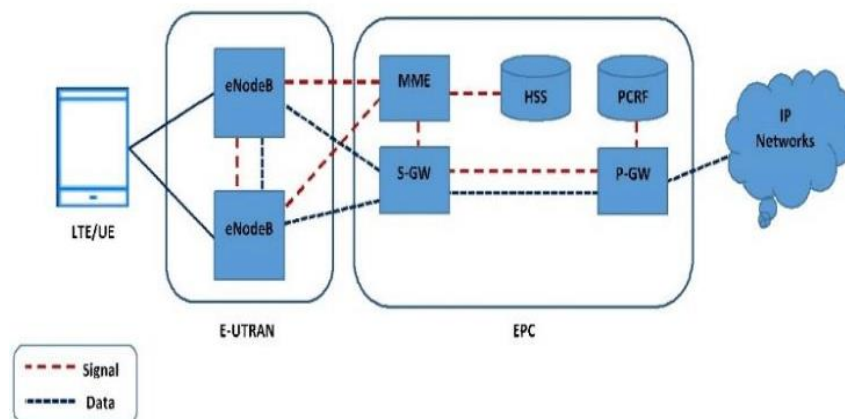
Jedna od glavnih karakteristika 3G mreža je omogućavanje brzog prijenosa podataka u usporedbi s prethodnim 2G tehnologijama. Ovo je omogućilo bolju podršku za mobilni internet, što je značilo da su korisnici mogli surfati webom, slati e-maileve i pristupati online sadržajima s većom učinkovitošću. 3G je omogućio visokokvalitetne video pozive putem mobilnog uređaja. Ovo je predstavljalo znatno unaprjeđenje u odnosu na samo glasovne pozive koji su bili dostupni u prethodnim generacijama. Zahvaljujući većim brzinama prijenosa podataka, 3G je omogućio razvoj raznovrsnih multimedijalnih aplikacija poput strujanja glazbe i videosadržaja, online igara te mobilnih aplikacija koje zahtijevaju brz prijenos podataka. S razvojem 3G mreža došlo je i do ubrzanog razvoja pametnih telefona i drugih mobilnih uređaja koji su bili sposobni iskoristiti prednosti brzog internetskog pristupa i naprednih aplikacija. Mobilne komunikacije postale su dostupne na globalnoj razini, čime su se omogućili mobilni internetski pristup i napredne usluge širom svijeta [5].

### **2.3. 4G**

4G mreže predstavljaju značajan skok u brzini i kapacitetima u odnosu na prethodne generacije. Ove mreže omogućavaju brzine prijenosa podataka koje su puno veće od onih u 3G mrežama, omogućujući podršku za zahtjevne aplikacije kao što su prijenos visokokvalitetnih videosadržaja, online igre i druge napredne usluge. Standardi koji se koriste za 4G mreže uključuju LTE (*Long-Term Evolution*) i (*Worldwide*

*Interoperability for Microwave Access*). LTE je postao dominantan standard za 4G u većem dijelu svijeta, dok je WiMAX bio prisutan u nekim manjim regijama.

Latencija se odnosi na vrijeme potrebno za prijenos podataka između uređaja i mreže. 4G mreže su smanjile latenciju, što je poboljšalo odaziv i performanse za aplikacije koje zahtijevaju brzu reakciju, kao što su online igre i aplikacije u stvarnom vremenu.. 4G mreže omogućuju znatno veće brzine prenosa podataka u odnosu na prethodne generacije. Ovo je omogućilo brzi pristup internetu, brzo preuzimanje sadržaja i glatko strujanje videosadržaja u visokoj rezoluciji. 4G mreže uključuju tehnike kao što su MIMO, koje koriste više antena za bolju propusnost i pouzdanost signala, čime se postiže bolja pokrivenost i kvaliteta signala. Omogućile su razvoj i širenje naprednih usluga poput HD video streaminga, videokonferencija visoke kvalitete, visokokvalitetne VoIP komunikacije (*Voice over Internet Protocol*) i brzih mobilnih aplikacijai općenito povećanjebroja korisnika zbog povećanog kapaciteta mreže [6].



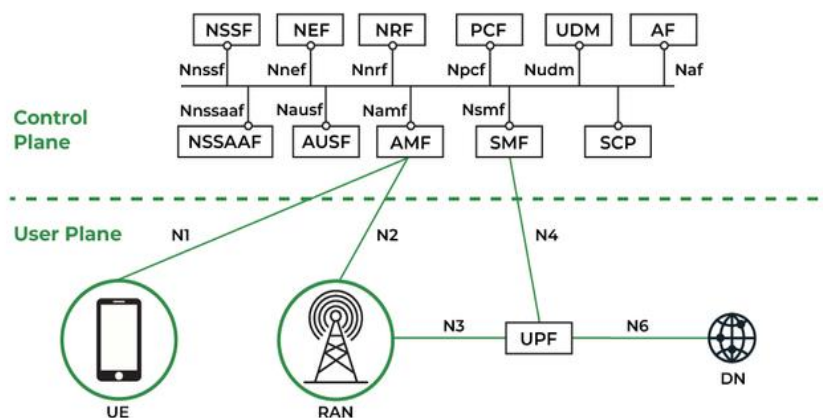
Slika 2.4: 4G struktura , LN Degambur, A. E. U. Mungur, S. Armoogum, S. Pudaruth, *Resource Allocation in 4G and 5G Networks: A Review*, ResearchGate, 2021.

### 3. Uvod u 5G tehnologiju

5G omogućuje korisnicima da preuzimaju velike datoteke i strujanje sadržajavisoke rezolucije brže nego ikad prije. Također će podržavati napredne tehnologije poput VR (*Virtual Reality*) i AR (*Augmented Reality*), koje zahtijevaju velike količine podataka za glatko i realistično iskustvo.

- Niža latencija: odnosi se na vrijeme koje je potrebno da se podaci prenose između uređaja. 5G tehnologija ima značajno nižu latenciju u usporedbi s prethodnim generacijama. To je ključno za aplikacije koje zahtijevaju trenutne odgovore i reakcije, poput autonomnih vozila, industrijske automatizacije i igara u stvarnom vremenu. Niža latencija omogućuje gotovo trenutačnu interakciju između uređaja, što otvara vrata za nove inovativne primjene.
- Veća mrežna povezanost: istovremeno povezivanje ogromnog broja uređaja na mrežu istovremeno. Ovo je ključno za razvoj IoT, gdje će milijarde uređaja biti međusobno povezane i razmjenjivati podatke. Očekuje se da će 5G podržavati veliku gustoću povezanih uređaja, kao što su senzori u pametnim gradovima, medicinskim uređajima, pametnim kućama i industrijskoj opremi.
- Revitalizacija industrije 5G tehnologija će imati značajan utjecaj na različite industrije. Primjerice, u zdravstvu će omogućiti razvoj naprednih telemedicine rješenja, daljinske dijagnostike i operacija te poboljšati praćenje zdravlja pacijenata. U području transporta, 5G će pridonijeti razvoju pametnih prometnih sustava, autonomnih vozila i povezane infrastrukture. Također će promijeniti način na koji se proizvodi industrija, omogućujući naprednu automatizaciju i umrežavanje strojeva.
- Izazovi i brige: unatoč svim prednostima, implementacija 5G tehnologije suočava se s nekim izazovima. Izgradnja potrebne infrastrukture za 5G mreže zahtijeva znatna ulaganja i promjene u postojećim telekomunikacijskim sustavima. Također postoje zabrinutosti vezane uz sigurnost mreže i zaštitu privatnosti korisnika

5G tehnologija ima potencijal da transformira način na koji se povezujemo i komuniciramo, pružajući nevjerovatne brzine, smanjenu latenciju i sposobnost povezivanja velikog broja uređaja [7].



Slika 3.1: 5G struktura , Tushar Anand, 5G Network Architecture, GeeksforGeeks, 2022.

### 3.1. Pregled 5G mreža i njezine svrhe

Peta generacija mobilnih mreža, poznata kao 5G, pojavljuje se kao sljedeća velika stvar u telekomunikacijskoj industriji. U ovom diplomskom radu, pružat ćemo pregled 5G mreža i istaknuti njihove ključne karakteristike.

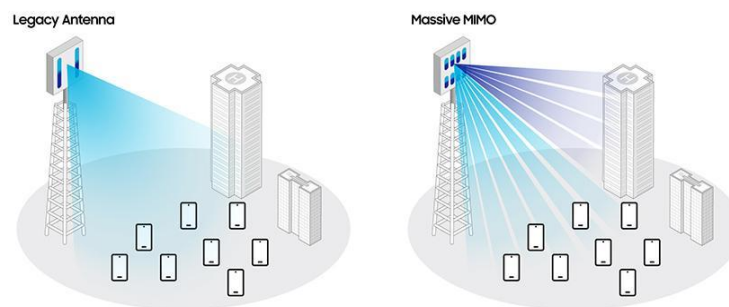
Od 5G mreže očekuje se da omoguće brže i pouzdanije bežične komunikacijske usluge u usporedbi s prethodnim generacijama. 5G mreže su dizajnirane da podrže različite usluge, uključujući poboljšanu mobilnu širokopoljasnu vezu, masovnu komunikaciju strojeva i ultra-pouzdanu i niskolatencijsku komunikaciju. Razvoj 5G mreža započeo je 2012. godine kada je Međunarodna telekomunikacijska unija (engl International Telecommunication Union, ITU) utvrdila zahtjeve za 5G mreže. Od tada, različite tvrtke i organizacije intenzivno ulažu u istraživanje i razvoj kako bi 5G mreže postale stvarnost. Očekuje se da će implementacija 5G mreža donijeti značajne koristi društvu, uključujući brže brzine interneta, poboljšanu povezanost za udaljene regije i omogućavanje novih aplikacija poput autonomnih vozila i pametnih gradova [8].

5G mreže imaju nekoliko ključnih značajki i prednosti koje ih razlikuju od prethodnih generacija. Jedna od najistaknutijih značajki 5G mreža je njihova sposobnost podrške ultra-niskoj latenciji, što je ključno za aplikacije u stvarnom vremenu poput autonomnih vozila, virtualne i proširene stvarnosti te daljinske kirurgije. Druga ključna značajka 5G mreža je podrška masovnoj komunikaciji strojeva, omogućujući povezivanje milijardi uređaja. To će revolucionirati industriju IoT, budući da će omogućiti besprijekornu integraciju pametnih domova, gradova i sustava prijevoza. Osim toga, 5G mreže pružaju veće brzine prijenosa podataka u usporedbi s prethodnim generacijama, što će omogućiti bržu i učinkovitiju komunikaciju [9].

Očekuje se da će do 2025. godine globalno biti oko 25 milijardi IoT uređaja koji će generirati ogromne količine podataka. Visoka brzina i niska latencija 5G mreža omogućit će obradu i analizu tih podataka u stvarnom vremenu, što će dovesti do razvoja novih aplikacija i usluga. Te aplikacije će uključivati proširenu stvarnost, virtualnu stvarnost i mješovitu stvarnost, što će transformirati nekoliko industrija, uključujući igre, obrazovanje i učenje [8].

### 3.2. Zahtjevi za antenskim sustavima u 5G mrežama

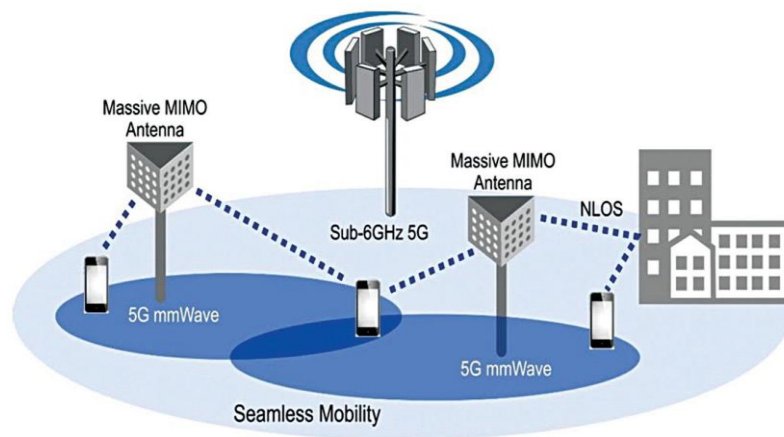
Kako tehnologija telekomunikacija nastavlja napredovati, evolucija 5G mreža postala je glavni prioritet za tvrtke koje žele ponuditi brže i pouzdanije veze. Jedan od najvažnijih dijelova 5G mreža je antenski sustav, koji ima ključnu ulogu u osiguravanju učinkovitog prijenosa podataka. Nedavni napredak u tehnologiji antena omogućio je razvoj 5G mreža od kojih se očekuje da će revolucionizirati način na koji komuniciramo. 5G mreže zahtijevaju značajan porast broja antena koje se postavljaju kako bi se postigli željeni viši podatkovni prijenos i poboljšano pokrivanje mreže. Da bi se to postiglo, tehnologija antena je poboljšana kako bi podržala sustave s MIMO, u kojima se koriste više antena za prijenos i prijem. Te antene mogu biti usmjerene tradicionalnim tehnikama ili novorazvijene antene za usmjeravanje snopa koje omogućuju precizniji i ciljaniji prijenos signala. Dodatno, predložena je upotreba viših frekvencijskih opsega, poput milimetarskih valnih duljina, kako bi se povećala raspoloživa propusnost i dodatno poboljšao kapacitet mreže. Međutim, ovi signali visoke frekvencije su osjetljiviji na slabljenje i blokadu signala, što je dovelo do razvoja naprednih antenskih polja koja mogu dinamički prilagođavati smjer i oblik snopa kako bi održala snažnu i stabilnu vezu.



Slika 3.2: MIMO antena, Korea, Samsung Shares Massive MIMO Roadmap in New Whitepaper, Samsung Global Newsroom, 2023.

Dizajn antene trebao bi podržavati visoku frekvenciju rada potrebnu za 5G. Više frekvencije koje se koriste u 5G zahtijevaju manje antene, stoga bi dizajn trebao imati za cilj napraviti antene kompaktnima i učinkovitima. Drugo, dizajn antenskog sustava trebao bi uzeti u obzir tehnologiju usmjeravanja snopa, koja je ključna za mogućnost

5G korištenja MIMO za komunikaciju. Tehnologija usmjeravanja snopa omogućuje antenskom sustavu fokusiranje radijskih valova u određenom smjeru, što poboljšava kvalitetu signala i smanjuje smetnje. Treće, dizajn antenskog sustava mora uzeti u obzir lokaciju postavljanja, koja može biti na zgradi, stupu ili maloj ćeliji. Dizajn treba biti dovoljno fleksibilan da se prilagodi različitim scenarijima postavljanja. Očekuje se da će antenski sustav 5G trošiti puno energije, stoga bi dizajn trebao imati za cilj minimiziranje potrošnje energije i rasipanja topline kako bi se osigurala energetska učinkovitost [10].



Slika 3.3: Antena za 5G komunikaciju, Ayushee Sharma, *Antennas For Emerging 5G Communication, Electronics For You, 2020.*

## 4. Osnove antena

Antene su ključna komponenta suvremenih komunikacijskih sustava te igraju značajnu ulogu u prijenosu i primanju radiofrekvencijskih signala. Razumijevanje osnova antena važno je za svakog mladog elektroinženjera ili stručnjaka za telekomunikacije.

Teorija antena pruža temeljno razumijevanje kako antene rade, njihove karakteristike i performanse [11]. Antene su uređaji koji prenose i primaju elektromagnetske valove te rade tako da pretvaraju električne signale u elektromagnetske valove i obrnuto. Teorija antena obuhvaća širok spektar tema, uključujući vrste antena, obrasce zračenja, usklađivanje impedancije i polarizaciju. Uključuje proučavanje ponašanja antena u različitim okruženjima, poput slobodnog prostora, bliske i daleke zone i različitih frekvencija. Razumijevanje teorije antena ključno je za dizajniranje i optimizaciju antenskih sustava za različite primjene, uključujući bežičnu komunikaciju, radar i daljinsko osjetilne sustave. Nadalje, teorija antena ima značajnu ulogu u mjerenjima antena, modeliranju i simulacijama antena. Stoga je važno proučavati teoriju antena kako bismo dizajnirali i razvijali učinkovite i pouzdane komunikacijske sustave koji udovoljavaju rastućoj potražnji za bežičnim komunikacijskim uslugama visokih brzina i kvalitete [11].

Najčešće vrste antena su dipolne, monopolne, petlje i pločaste antene. Dipolne antene su najjednostavniji i najčešće korištena vrsta antena. Sastoje se od dvaju prirodnih elemenata koji su simetrično poravnati duž iste osi. Monopolne antene, s druge strane, slične su dipolnim antenama, ali imaju samo jedan provodni element i zemaljsku ravninu. Pettle su još jedna vrsta antena koja ima provodnu žicu savijenu u određeni oblik. Ova vrsta antene posebno je korisna na područjima gdje je prostor ograničen, poput malih uređaja poput mobilnih telefona. Pločaste antene su ravne i tanke, što ih čini idealnim za upotrebu u kompaktnim elektroničkim uređajima. Ove antene se često koriste u bežičnim komunikacijskim sustavima, poput Wi-Fi-ja ili Bluetootha. Svaka vrsta antene ima svoje jedinstvene karakteristike i primjene. Na primjer, dipolne antene se koriste u radijskom i televizijskom emitiranju, dok se petlje koriste u sustavima za pronalaženje smjera i navigaciji. Monopolne antene imaju široku primjenu, uključujući u mobilnim mrežama, satelitskim komunikacijskim sustavima i



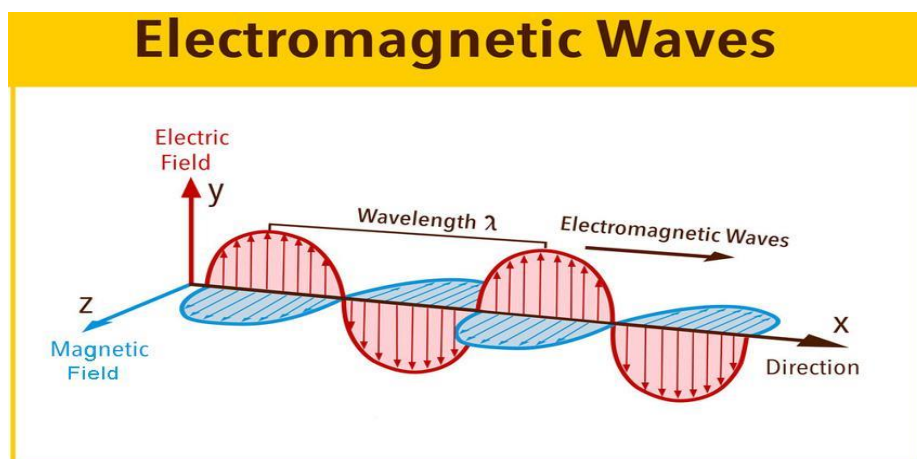
radar sustavima. Pločaste antene se također koriste u GPS-u i satelitskim komunikacijskim sustavima. Zaključno, razumijevanje različitih vrsta antena i njihovih primjena ključno je za dizajniranje i implementaciju uspješnih bežičnih komunikacijskih sustava. [12]

Performanse antena utječu različiti faktori poput frekvencije, obrasca zračenja, dobitka, polarizacije i usklađivanja impedancije. Jedan od najvažnijih parametara za performanse antena je oblik zračenja, koji određuje smjer i jačinu elektromagnetskog polja koje antena zrači. Oblik zračenja se može mijenjati mijenjanjem fizičke strukture antene, poput oblika, veličine i orijentacije elemenata antene. Optimizacija oblika zračenja ključna je kako bi se osiguralo da antena zrači u željenom smjeru i smanjila mogućnost smetnji s drugim uređajima. Još jedan ključni parametar za performanse antena je dobitak, koji predstavlja količinu snage zračene u određenom smjeru. Antena s velikim dobitkom poželjna je za komunikaciju na dugim udaljenostima, dok se antena manjeg dobitka preferira za komunikaciju na kratkim udaljenostima. Usklađivanje impedancije također je ključno za performanse antena, jer određuje količinu snage koja se prenosi od odašiljača do antene. Pravilno usklađivanje impedancije može minimizirati gubitak signala i maksimizirati učinkovitost prijenosa snage [13].

## 4.1. Osnovni koncepti elektromagnetskih valova i propagacije

Razumijevanje elektromagnetskih valova i njihovih svojstava, istraživanje načina na koji se šire kroz prostor te njihove raznolike primjene u komunikaciji i tehnologiji ključno je za različita područja proučavanja.

Elektromagnetski valovi su ključna komponenta moderne tehnologije i imaju širok raspon primjena u svakodnevnom životu. Ovi valovi su oblik energije koji putuje kroz prostor brzinom svjetlosti i mogu se okarakterizirati po frekvenciji, valnoj duljini i amplitudi. Elektromagnetski valovi se sastoje od dvaju okomitih oscilirajućih polja, električnog i magnetskog, koji se šire kroz prostor i interagiraju s materijom. Električno polje proizvode nabijene čestice i periodično mijenja smjer, dok magnetsko polje proizlazi iz promjena električnih polja. Elektromagnetski valovi mogu se klasificirati prema frekvenciji ili valnoj duljini, koje su obrnuto proporcionalne. Što je veća frekvencija, to je kraća valna duljina i obrnuto. Elektromagnetski valovi se mogu reflektirati, refraktirati i difraktirati, što su svojstva koja im omogućuju uporabu u raznim primjenama poput komunikacije, medicine i industrije. Na primjer, radiovalovi se koriste za bežičnu komunikaciju, mikrovalovi se koriste za kuhanje hrane, a rendgenske zrake se koriste za medicinsko snimanje. Razumijevanje svojstava elektromagnetskih valova ključno je za dizajn i optimizaciju ovih primjena, kao i za napredak znanosti i tehnologije [14].



Slika 4.1: Elektromagnetski val, Retevis Solutions, How does the antenna receive electromagnetic waves?, Retevis Solutions, 2020.

D.R. Smith i D. Schurig u [16] su proveli istraživanje o tome kako se elektromagnetski valovi šire u materijalima s permitivnošću ili permeabilnošću manjom od 0, a njihovi nalazi su ključni za razumijevanje načina putovanja elektromagnetskih valova i interakcije s različitim materijalima. Smith i Schurig koristili su metamaterijal sastavljen od niza koncentričnih prstenova s promjenjivim širinama koji su razdvojeni dielektričnim materijalom. Metamaterijal je dizajniran da ima negativan indeks loma, što znači da može savijati svjetlost u suprotnom smjeru u usporedbi s normalnim materijalima. Upotrebom ovog metamaterijala, Smith i Schurig su dokazali da elektromagnetski valovi mogu putovati kroz prostor bez gubitka energije ili amplitude. Ovo je suprotno tradicionalnom shvaćanju da elektromagnetski valovi trpe slabljenje kako se kreću kroz prostor. Osim toga, njihovo istraživanje pokazalo je da se metamaterijal može koristiti za stvaranje leća koje mogu fokusirati elektromagnetske valove na točku manju od valne duljine samog vala. Ovo otkriće predstavlja značajan napredak u području optike i otvara nove mogućnosti za dizajn leća i drugih optičkih uređaja. Sveukupno, istraživanje Smitha i Schuriga o načinu na koji se elektromagnetski valovi šire kroz prostor pružilo je vrijedne uvide u ponašanje elektromagnetskih valova i dovelo do značajnih napretka u području optike [15].

Primjene elektromagnetskih valova u komunikaciji i tehnologiji su raznolike i široke. Elektromagnetski valovi imaju različite frekvencije, pri čemu se svaka frekvencija koristi za određenu svrhu. Na primjer, radiovalovi se koriste u svrhe komunikacije, a njihov raspon frekvencija je od 3 kHz do 1 GHz. Radiovalovi se koriste za radio i televizijsko emitiranje, mobilne komunikacijske mreže i satelitsku komunikaciju. Mikrovalovi, koji imaju raspon frekvencija od 1 GHz do 100 GHz, koriste se u radarima, satelitskoj komunikaciji i mikrovalnim pećnicama. Infracrveni valovi, koji imaju raspon frekvencija od 300 GHz do 400 THz, koriste se u daljinskim upravljačima i sigurnosnim sustavima. Vidljiva svjetlost, koja ima raspon frekvencija od 400 THz do 800 THz, koristi se u komunikaciji putem optičkih vlakana. Rendgenske zrake, koji imaju raspon frekvencija od 30 petaherca (PHz) do 30 eksaherca (EHZ), koriste se u medicinskom snimanju. Stoga su primjene elektromagnetskih valova u komunikaciji i tehnologiji široke i ključne za suvremeno društvo [16].

## 4.2. Maxwellove jednadžbe

Maxwellove jednadžbe predstavljaju temeljnu teoriju elektromagnetizma koju je razvio James Clerk Maxwell u 19. stoljeću. Ove jednadžbe su ključne za razumijevanje elektromagnetskog ponašanja prirode i igraju presudnu ulogu u mnogim aspektima našeg svakodnevnog života i tehnologije. Električno polje (E) je koncept koji opisuje kako električna sila djeluje na naboj. Jakost električnog polja (D) uključuje električno polje i polarizacijsku gustoću materijala. Polarizacija (označena s P) predstavlja gustoću trajnih i induciranih električnih dipolnih momenata u materijalu, a zajedno s jakostima električnog polja čini električno ponašanje materijala. Magnetizacijsko polje (H) odnosi se na ukupno magnetno polje u materijalu, dok je magnetizacija (M) gustoća trajnih i induciranih magnetskih dipolnih momenata u materijalu. Magnetizacijsko polje i magnetizacija igraju ključnu ulogu u opisu magnetskog ponašanja materijala i povezani su s jakostima magnetskog polja (H). U Maxwellovim jednadžbama se često koriste permitivnost ( $\epsilon$ ) i permeabilnost ( $\mu$ ) sredstva. Permitivnost se odnosi na sposobnost materijala da podrži električna polja, dok se permeabilnost odnosi na sposobnost materijala da podrži magnetska polja. U vakuumu su ove konstante  $\epsilon_0$  i  $\mu_0$ , i one su povezane brzinom svjetlosti  $c$ . Maxwellove jednadžbe mogu se izraziti na dva načina - u integralnom i diferencijalnom obliku. Integralni oblik koristi integralne operacije za opisivanje ponašanja polja u prostoru, dok diferencijalni oblik koristi derivacije kako bi opisao promjene polja u malim područjima. Oba oblika su međusobno ekvivalentna i koriste se ovisno o specifičnostima problema. Ovaj temeljni koncepti omogućuju razumijevanje kako električna i magnetska polja interagiraju u materijalima i prostoru te kako se elektromagnetski valovi šire kroz prostor. Maxwellove jednadžbe čine temelj moderne elektromagnetske teorije i imaju dubok utjecaj na razvoj tehnologije i naše razumijevanje elektromagnetskog svijeta oko nas. Zakoni Maxwellove jednadžbe su Gaussov zakon za električno polje (Prva Maxwellova jednadžba), Gaussov zakon za magnetizam (Druga Maxwellova jednadžba), Maxwell-Faradayeva jednadžba (Treća Maxwellova jednadžba) i Ampèreov zakon s posmačnom strujom (Četvrta Maxwellova jednadžba).

- Gaussov zakon za električno polje (Prva Maxwellova jednadžba): Ova jednadžba govori o tome kako električno polje (označeno s E) utječe na naboje

u prostoru. Kaže da ukupni električni tok kroz zatvorenu površinu proporcionalno ovisi o ukupnom električnom naboju unutar te površine. Ovo je osnovno pravilo koje opisuje kako se električna polja šire i kako interagiraju s nabojima.

- Gaussov zakon za magnetizam (Druga Maxwellova jednađžba): Ova jednađžba govori o magnetskom polju (označenom s  $B$ ) i tvrdi da ne postoje magnetski monopoli, što znači da magnetsko polje nema izvore ni krajeve. Ova jednađžba također opisuje kako magnetsko polje proživljava promjene kroz površinu.
- Maxwell-Faradayeva jednađžba (Treća Maxwellova jednađžba): Ova jednađžba opisuje pojavu elektromagnetske indukcije. Kada se magnetsko polje kroz površinu zatvorene petlje mijenja s vremenom, to uzrokuje stvaranje električnog polja oko te petlje. Ovo je osnova za razumijevanje kako se generiraju električni tokovi u generatorima.
- Ampèreov zakon s posmačnom strujom (Četvrta Maxwellova jednađžba): Ova jednađžba povezuje magnetsko polje s električnim tokom koji prolazi kroz zatvorenu petlju. Osim toga, uključuje i pojam posmačne struje, što je inovacija koju je Maxwell dodao kako bi objasnio elektromagnetske valove.

Kroz ove četiri osnovne jednađžbe, Maxwell je uspio uskladiti različite aspekte elektromagnetskog ponašanja i pokazati kako se električna i magnetska polja međusobno povezuju. Ove jednađžbe također omogućuju objašnjenje širenja elektromagnetskih valova, uključujući svjetlosne valove, koji su fundamentalni za optiku i komunikacije [17].

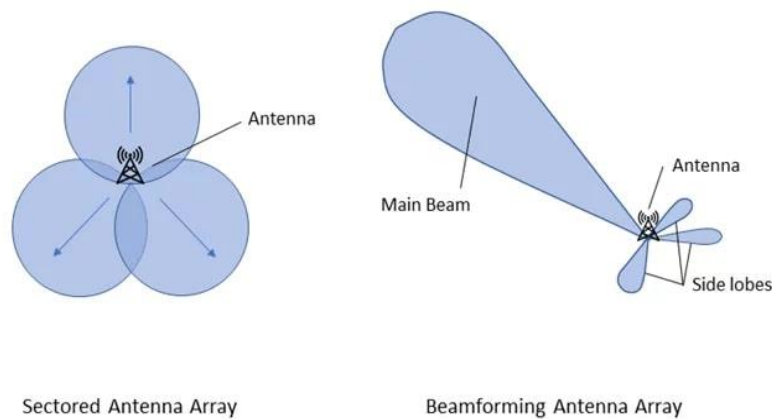
### **4.3. Ključne karakteristike antenskih sustava**

Antene su ključne komponente u području radiokomunikacije. Postoji nekoliko vrsta antena koje imaju specifične svrhe. Najčešća vrsta je dipolna antena koja se sastoji od dva metalna šipkasta elementa koji su paralelni jedan s drugim i protežu se u suprotnim smjerovima. Ova antena se koristi za prijenos i primanje radiovalova u horizontalnom smjeru i idealna je za komunikaciju na kratkim udaljenostima. Druga vrsta antene je petlja antena, koja je spirala od žice oblikovana u petlju. Ova antena se koristi za primanje slabih signala u određenom smjeru i često se koristi u radio i televizijskim prijemnicima. Yagi antena, također poznata kao usmjerena antena, je usmjerena antena koja se koristi za komunikaciju na velike udaljenosti. Sastoji se od niza elemenata koji su raspoređeni prema određenom obrascu i često se koristi za televizijsko i radio emitiranje. S druge strane, parabolička antena je antena oblika tanjura koja se koristi za satelitsku komunikaciju. Dizajnirana je da fokusira radio valove na određenu točku i često se koristi za televiziju, internet i telefonsku komunikaciju [18].

### **4.4. Tipične vrste antena i njihove primjene**

Antena je uređaj koji pretvara električne signale u elektromagnetske valove i obrnuto. Sastoji se od provodnika koji može zračiti ili primati elektromagnetske valove. Antene se klasificiraju prema svojim fizičkim oblicima i smjeru raspodjele zračenja. Na primjer, dipol antena je uobičajeni tip antene koja se sastoji od dva prirodna elementa. Zrači elektromagnetske valove u određenom smjeru koji je okomit na provodne elemente. Drugi tip antene je plošna (engl. patch) antena, koja je ravna struktura s metalnom plohompostavljenom na dielektrik ispod kojeg je ravnina uzemljenja (engl. ground plane). Plošne antene spadaju u mikrotrakaste (engl. microstrip) antene, iako se ponekad one poistovjećuju. Plošne antene su poznate po svom niskom profilu (engl. low profile) tj. maloj visini i širini te smjeru zračenja i usmjerenosti (engl. directivity).. Zaključno, razumijevanje osnova antenske tehnologije ključno je za inženjere i istraživače koji rade u području bežične komunikacije. To je složeno područje s raznovrsnim primjenama, a daljnja istraživanja u ovom području ključna su za napredak tehnologije bežične komunikacije.

Dok se svijet brzo kreće prema petoj generaciji bežične komunikacije, potreba za prijenosom podataka visoke brzine i komunikacijom s niskom latencijom sve više raste. Jedan od ključnih komponenti 5G mreža je antenski sustav, koji igra važnu ulogu u prijenosu i primanju bežičnih signala. Postoji nekoliko vrsta antena koje se koriste u 5G mrežama, uključujući plošne antene, antene milimetarskih valova i antene za usmjeravanje snopa (engl. beamforming). Plošne (patch) antene se široko koriste u 5G uređajima zbog svojeg niskog profila, male težine i isplativosti. Antene milimetarskih valova koriste se za visokofrekvencijske pojaseve u 5G mrežama, koje nude visoke brzine prijenosa podataka i pogodne su za komunikaciju na kratkim udaljenostima. Antene za usmjeravanje snopa su druga vrsta antenskog sustava koji se koristi u 5G mrežama radi poboljšanja jačine signala i smanjenja smetnji. Ove antene koriste napredne tehnike obrade signala kako bi usmjeravale signal u željenom smjeru, što rezultira boljim pokrivanjem i većim brzinama prijenosa podataka. Zaključno, korištenje različitih vrsta antena u 5G mrežama ključno je za postizanje brze i pouzdane komunikacije. Odabir odgovarajućeg antenskog sustava ovisi o različitim čimbenicima kao što su frekvencijski pojas, područje pokrivanja i brzine prijenosa podataka, među ostalim [21].



Slika 4.2: Beamforming, Riina., Beamforming Antennas –How they work and are tested?, Beamforming, 2021.

## 5. Zahtjevi 5G antena

Napreci u tehnologiji antena doveli su do razvoja visoko učinkovitih i kompaktnih antena koje su poboljšale performanse bežičnih komunikacijskih sustava. Razvoj naprednih materijala poput metamaterijala, grafena i ugljikovih nanocijevi omogućio je stvaranje inovativnih dizajna antena s iznimnim karakteristikama poput velikog pojačanja, niskog profila i visoke propusnosti. Osim toga, korištenje rekonfigurabilnih antena temeljenih na tehnologiji MEMS (engl. Micro-electromechanical systems tj. mikroelektromehanički sustavi) omogućilo je razvoj adaptivnih i prilagodljivih antena koje mogu raditi na više frekvencijskih pojaseva. Integracija umjetne inteligencije i algoritama strojnog učenja u dizajn antena također je dovela do razvoja inteligentnih antena koje se mogu prilagoditi promjenjivim uvjetima okoline i optimizirati svoje performanse. Napreci u tehnologiji antena omogućili su razvoj bežičnih komunikacijskih sustava sljedeće generacije koji nude visoke brzine prijenosa podataka, poboljšanu pouzdanost i prošireno pokrivanje. Implementacija 5G tehnologije zahtijeva dizajn antena koje mogu raditi na visokim frekvencijama. Upotreba milimetarskih valova u 5G komunikacijskim sustavima zahtijeva antene koje mogu raditi na frekvencijama iznad 24 GHz [20]. Ova tehnologija posebno je korisna za primjene koje zahtijevaju veliko pojačanje, poput antena baznih stanica. Drugi pristup je korištenje metamaterijala, koji se mogu koristiti za stvaranje antena s jedinstvenim elektromagnetskim svojstvima koja se ne nalaze u tradicionalnim materijalima. Metamaterijali imaju potencijal omogućiti stvaranje antena koje su manje, lakše i učinkovitije od tradicionalnih antena. Međutim, dizajn antena na temelju metamaterijala još je uvijek relativno nova područje, a potrebna su daljnja istraživanja kako bi se optimiziraju njihove performanse za 5G primjene. Sveukupno, dizajn 5G antena za visoke frekvencije je složen i izazovan zadatak koji zahtijeva inovativna rješenja poput tehnologije faznog niza i metamaterijala [22].

Jedan od ključnih zahtjeva za implementaciju 5G mreža je dostupnost dovoljnog radiospektra. To je zato što 5G mreže zahtijevaju visokofrekvencijske pojaseve koji trenutno nisu u upotrebi drugim bežičnim tehnologijama. Stoga, vlade i regulatorna tijela trebaju dodijeliti više spektra za 5G mreže kako bi se osiguralo da mreže mogu raditi na svojem punom kapacitetu. Još jedan zahtjev za implementaciju 5G mreža je



dostupnost napredne infrastrukture poput malih ćelija, optičkih kabela i računalstva na rubu mreže. To je zato što 5G mreže djeluju s velikim i zahtijevaju nisku latenciju, što se može postići samo kroz upotrebu napredne infrastrukture. Osim infrastrukture, implementacija 5G mreža također zahtijeva značajna ulaganja u istraživanje i razvoj kako bi se stvorile nove tehnologije i standarde koji su kompatibilni s 5G mrežama. Naposljetku, implementacija 5G mreža također zahtijeva povoljno regulatorno okruženje koje podržava inovacije i ulaganja. Stoga, vlade i regulatorna tijela trebaju surađivati s dionicima industrije kako bi stvorili poticajno okruženje koje olakšava implementaciju 5G mreža [23].

## **5.1. Visoke brzine prijenosa podataka**

Očekuje se da će 5G tehnologija omogućiti prijenos podataka brzinama do 10 gigabita po sekundi, što je deset puta brže od trenutnog standarda 4G. Tehnologija će također pružiti bolju povezanost, posebno na područjima s visokom gustoćom stanovništva, gdje je problem uobičajena mrežna gužva. Uvođenje 5G tehnologije očekuje se da će imati dalekosežne posljedice na različite industrije, od zdravstva do prijevoza, budući da će omogućiti razvoj novih aplikacija i usluga koje nisu bile moguće s prethodnim generacijama mobilnih mreža. Međutim, implementacija 5G tehnologije nije bez svojih izazova, poput visokih troškova infrastrukture i potrebe za dodatnom alokacijom spektra. Unatoč tim izazovima, koristi 5G tehnologije očekuju se da će nadmašiti troškove i očekuje se da će postati standardna tehnologija za mobilne mreže u sljedećim godinama [24].

Razvoj mobilnih komunikacijskih tehnologija pokretan je potrebom za većim brzinama prijenosa podataka, manjom latencijom i boljom kvalitetom usluge. Peta generacija (5G) mreže, koja je najnovija tehnologija mobilne komunikacije, obećava da će revolucionirati način na koji ljudi komuniciraju i međusobno djeluju. Prijenos podataka visoke brzine jedna je od ključnih značajki 5G mreža. 5G mreže koriste različite tehnike prijenosa podataka visoke brzine kao što su masivni MIMO, usmjeravanje snopa i tehnologija milimetarskih valova (mmWave). Masovno multipleksiranje više ulaza i više

izlaza je tehnika koja koristi veliki broj antena kako bi omogućila više korisnika da istovremeno prenose i primaju podatke. Usmjeravanje snopa je tehnika koja koristi usmjerene antene kako bi usmjerila prijenos podataka u određenom smjeru, što pomaže u smanjenju smetnji i povećanju jačine signala. Tehnologija mmWave koristi frekvencijski spektar više frekvencije za prijenos podataka visokim brzinama. Međutim, tehnologija mmWave ima ograničen domet i može biti podložna utjecaju okolišnih čimbenika poput kiše i prepreka [25].

## 5.2. Veliki kapacitet mreže i povezivanje velikog broja uređaja (IoT)

IoT je brzo rastuća mreža uređaja koja ima potencijal da revolucionizira način života i rada. Međutim, uspjeh IoT-a uvelike ovisi o kapacitetu i povezanosti mreže. U današnjem modernom dobu, gdje se broj povezanih uređaja povećava svakog dana, važnost kapaciteta mreže ne može se precijeniti. Osim toga, s velikim brojem uređaja u velikoj IoT mreži, povezivost može predstavljati značajan izazov.

Jedan od najvažnijih čimbenika za uspjeh IoT-a je kapacitet mreže. Kapacitet mreže je maksimalna količina podataka koja se može prenijeti preko mreže u određenom vremenskom razdoblju. Razlog zašto je kapacitet mreže toliko važan u IoT-u je zato što veliki broj uređaja povezanih na mrežu može brzo preopteretiti kapacitet mreže, uzrokujući kašnjenja ili čak kvarove u mreži. Kako bi se osiguralo da IoT uređaji mogu pravilno funkcionirati, mreže moraju imati dovoljno kapaciteta da podnesu povećani promet generiran tim uređajima. To zahtijeva ne samo povećanje propusnosti mreže, već i optimizaciju arhitekture mreže kako bi se smanjila kašnjenja i smanjio rizik od kvarova [26].

U brzo se mijenjajućem svijetu IoT, kapacitet mreže i povezanost su ključni faktori koji zahtijevaju stalnu pažnju i poboljšanje. Jedno od glavnih rješenja za poboljšanje kapaciteta mreže i povezanosti u IoT-u je usvajanje naprednih komunikacijskih tehnologija poput 5G, Wi-Fi 6 i LPWAN-a (engl. low-power wide area network tj. širokopojasne mreže malih snaga). Ove tehnologije nude veće brzine prijenosa podataka, manju latenciju i bolje pokrivanje, što ih čini idealnim za podršku ogromnom broju uređaja koji čine IoT ekosustav. Dodatno, računarstvo na rubu (engl. edge) može pomoći u smanjenju prometa podataka na mreži tako da se podaci obrađuju i analiziraju bliže izvoru, čime se smanjuje opterećenje na centralnoj mreži. Drugo rješenje je optimizacija infrastrukture mreže korištenjem tehnika poput "network slicing", gdje se mreža dijeli na manje, virtualizirane mreže koje se mogu prilagoditi specifičnim slučajevima uporabe IoT-a, čime se smanjuje zagušenje mreže i poboljšava ukupna performansa. Konačno, upotreba AI (engl. artificial intelligence tj. umjetna inteligencija) i algoritama ML (engl. machine learning tj. strojno učenje)

može pomoći u predviđanju i sprečavanju kvarova mreže, optimizaciji performansi mreže i automatizaciji zadatka upravljanja mrežom, što dovodi do učinkovitijeg i uspješnijeg rada mreže [27].

### 5.3. Niska latencija i pouzdanost

Niska latencija se odnosi na kašnjenje u vremenu koje sustav treba da odgovori na zahtjev korisnika. S druge strane, pouzdanost je sposobnost sustava da dosljedno i točno izvršava zadatke tijekom vremena. Ova dva faktora su ključna u različitim sustavima, uključujući komunikacijske mreže, financijske sustave i prometne sustave, među ostalima.

Pouzdanost je ključni faktor koji utječe na korisničko iskustvo na različite načine. Prema istraživanju iz 2019. godine, pouzdanost proizvoda je jedan od najvažnijih aspekata koji određuju zadovoljstvo korisnika i povjerenje u proizvod. Istraživanje je pokazalo da korisnici često napuštaju proizvod koji je nepouzdan ili ne ispunjava njihova očekivanja. To je zato što nepouzdanost podriiva korisnikovo povjerenje u proizvod i stvara tjeskobu u vezi s rezultatima korištenja. Na primjer, ako korisnik koristi mobilnu aplikaciju koja se često ruši ili se ne učitava, vjerojatno će postati frustriran i napustiti aplikaciju u potpunosti. Također, korisnici često dijele negativna iskustva s drugima, što može oštetiti ugled proizvoda ili usluge. Stoga je važno da dizajneri i programeri osiguraju da su njihovi proizvodi pouzdani i ispunjavaju očekivanja korisnika. To se može postići provođenjem rigoroznih testiranja i procesa osiguranja kvalitete kako bi se identificirali i riješili eventualne pogreške ili problemi. Time dizajneri i programeri mogu poboljšati korisničko iskustvo, izgraditi povjerenje i lojalnost među korisnicima [28].

Ravnoteža između niske latencije i pouzdanosti u kritičnim sustavima predstavlja značajan izazov u području računalnih znanosti, posebno u kontekstu sustava u stvarnom vremenu. Potreba za niskom latencijom proizlazi iz aplikacija koje zahtijevaju brze odgovore, kao što su industrijska automatizacija, robotika i zrakoplovstvo. S druge strane, pouzdanost je ključni faktor u kritičnim sustavima koji zahtijevaju operacije od vitalnog značaja za sigurnost, poput medicinskih uređaja i prometnih sustava. U istraživanju koje su proveli Voigtländer i sur. [29] (2017), predložen je novi pristup za rješavanje tog izazova koristeći hibridni sustav koji kombinira determinističke i probabilističke tehnike. Deterministički pristup se koristi kako bi se osigurala pouzdanost sustava, dok se probabilistički pristup koristi za

optimizaciju latencije sustava. Korištenjem ovog hibridnog pristupa, sustav može postići nisku latenciju i visoku pouzdanost. Međutim, postizanje ravnoteže između latencije i pouzdanosti može i dalje biti izazovno pitanje, koje zahtijeva pažljivo razmatranje i analizu kako bi se postigla optimalna ravnoteža. Stoga je važno da istraživači i stručnjaci nastave istraživati nove tehnike i pristupe za rješavanje tog izazova i razviju učinkovitije kritične sustave [29].

## 6. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) tehnologija

MIMO tehnologija predstavlja prekretnicu u bežičnoj komunikaciji koja je revolucionirala način prijenosa i primanja podataka. Ova tehnologija koristi višestruke antene za prijenos i primanje podataka, što poboljšava kapacitet i pouzdanost bežične komunikacije.

MIMO tehnologija transformirala je bežični komunikacijski sustav pružajući značajne prednosti u odnosu na tradicionalne sustave s jednom antenom. MIMO tehnologija koristi više antena na obje strane - pri slanju i primanju signala - kako bi povećala brzinu prijenosa podataka, pokrivenost područja i pouzdanost bežične komunikacije. MIMO tehnologija pruža nekoliko prednosti kao što su poboljšana spektralna učinkovitost, povećani kapacitet, smanjena interferencija i povećani dobitak diverzitija (engl. diversity gain). Upotrebom MIMO tehnologije poboljšava se kvaliteta signala i povećava brzina prijenosa podataka, što unapređuje ukupnu izvedbu sustava. MIMO tehnologija se koristi u raznim primjenama, uključujući 4G i 5G mobilne mreže, WLAN-ove, WiMAX, emitiranje i satelitske komunikacijske sustave. Na primjer, MIMO tehnologija se koristi u LTE mrežama (*Long Term Evolution*) radi postizanja velikih brzina prijenosa podataka, smanjenja stope pogrešaka i poboljšanja jačine signala. U WLAN-ovima, MIMO tehnologija omogućuje veću propusnost, bolju pokrivenost i poboljšanu pouzdanost. U sustavima emitiranja i satelitske komunikacije, MIMO tehnologija se koristi za poboljšanje kvalitete signala i povećanje kapaciteta sustava. Stoga je MIMO tehnologija obećavajuće rješenje za bežične komunikacijske sustave sljedeće generacije, a očekuje se da će se njezine primjene proširiti u budućnosti [29].

MIMO tehnologija dobila je značajnu pažnju u području bežične komunikacije zbog svoje sposobnosti poboljšanja performansi bežičnih komunikacijskih sustava. Budući razvoj MIMO tehnologije očekuje se da će se usredotočiti na poboljšanje učinkovitosti i pouzdanosti tehnologije. Jedan potencijalni razvoj je upotreba masivnog MIMO-a, što uključuje upotrebu velikog broja antena na baznoj stanici. Masivni MIMO ima potencijal povećanja kapaciteta i spektralne učinkovitosti bežičnih mreža, što ih čini

pogodnijima za scenarije s velikom gustoćom prometa. Međutim, implementacija masivnog MIMO-a može predstavljati izazove poput povećane složenosti i potrošnje energije, koje je potrebno riješiti. Drugi potencijalni razvoj je upotreba MIMO tehnologije u sustavima komunikacije na mmWave. MIMO se može koristiti kako bi se prevladali izazovi mmWave komunikacije poput velikog gubitka signala i osjetljivosti na prepreke, iskorištavanjem prostorne raznolikosti. Međutim, MIMO na mmWave također se suočava s izazovima poput smanjene pokrivenosti i povećane složenosti. Unatoč tim izazovima, budućnost MIMO tehnologije izgleda obećavajuće, jer je ključna za implementaciju bežičnih mreža 5G i nadalje [30].

## **6.1. Pregled MIMO tehnologije i njezine prednosti u 5G sustavima**

Temeljni princip MIMO tehnologije temelji se na prostornoj raznolikosti i multipleksiranju, gdje se više podatkovnih tokova istovremeno prenosi preko iste frekvencijske vrpce iskorištavanjem prostorne dimenzije bežičnog kanala. MIMO tehnologija je široko usvojena u raznim bežičnim komunikacijskim sustavima, uključujući Wi-Fi, 4G LTE i 5G mobilne mreže, zbog svoje izuzetne izvedbe u pogledu brzine prijenosa podataka i kapaciteta kanala. Ključna prednost MIMO tehnologije je njena sposobnost ublažavanja negativnih učinaka bežičnih kanala, poput gušenja (engl. fading), interferencije i šuma, iskorištavanjem prostornog diverzitija bežičnog kanala. MIMO tehnologija također može poboljšati pokrivenost i kvalitetu bežičnih mreža upotrebom tehnika usmjeravanja snopa kako bi se signal usmjerio prema namjenskom primatelju. S povećanjem potražnje za bežičnom komunikacijom velikih brzina i pojavom novih bežičnih aplikacija, MIMO tehnologija postala je ključni sastavni dio modernih bežičnih komunikacijskih sustava [31].



## 6.2. Algoritmi obrade signala za MIMO sustave

Algoritmi obrade signala su bitan dio modernih komunikacijskih sustava. MIMO sustavi su vrsta bežičnih komunikacijskih sustava koji koriste više antena na odašiljaču i prijammniku kako bi poboljšali performanse sustava. U posljednjim godinama, MIMO sustavi su privukli značajnu pozornost zbog svoje sposobnosti poboljšanja kapaciteta i pouzdanosti sustava.

Algoritmi obrade signala za MIMO sustave mogu se klasificirati u dvije kategorije: linearni algoritmi i nelinearni algoritmi. Linearni algoritmi, poput ZF (engl. zero forcing) i MMSE (engl. Minimum Mean Square Error, minimalna srednja kvadratna pogreška), široko se koriste zbog svoje jednostavnosti i niske složenosti. ZF je linearni algoritam koji ima za cilj eliminirati interferenciju između signala poništavanjem signala na prijemniku. MMSE, s druge strane, je linearni algoritam koji minimizira srednju kvadratnu pogrešku između primljenog i poslanog signala. Nelinearni algoritmi, poput SD (Sphere Decoding) i GA (Genetic Algorithm), imaju veću složenost, ali mogu postići bolje performanse od linearnih algoritama. SD je nelinearni algoritam koji traži optimalno rješenje unutar sfere oko primljenog signala. GA je heuristički algoritam pretraživanja koji koristi principe prirodne selekcije i genetike za optimizaciju performansi sustava. Odabir algoritma obrade signala ovisi o specifičnim zahtjevima MIMO sustava, poput broja antena, omjera signala i šuma (SNR) te karakteristika kanala. Ukratko, odabir odgovarajućeg algoritma obrade signala ključan je za optimalne performanse MIMO sustava.

Autori u [30] su ispitivali evoluirali su performanse različitih algoritama obrade signala, uključujući ZF, MMSE i SVD (singular value decomposition), za MIMO sustave. Autori su koristili stopu pogreške bita (engl. bit error rate, BER) i kapacitet kanala kao mjere performansi kako bi usporedili učinkovitost ovih algoritama. Rezultati su pokazali da je algoritam SVD nadmašio ostale algoritme u pogledu BER-a i kapaciteta kanala. Međutim, algoritam SVD zahtijeva veću računalnu složenost od drugih algoritama. Stoga, odabir algoritma obrade signala za MIMO sustave ovisi o ravnoteži između računalne složenosti i zahtjeva performansi. Zaključno, evaluacija

algoritama obrade signala za MIMO sustave ključna je za dizajn učinkovitih i pouzdanih bežičnih komunikacijskih sustava [32].

### 6.3. Implementacija MIMO antena za 5G mreže

MIMO značajno može povećati stopu prijenosa podataka u 5G mrežama omogućavajući istovremeni prijenos i primanje više signala. MIMO tehnologija također može poboljšati QoS (*Quality of Service, kvaliteta usluge*) u 5G mrežama smanjujući učinke interferencije i gušenja. Osim toga, MIMO može pružiti bolju snagu signala i pokrivenost, posebno u zatvorenim prostorima i urbanoj okolini.

Jedan od glavnih izazova je povećana računalna složenost i potrošnja energije potrebna za obradu velike količine podataka generiranih iz više antena. Upotreba naprednih tehnika obrade signala poput usmjeravanja snopa i predkodiranja može pomoći u rješavanju tih izazova smanjenjem računalne složenosti i poboljšanjem energetske učinkovitosti MIMO sustava. Još jedan izazov je ograničena dostupnost radijskog spektra, što može utjecati na performanse MIMO sustava. Kako bi se riješio taj izazov, istraživači istražuju upotrebu viših frekvencijskih pojaseva i naprednih tehnika dijeljenja spektra poput DSS (engl. *dynamic spectrum sharing*, dinamičko dijeljenje spektra) radi poboljšanja spektralne učinkovitosti MIMO sustava. Unatoč tim izazovima, očekuje se da će MIMO tehnologija imati ključnu ulogu u budućnosti 5G mreža. Razvojem novih MIMO tehnika poput masivnog MIMO-a i hibridnog usmjeravanja snopa, očekuje se da će MIMO sustavi pružati veće stope prijenosa podataka, poboljšanu spektralnu učinkovitost i bolju pokrivenost u 5G mrežama [33].

## 7. Tehnike usmjeravanja snopa

Tehnike usmjeravanja snopa su široko korištene tehnologije u modernim komunikacijskim sustavima koje pomažu poboljšati kvalitetu signala i ukupnu učinkovitost sustava. U svojoj osnovi, usmjeravanje snopa je tehnika obrade signala koja omogućuje selektivno slanje ili primanje signala u određenom smjeru, umjesto jednake distribucije signala u svim smjerovima.

Tehnologija usmjeravanja snopa je tehnika obrade signala koja usmjerava radio signale u određenom smjeru kako bi poboljšala kvalitetu signala i smanjila interferenciju. To je ključna tehnologija u bežičnim komunikacijskim sustavima, uključujući 5G mreže, Wi-Fi i satelitske komunikacije. Tehnologija usmjeravanja snopa može se implementirati pomoću dvije glavne metode, analogno usmjeravanje snopa i digitalno usmjeravanje snopa. Analogno usmjeravanje snopa koristi jednu antenu za podešavanje faze i amplitude signala kako bi se stvorio usmjereni snop. S druge strane, digitalno usmjeravanje snopa koristi više antena za stvaranje usmjerenog snopa podešavanjem faze i amplitude signala zasebno za svaki element antene. Digitalno usmjeravanje snopa omogućuje bolju kontrolu smjera snopa i također se može koristiti za stvaranje više snopova istovremeno. Međutim, zahtijeva složeniji hardver i algoritme obrade signala u usporedbi s analognim usmjeravanjem snopa. Osim toga, tehnologija usmjeravanja snopa može se koristiti u kombinaciji s drugim tehnikama obrade signala, poput MIMO i OFDM (*engl. Orthogonal Frequency Division Multiplexing, frekvencijski multipleks ortogonalnih podnosioca*), kako bi se dalje poboljšale performanse bežičnih komunikacijskih sustava. Sveukupno, tehnologija usmjeravanja snopa je svestrana i moćna tehnika obrade signala koja ima potencijal da revolucionizira bežične komunikacijske sustave u budućnosti [34].

## 7.1. Digitalno i analogno usmjeravanje snopa

Usmjeravanje snopa je tehnologija koja se već desetljećima široko koristi u telekomunikacijskoj industriji. Uključuje manipulaciju antenskih nizova kako bi se usmjerili emitirani ili primljeni signali u određeni smjer. Usmjeravanje snopa može se postići upotrebom digitalnih ili analognih tehnika. Digitalno usmjeravanje snopa uključuje upotrebu digitalne obrade signala za manipulaciju signalima primljenim od antenskog niza, dok analogni usmjeravanje snopa koristi pomake faze za manipulaciju signalima. Obje tehnike imaju svoje prednosti i nedostatke, a njihova primjena ovisi o specifičnoj situaciji. Jedna od prednosti digitalnog usmjeravanja snopa je njegova fleksibilnost i prilagodljivost. Može se lako rekonfigurirati kako bi se prilagodio promjenjivim komunikacijskim scenarijima. S druge strane, analogno usmjeravanje snopa je energetski učinkovitije i zahtijeva manje obradne snage [35].

Što se tiče primjene, usmjeravanje snopa se koristi u širokom rasponu sustava kao što su radar, sonar, bežična komunikacija i radioastronomija. Digitalno usmjeravanje snopa se široko koristi u bežičnim komunikacijskim sustavima poput 5G i Wi-Fi. Pruža veće brzine prijenosa podataka i poboljšanu pokrivenost u usporedbi s analognim usmjeravanjem snopa. S druge strane, analogno usmjeravanje snopa se široko koristi u radarskim i sonarnim sustavima, gdje ga energetski zahtjevi čine prikladnim za aplikacije na velikim udaljenostima [36].

## 7.2. MIMO beamforming za povećanje kapaciteta

MIMO usmjeravanje snopa je tehnika bežične komunikacije koja koristi više antena za prijenos i primanje podatkovnih signala. MIMO tehnologija je ključan razvoj u bežičnim komunikacijskim sustavima. Jedna od najznačajnijih prednosti MIMO tehnologije je usmjeravanje snopa, koje se koristi za poboljšanje snage i kvalitete signala usmjeravanjem signala u određenom smjeru. MIMO usmjeravanje snopa je revolucioniralo bežične komunikacijske sustave, pružajući veće brzine prijenosa podataka i sigurniju povezanost. Kao što je već poznato postoje dvije vrste tehnika usmjeravanja signala analogni i digitalni način usmjeravanja. Sveukupno, tehnologija MIMO usmjeravanja snopa postala je iznimno važna za bežične komunikacijske sustave, pružajući poboljšanu kvalitetu, pouzdanost i pokrivenost signala [37].

MIMO usmjeravanje snopa poboljšava kvalitetu signala smanjujući smetnje i šum u prijenosu. To se postiže usmjeravanjem signala u određenom smjeru, što smanjuje utjecaj refleksija i drugih izvora smetnji. Drugo, MIMO usmjeravanje snopa povećava kapacitet bežične mreže omogućujući prijenos više podatkovnih tokova istovremeno. To je posebno korisno u gusto naseljenim područjima gdje se istovremeno povezuje više korisnika na mrežu. MIMO usmjeravanje snopa poboljšava doseg bežične mreže omogućujući prijenos jačeg signala koji može proći kroz prepreke poput zgrada i zidova. To se postiže usmjeravanjem signala u određenom smjeru, što smanjuje utjecaj gušenja signala.

5G mreže koriste MIMO za usmjeravanje snopa kako bi poboljšale kapacitet i pokrivenost mreže formiranjem prijenosa na određene uređaje. U automobilskoj industriji, tehnologija MIMO usmjeravanja snopa ima potencijal za poboljšanje sigurnosti vozila omogućujući komunikaciju između vozila i infrastrukture uz cestu. To može smanjiti broj nesreća uzrokovanih lošom vidljivošću i poboljšati protok prometa. Naposljetku, u zdravstvenoj industriji, MIMO usmjeravanje snopa može se koristiti za poboljšanje točnosti medicinskog slikovnog prikaza i smanjenje količine potrebne radijacije za dijagnostiku. To može poboljšati sigurnost pacijenata i smanjiti troškove zdravstvene skrbi [37].

## 8. CST Studio

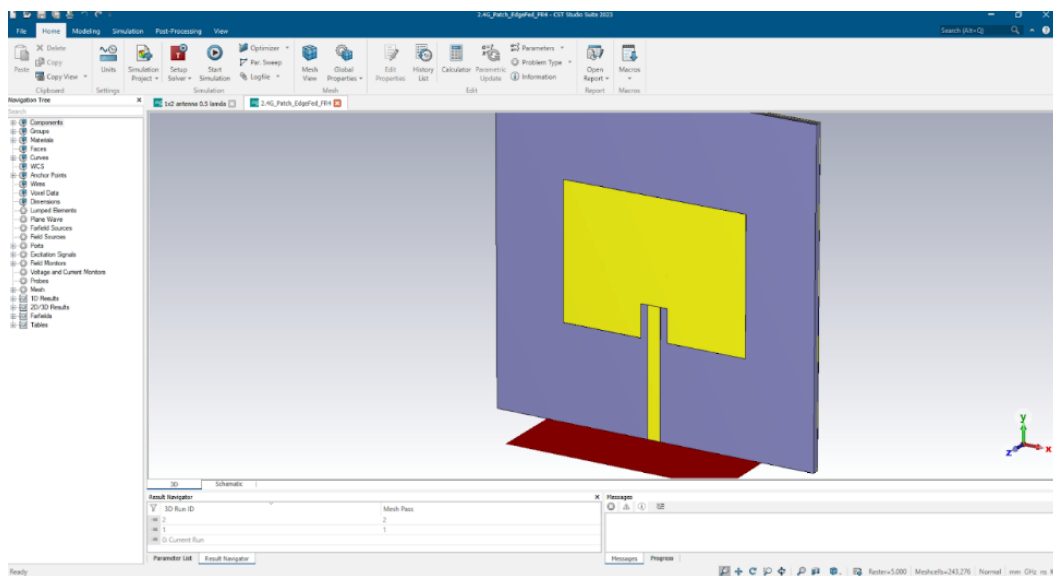
CST Studio je moćan softver za elektromagnetsku simulaciju koji se široko koristi u različitim područjima. Jedna od glavnih primjena CST Studija je u dizajnu i analizi antena. Antene imaju ključnu ulogu u modernim komunikacijskim sustavima, a njihove performanse ovise o njihovim elektromagnetskim karakteristikama. CST Studio pruža sveobuhvatan skup alata koji omogućuju inženjerima simuliranje i optimizaciju performansi antena. Još jedna važna primjena CST Studija je analiza mikrovalnih krugova. Mikrovalni krugovi koriste se u mnogim aplikacijama, uključujući radarske sustave, bežičnu komunikaciju i satelitsku komunikaciju. CST Studio omogućuje inženjerima simuliranje i analizu ponašanja mikrovalnih krugova, uključujući učinke elektromagnetskih smetnji i propagaciju signala. Nadalje, CST Studio se može koristiti i u analizi elektromagnetske kompatibilnosti (engl. electromagnetic compatibility, EMC) i elektromagnetskih smetnji (engl. electromagnetic interference, EMI). EMC i EMI su ključni problemi u modernim elektroničkim sustavima, a CST Studio omogućuje inženjerima identifikaciju i ublažavanje potencijalnih izvora elektromagnetskih smetnji. Ukratko, CST Studio je svestran i moćan alat koji se široko koristi u elektromagnetskoj simulaciji, uključujući dizajn antena, analizu mikrovalnih krugova i analizu EMC/EMI [38].

### 8.1. Antena sa 2,4 GHz

Frekvencija od 2,4 GHz najčešće se koristi u bežičnoj komunikaciji, kao i u mnogim elektromagnetskim uređajima poput Bluetooth, Wi-Fi rutera, antena, itd. Antene na 2,4 GHz su često korištene u Wi-Fi mrežama za bežični internet. Wi-Fi rutere koriste ovu frekvenciju kako bi omogućili uređajima da se povežu i komuniciraju putem bežične mreže. Bluetooth uređaji, kao što su slušalice, tastature, miševi i pametni uređaji, također koriste frekvenciju od 2,4 GHz za komunikaciju. Bluetooth tehnologija omogućava bežično povezivanje i razmjenu podataka između uređaja. S rastom bežičnih tehnologija i Internet of Things (IoT) uređaja, frekvencija od 2,4 GHz i dalje ima značajnu ulogu u omogućavanju bežične komunikacije između uređaja. Antene za frekvenciju 2,4 GHz variraju u obliku i dizajnu u zavisnosti od specifične

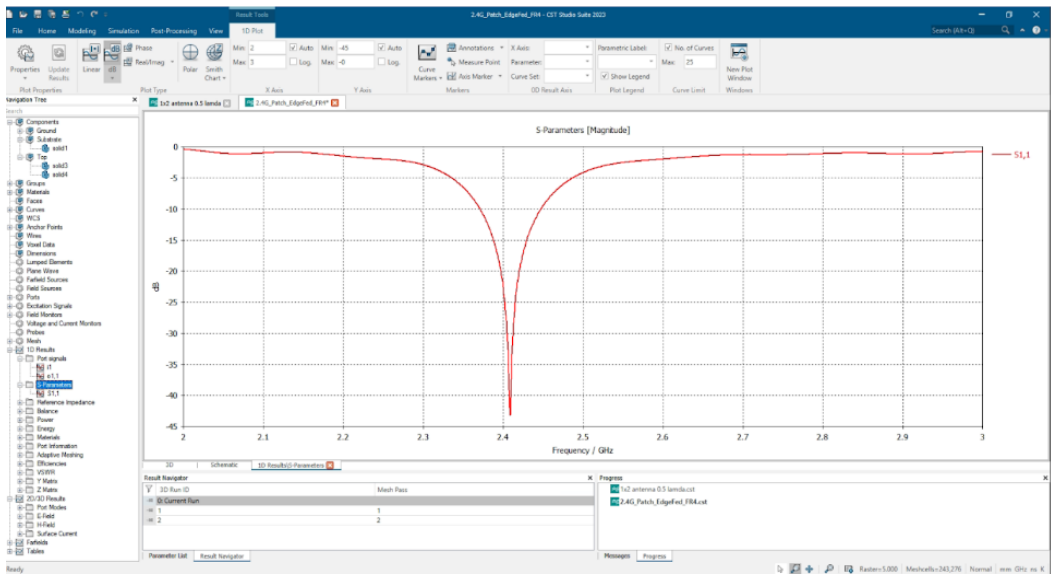
primjene. Mogu biti integrirane u uređaje, poput pametnih telefona, ili vanjske, kao što su antene na Wi-Fi ruterima [39].

U programu CST kreirana je antena od 2,4 GHz. Kreirana i dizajnirana u svrhu diplomskog rada, na slici 10 vidljiv je izgled antene. Donja frekvencija za 2,4 GHz antenu je  $f_{\text{subscript}}=2,368$  GHz, dok je gornja granica  $f_{\text{subscript}}=2,442$  GHz. Širina pojasa antene iznosi  $0,074$  GHz = 74 MHz što predstavlja raspon frekvencije između donje i gornje granice. Rezonantna frekvencija iznosi  $2,404$  GHz za  $S_{\text{subscript}}=-39,614$  dB. Označava frekvenciju na kojoj je antena rezonantna ili najefikasnija u prijenosu i primanju signala. S-parametar odnosi se na koeficijent refleksije. Niža vrijednost  $S_{\text{subscript}}$  ukazuje na bolje podudaranje antene s prijenosnom linijom ili bolju efikasnost prijenosa signala. Rezultati vidljivi su na slikama ispod (Slika 8.1.1, Slika 8.1.2, Slika 8.1.3, Slika 8.1.4, Slika 8.1.5).

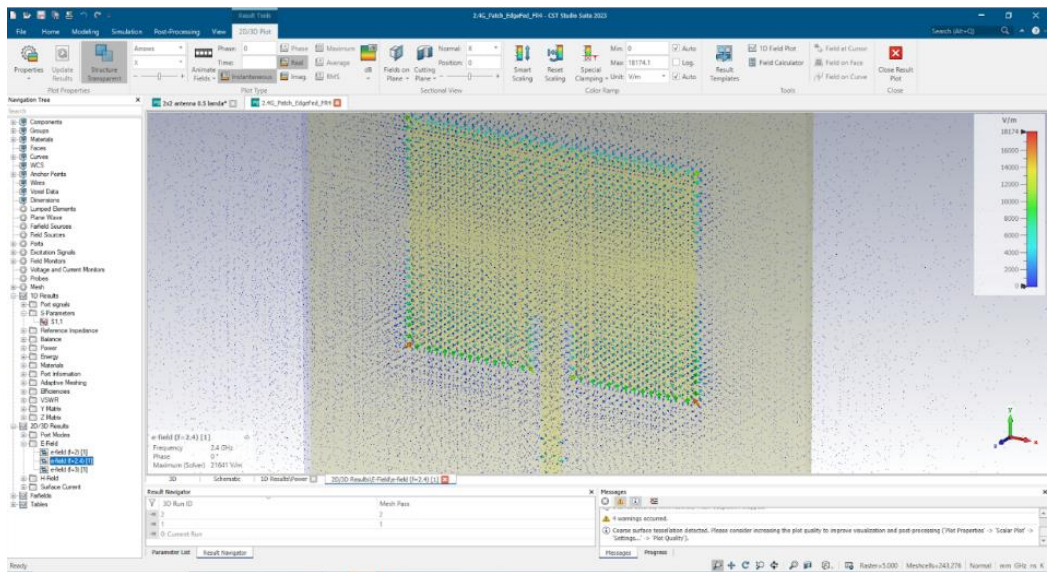


Slika 8.1: Antena 2,4 GHz

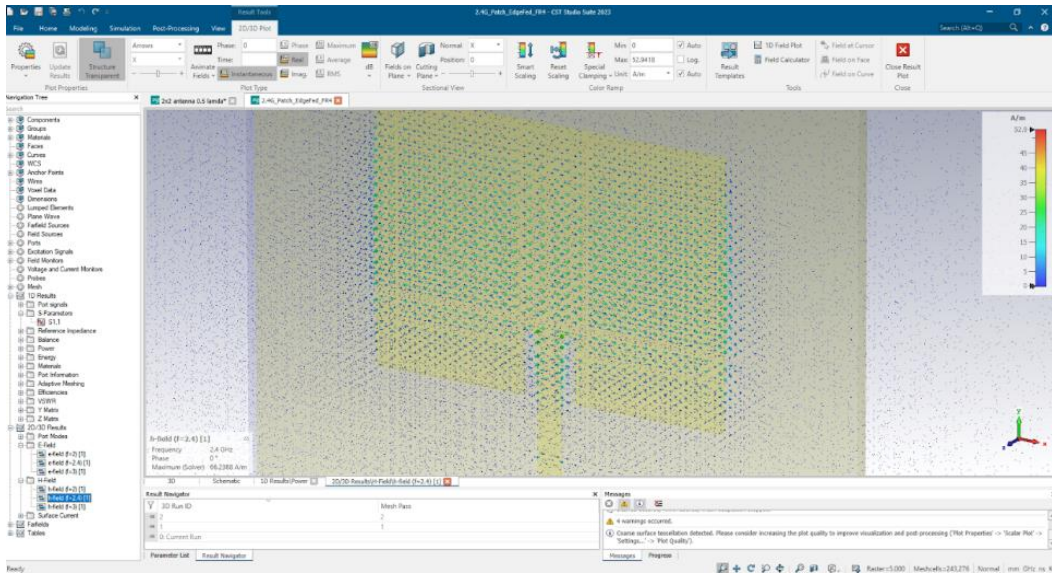




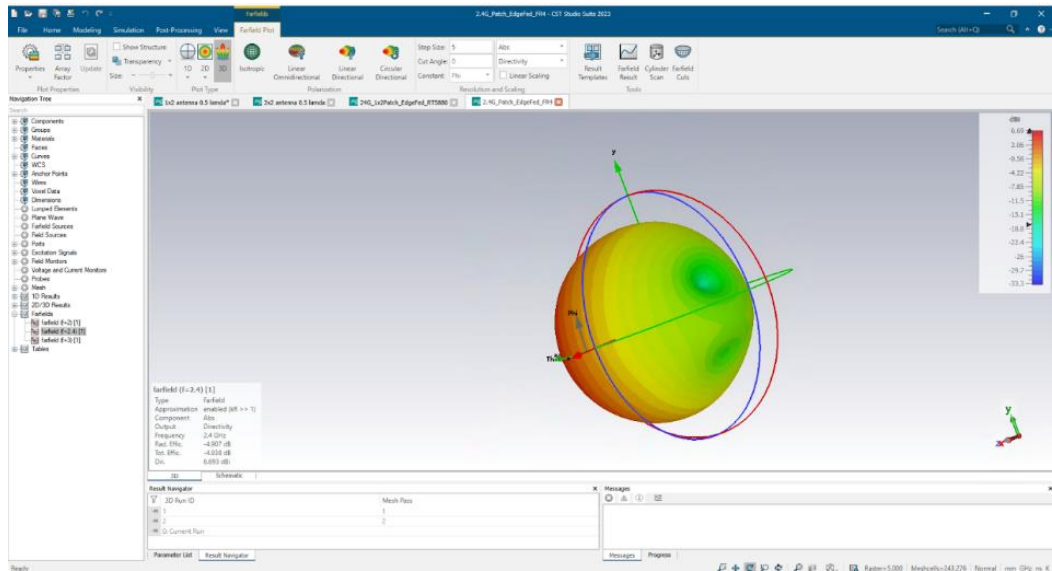
Slika 8.2: S parametar 2,4 GHz



Slika 8.3: E polje 2,4 GHz



Slika 8.4: H polje 2,4 GHz

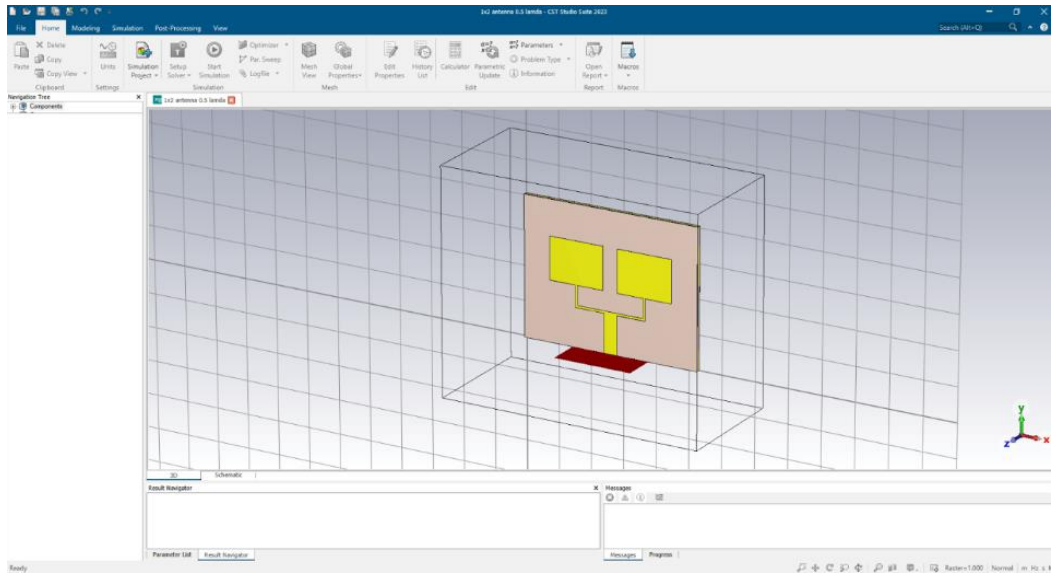


Slika 8.5: 3D dijagram zračenja u dalekom polju, 2,4 GHz (usmjerenost 6,69 dBi, dobitak 1,79 dBi)

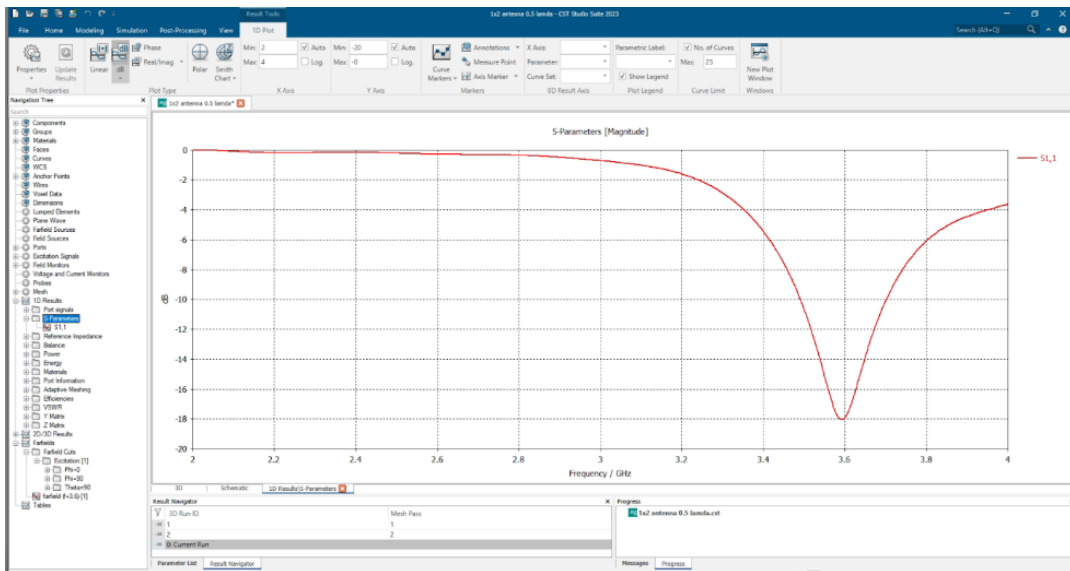
## 8.2. Antena sa 3,6 GHz

Često se koriste u različitim komunikacijskim i tehnološkim aplikacijama koje zahtijevaju bežičnu vezu ili prijenos podataka na toj frekvenciji. Frekvencija od 3,6 GHz spada u mikrovalni opseg radio-frekvencija i često se koristi za bežične komunikacije kao što su mobilne mreže, fiksna bežična širokopojasna povezivanja i satelitske komunikacije. U mnogim zemljama, ova frekvencija je rezervirana za određene telekomunikacijske usluge. Uvođenje 5G mreža donosi i širenje u spektralnim opsezima. Frekvencije kao što je 3,6 GHz postale su atraktivne za 5G infrastrukturu jer omogućavaju veći kapacitet prijenosa podataka i bolju pokrivenost u odnosu na niže frekvencije. Antene za 3,6 GHz koriste se za uspostavljanje brzih fiksnih bežičnih veza između različitih točaka, što može biti korisno tamo gdje postavljanje žičane infrastrukture nije ekonomično ili praktično. Učestalost od 3,6 GHz može imati nešto manji domet u odnosu na niže frekvencije, ali nudi bolju sposobnost prijenosa kroz prepreke. Međutim, kao i sa svakim frekvencijskim opsegom, postoji mogućnost interferencije i smetnji, naročito u urbanim okruženjima gdje se koriste različiti uređaji.

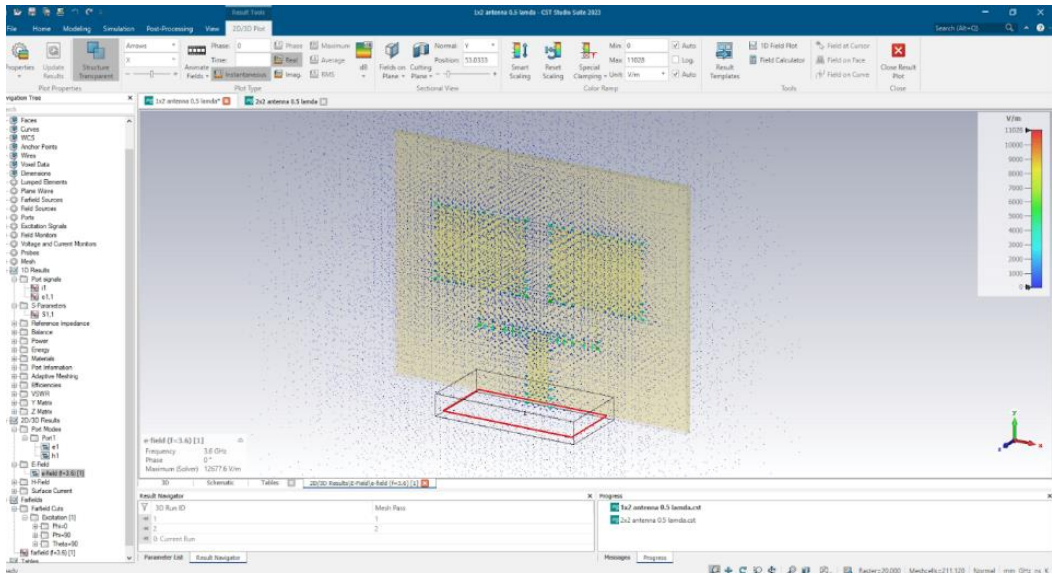
Antenu od 3,6 GHz simulirat će se na dva načina: 1x2 te 2x2. Antena konfiguracije 1x2 rad i na srednjoj frekvenciji od 3,6 GHz, 1x2 bi značilo da se radi o jednom priključku za ulaz i dva priključka za izlaz. Za navedenu antenu donja granica je  $f_{\text{subscript}} = 3,497$  GHz, a gornja granica  $f_{\text{subscript}} = 3,704$  GHz. Širina pojasa iznosi 0,207 GHz ili 207 MHz, te rezonantna frekvencija iznosi 3,596 GHz za  $S_{\text{subscript}} = -17,626$  dB prikazano na slikama ispod (Slika 8.2.1, Slika 8.2.2, Slika 8.2.3, Slika 8.2.4, Slika 8.2.5).



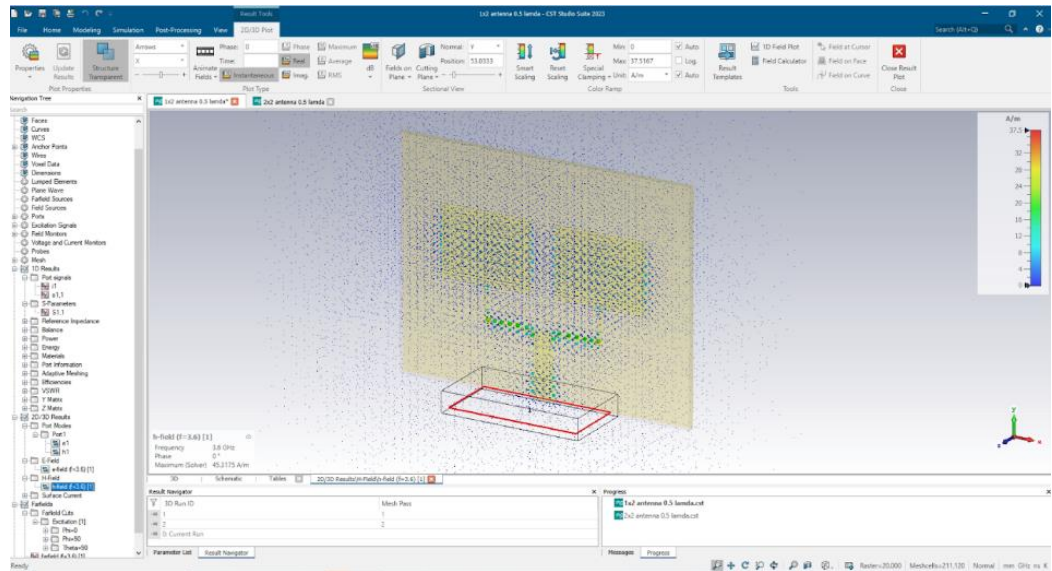
Slika 8.6: Antena 1x2 3,6 GHz



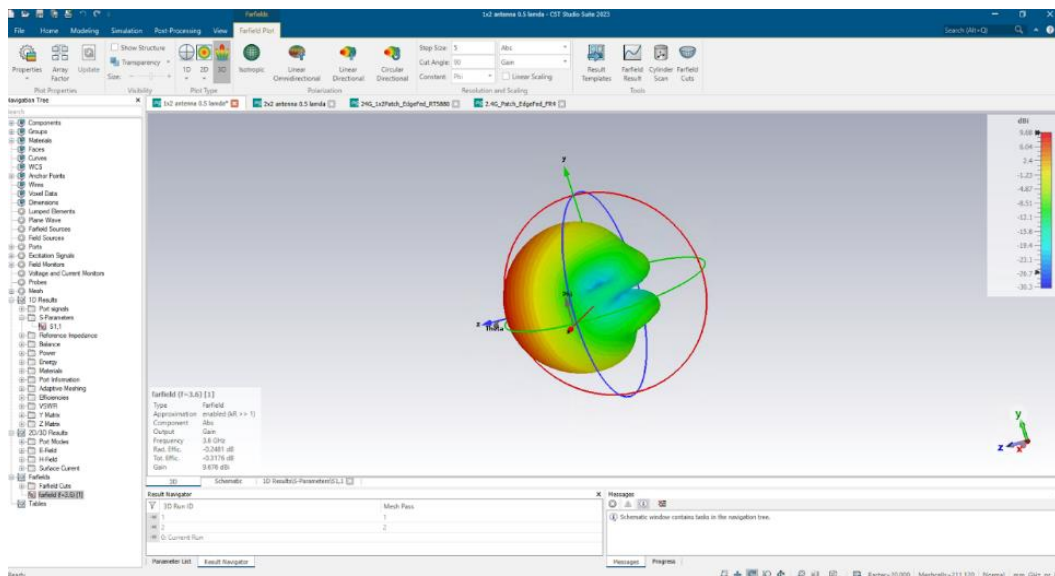
Slika 8.7: S parametar 1x2 3,6 GHz



Slika 8.8: E polje 1x2 3,6 GHz

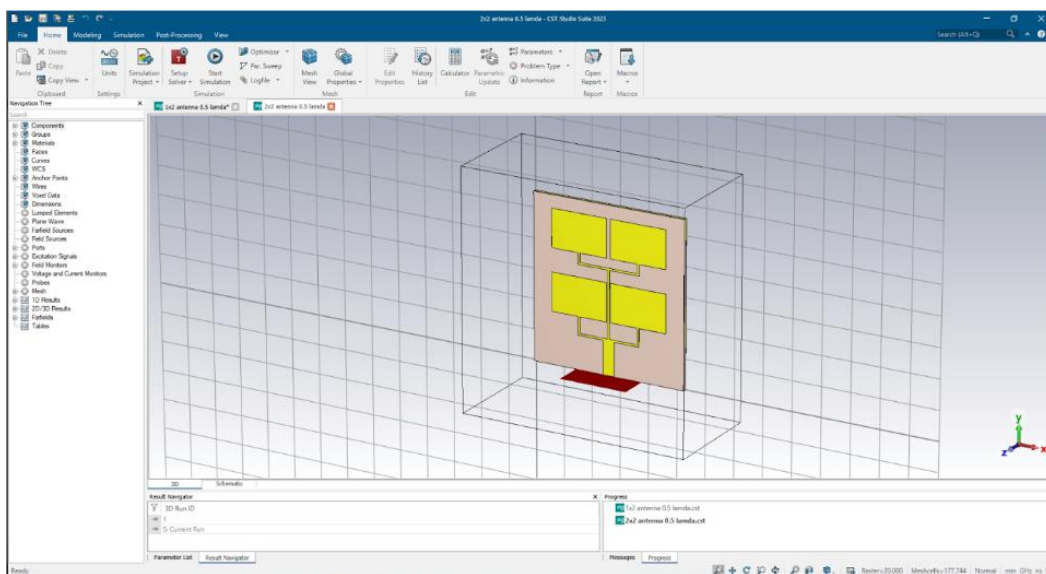


Slika 8.9: H polje 1x2 3,6 GHz

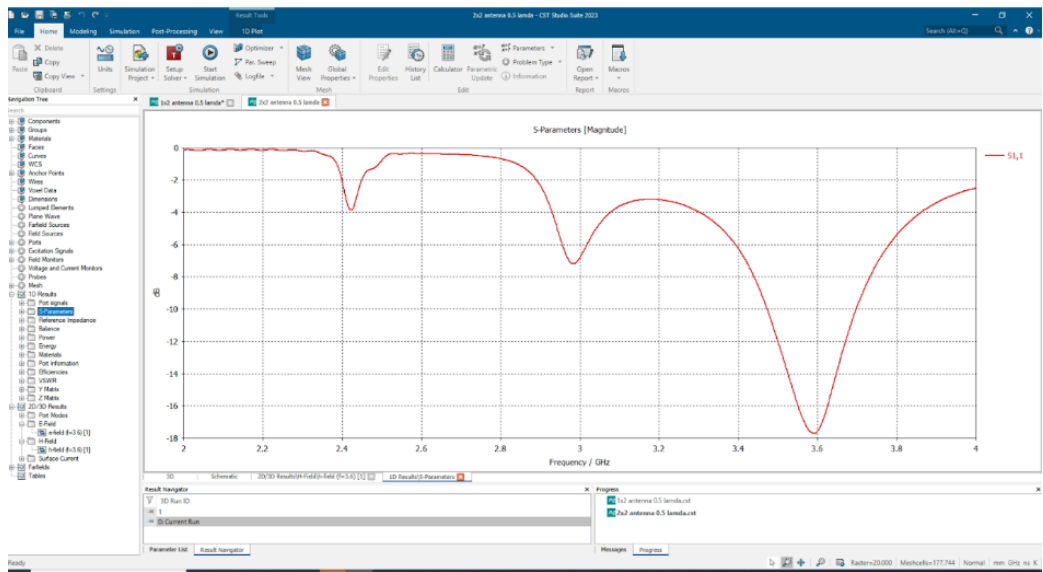


Slika 8.10: 3D dijagram zračenja u dalekom polju, 1x2 3,6 GHz (usmjerenost 9,92 dBi, dobitak 9,68 dBi)

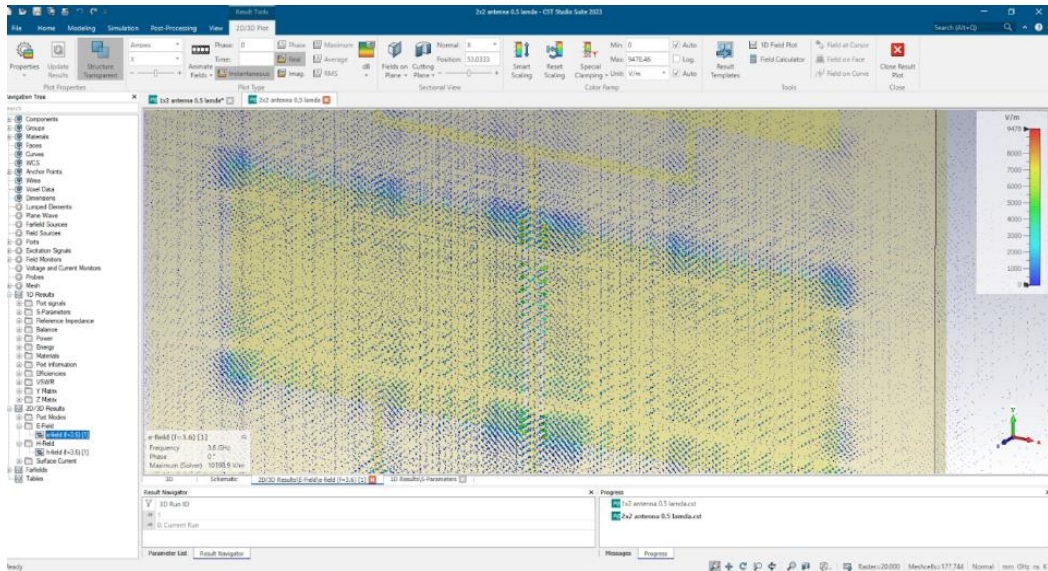
Antena 2x2 3,6 GHz označava da antena ima dva ulaza (TX) i dva izlaza (RX) staze, što je tipično za MIMO sustave. Namijenjena je za rad na srednjoj frekvenciji od 3,6 GHz. Ima donju granicu  $f_{\text{subscript}} = 3,473$  GHz, dok je  $f_{\text{subscript}} = 3,7$  GHz, širina pojasa iznosi 0,227 GHz ili 227 MHz te rezonantna frekvencija je 3,595 GHz za  $S_{\text{subscript}} = -17,626$  dB, prikazano na slikama ispod (Slika 8.2.6, Slika 8.2.7, Slika 8.2.8, Slika 8.2.4, Slika 8.2.9, Slika 8.2.10).



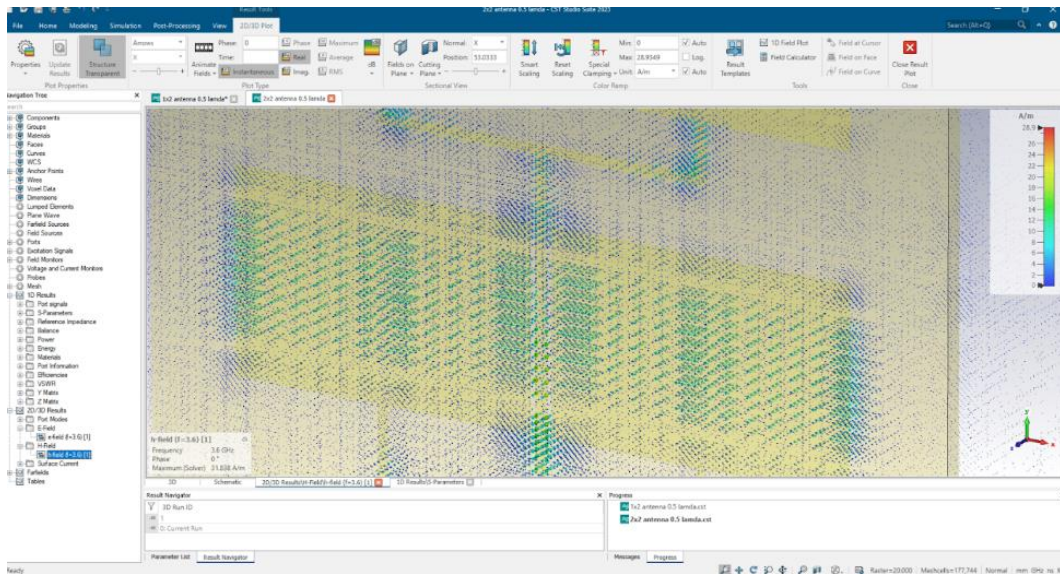
Slika 8.11: Antena 2x2 3,6 GHz



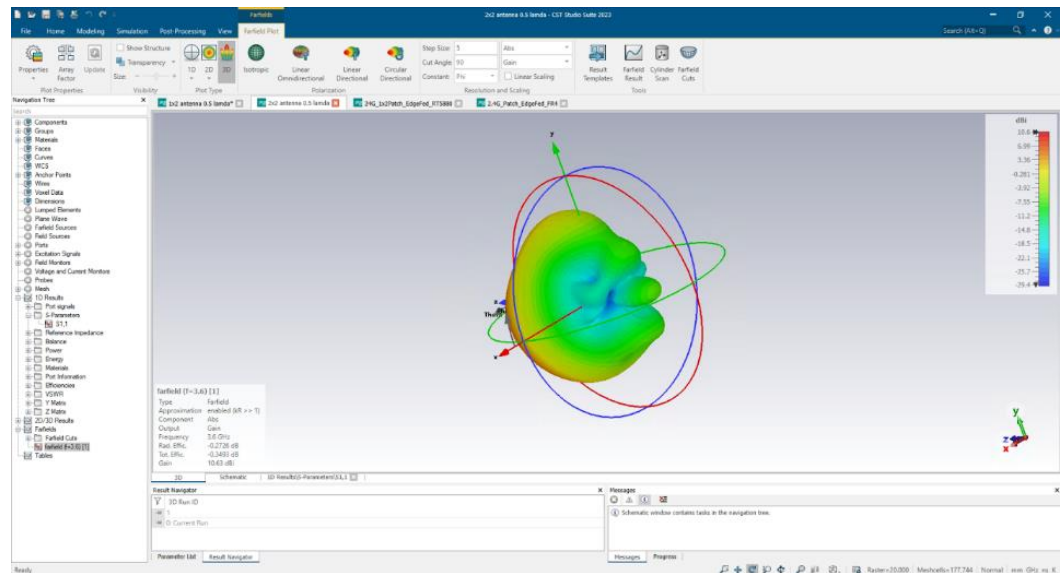
Slika 8.12: S parametar 2x2 3,6 GHz



Slika 8.13: E polje 2x2 3,6 GHz



Slika 8.14: H polje 2x2 3,6 GHz



Slika 8.15: 3D dijagram zračenja u dalekom polju, 2x2 3,6 GHz (usmjerenost 10,90 dBi, dobitak 10,63 dBi)

Prilikom usporedbe objih antena primjećuje se da nema prevelike razlike između performansi. Jedina razlika bila bi bila širina pojasa koja je malo veće kod antena konfiguracije 2x2, a ona iznosi 0,227 GHz (227 MHz), dok kod antena konfiguracije 1x2 iznosi 0,207 GHz (207 MHz). Također antena konfiguracije 1x2 ima samo jedan izlazni put te može slati signale samo u jednom smjeru, što može biti ograničavajuće u sustavima koji zahtijevaju više smjerova odašiljanja ili podršku za MIMO. Antena konfiguracije 2x2 ima više izlaznih puteva i ona može primiti i slati

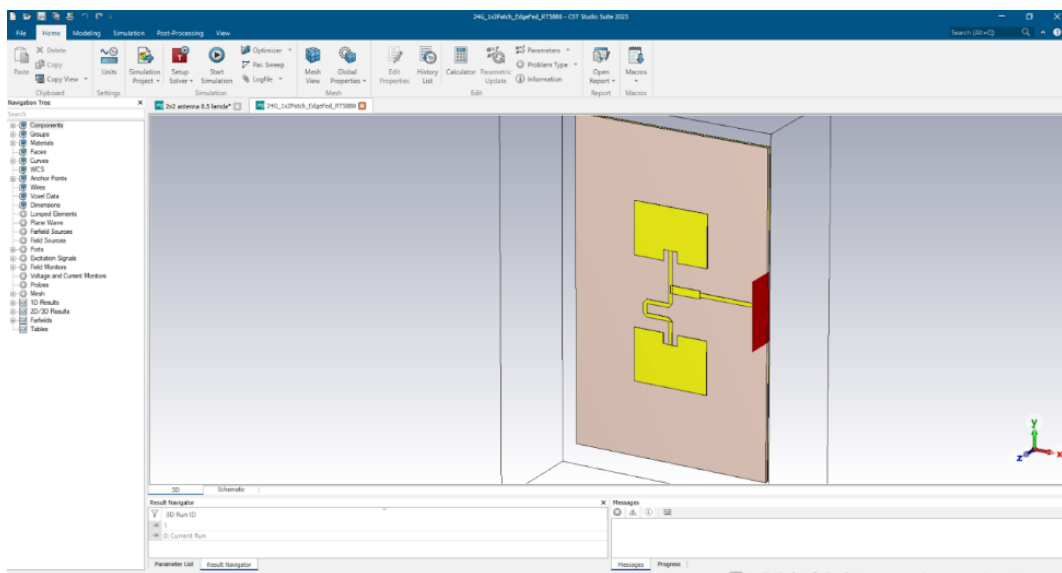


signale u dva različita smjera istovremeno. Takva konfiguracija je odlična za MIMO sustave i bolju pokrivenost.

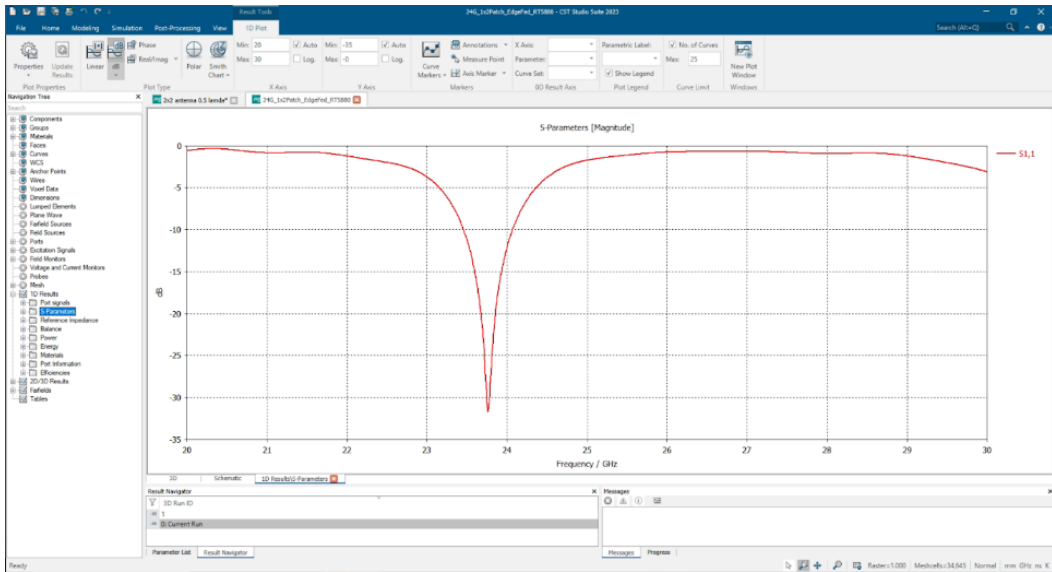
### 8.3. Antena sa 24 GHz

Koriste se u raznim komunikacijskim i tehnološkim primjenama koje zahtijevaju bežičnu vezu ili prijenos podataka na toj specifičnoj frekvenciji. Antene za 24 GHz često se koriste u raznim bežičnim komunikacijskim sustavima. To može uključivati bežične veze između uređaja, senzora i IoT komponenti, ne trebate opisivati jer već jeste ranije kao i fiksne bežične širokopolasne veze. Antene za 24 GHz mogu se koristiti za različite sigurnosne primjene, kao što su alarmi, videonadzor i drugi sustavi detekcije.

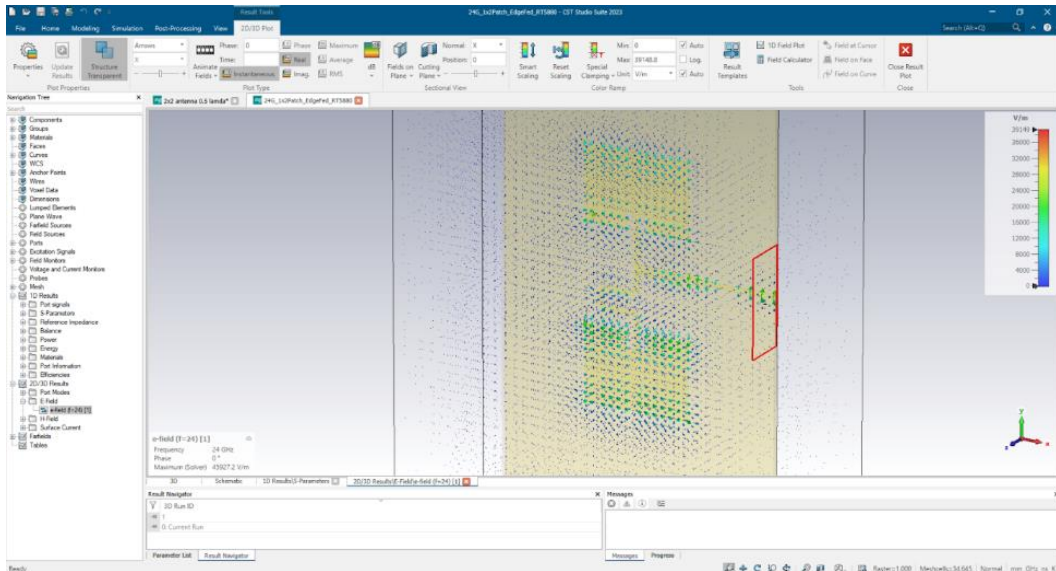
Antena od 24 GHz ima,  $f_{subscript}= 23,459$  GHz, dok je  $f_{subscript}= 24,069$  GHz, rezonantna frekvencija iznosi  $23,765$  GHz za  $S_{subscript}= -31,721$  dB, vidi na slikama (Slika 8.3.1, Slika 8.3.2, Slika 8.3.3, Slika 8.3.4, Slika 8.3.).



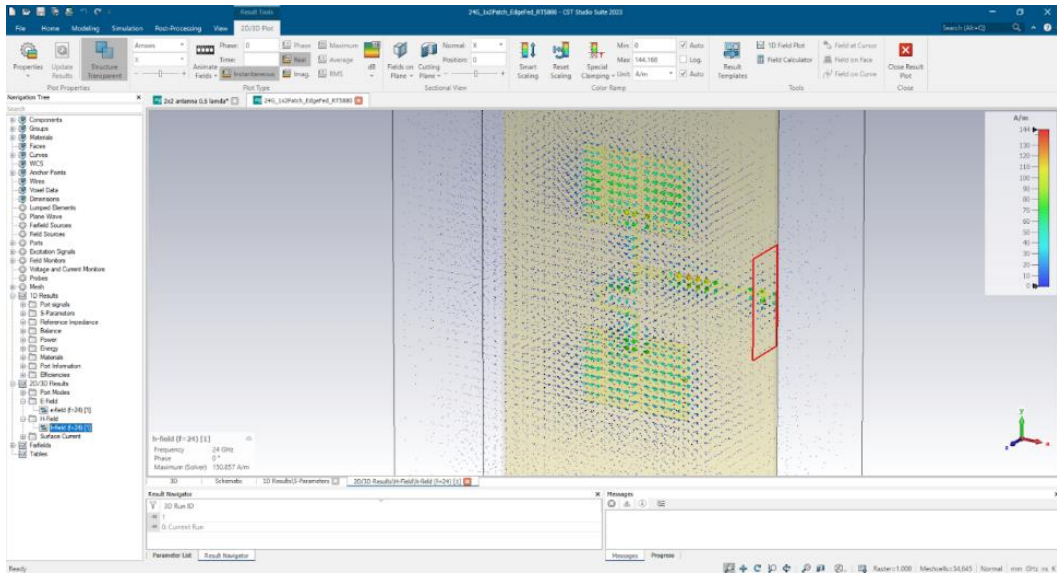
Slika 8.16: Antena 24 GHz



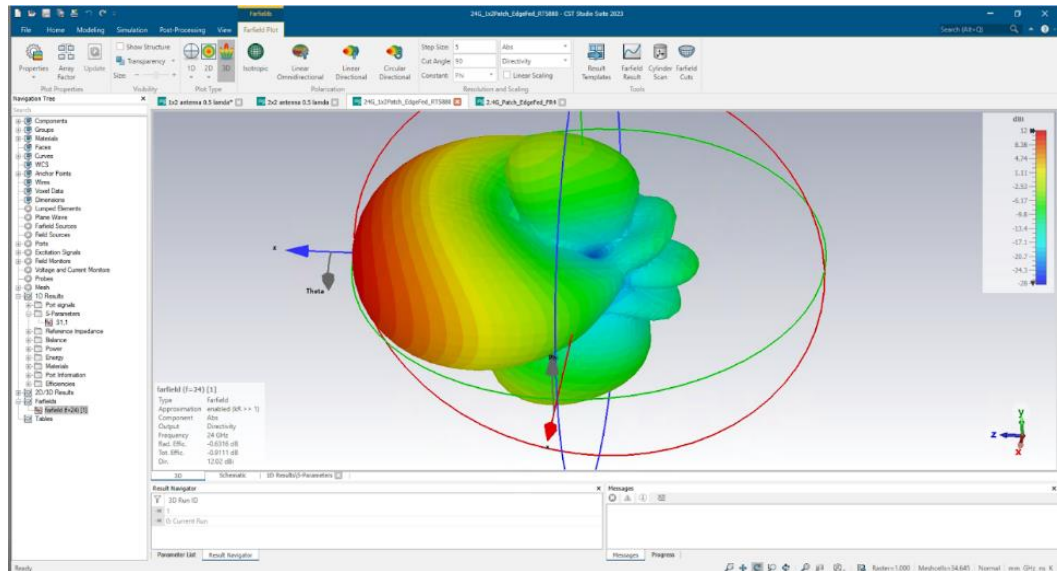
Slika 8.17: S parametar 24 GHz



Slika 8.18: E polje 24 GHz



Slika 8.19: H polje 24 GHz



Slika 8.20: 3D dijagram zračenja u dalekom polju, 24 GHz (usmjerenost 12,02 dBi, dobitak 11,38 dBi)

## 8.4. Usporedba svih antena

### Antena na 2.4 GHz:

**Prednost:** Ova antena ima široku širinu pojasa (74 MHz) i relativno nisku rezonantnu frekvenciju na 2,404 GHz. Može biti korisna za aplikacije koje zahtijevaju niže frekvencije, ali nije specifično prilagođena 5G frekvencijama.

**Nedostatak:** Niska rezonantna frekvencija može biti izvan učestalog 5G spektra, a koeficijent refleksije ( $S_{subscript}$ ) je lošiji u usporedbi s drugim antenama.

### 1x2 Antena na 3.6 GHz:

**Prednost:** Prilagođena rezonantna frekvencija (3,596 GHz) i relativno široka širina pojasa (207 MHz) čine je dobrim izborom ako 5G mreža koristi frekvencije blizu 3,6 GHz.

**Nedostatak:** Ima samo jedan izlazni put (TX), što može biti ograničavajuće za MIMO i tehnike usmjeravanja snopa koje su često korištene u 5G mrežama.

### 2x2 Antena na 3.6 GHz:

**Prednost:** Ova antena ima širu širinu pojasa (227 MHz) i podržava MIMO sustave s dva izlazna puta (TX i RX). To je korisno za 5G komunikaciju koja često koristi MIMO za bolje performanse.

**Nedostatak:** Rezonantna frekvencija je gotovo identična 1x2 anteni, pa možda neće biti optimalna ako precizna rezonantna frekvencija nije ključna.

### Antena na 24 GHz:

**Prednost:** Ova antena podržava rad na visokim frekvencijama koje su tipične za određene 5G implementacije. Ima širu širinu pojasa (610 MHz) što omogućuje podršku za različite 5G frekvencije.

**Nedostatak:** Rezonantna frekvencija na 23,765 GHz može biti blizu donje granice spektra za 5G, a koeficijent refleksije ( $S_{subscript}$ ) nije optimalan.

## 9. Zaključak

Razvoj 5G tehnologije i naprednih tehnika usmjeravanja snopa predstavlja ključni korak naprijed u oblikovanju budućnosti bežičnih komunikacija. Kroz pregled različitih poglavlja u ovom radu, stekli smo dublje razumijevanje uloge antena u 5G komunikacijskim sustavima, kao i prednosti i ograničenja naprednih tehnika usmjeravanja snopa.

Napredne tehnike usmjeravanja snopa u 5G mrežama pružaju značajne prednosti poput veće propusnosti, veće pokrivenosti i smanjenja smetnji. Kroz upotrebu MIMO tehnologije i naprednih tehnika usmjeravanja snopa, 5G antene mogu pružiti poboljšanu povezanost i performanse za korisnike. Međutim, važno je također razumjeti izazove koji dolaze s tim tehnikama, uključujući potrebu za točnim informacijama o stanju kanala i potrebu za prilagodbom resursa.

Kako se 5G mreže dalje razvijaju i šire, napredne tehnike usmjeravanja snopa postaju sve važnije za osiguravanje visokih performansi i optimalne pokrivenosti. Nastavak istraživanja i razvoja u području antenskih sustava i tehnika usmjeravanja snopa ključan je za uspjeh 5G tehnologije i njen utjecaj na širok spektar industrija, uključujući telekomunikacije, industriju automobila, medicinu i mnoge druge.

## 10. Literatura

- [1] L. Chettri i R. Bera: A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, 2020., str. 16-32.
- [2] D. Astely, E. Larsson, M. Frenne, F. Ghasemzadeh, M. Hagström, H. Asplund, G. Jöngren, T. Chapman, J. Karlsson, P. von Butovitsch, B. Hogan, F. Kronstedt, *Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments*, Academic Press 2020.
- [3] P. Rost, A. Banchs, I. Berberana, M. Breitbach, M. Doll, H. Droste, C. Mannweiler, Miguel A. Puente, K. Samdanis, B. Sayadi: Mobile network architecture evolution toward 5G. *IEEE Communications Magazine* 54, 2016., str. 84-91.
- [4] J. R Churi, S. T. Surendran, S. A. Tigdi i S. Yewale: Evolution of Networks (2G-5G), *IJCA Proceedings on International Conference on Advances in Communication and Computing Technologies 2012 ICACACT*, no. 3, 2012., str. 8-13.
- [5] S. Patel, V. Shah, M. Kansara: Comparative Study of 2G, 3G and 4G, *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, vol. 3, no. 3, 2018., str. 1962-1964.
- [6] U. Varshney: 4G Wireless Networks, diplomski rad, Georgia State University, USA, 2012.
- [7] Marabissi, D.; Mucchi, L.; Fantacci, R.; Spada, M.R.; Massimiani, F.; Fratini, A.; Cau, G.; Yunpeng, J.; Fedele, L.: A Real Case of Implementation of the Future 5G City, *Future Internet*, 2019., vol. 11, no 1:4.
- [8] D. M. Gutierrez-Estevez M. Gramaglia, A. de Domenico, N. di Pietro, S. Khatibi, K. Shah, D. Tsolkas, P. Arnold, P. Serrano: The path towards resource elasticity for 5G network architecture, 2018 *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, Barcelona, Španjolska, 2018., str. 214-219.
- [9] E. Liu, E. Effiok i J Hitchcock: Survey on health care applications in 5G networks. *IET Communications*, vol. 14, 2020., str. 1073-1080.
- [10] J. Lee, E. Tejedor, K. Ranta-aho, Hu Wang, Kyung-Tak Lee, E. Semaan, E. Mohyeldin, Juyeon Song, C. Bergljung, S. Jung, *Spectrum for 5G: Global Status*,

- Challenges, and Enabling Technologies, IEEE Internet of Things Journal, 2018., str. 12-18.
- [11] C.A. Balanis, Antenna theory: a review, IEEE Internet of Things Journal ,vol: 80 no: 1, 1992.
- [12] A.Q. Khan, M. Riaz, A. Bilal, Various Types of Antenna with Respect to their Applications: A Review, International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, Vol. 7, no. 3, str. 1-8.
- [13] F.J. Ares-Pena, Senior Member, J.A. Rodriguez-Gonzalez, E. Villanueva-Lopez, S.R. Rengarajan, Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns, IEEE Internet of Things Journal, vol. 47, 1999., str. 508-509.
- [14] Wayne D Kimura, Iopscience, What are electromagnetic waves?, Electromagnetic Waves and Lasers (Second Edition), IOP Publishing, Bristol, UK, 2020., str. 1-32.
- [15] D. R. Smith, D. Schurig, Electromagnetic Wave Propagation in Media with Indefinite Permittivity and Permeability Tensors, Physical review letters, Vol. 90, no. 7, 077405, 2003.
- [16] Umberto M. Cella, Prof. Ron Johnstone, Prof. Nicholas Shuley, Electromagnetic Wave Wireless Communication in Shallow Water Coastal Environment: Theoretical Analysis and Experimental Results, IEEE Internet of Things Journal, vol. 47, 2009., str 506- 510.
- [17] E. Dumić, Multimedia Communications - ppt slides, <http://msl.unin.hr/>, dostupno: 01.08.2023.
- [18] H.A. Wheeler, Fundamental Limitations of Small Antennas, IEEE Internet of Things Journal, vol. 35, 1947, str. 1479-1484.
- [19] Z. N. Chen, Antennas for Portable Devices, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, Engleska, 2007.
- [20] R. Khan, A. Abdullah Al-Hadi, J.Soh, Recent Advancements in User Effect Mitigation for Mobile Terminal Antennas: A Review, IEEE Internet of Things Journal, vol. 61, 2018., str. 279 – 287.

- [21] M. Matalatala, M. Deruyck, E. Tanghe, L. Martens i W. Joseph, 5G Communications: Energy Efficiency, Mobile Information Systems, Vol. 2017, 3406074, 2017.
- [22] S. Singh, N. Saxena, A. Roy, H. Kim, A Survey on 5G Network Technologies from Social Perspective, IETE Technical Review, Vol. 34, no 1, 2017., str. 30-39.
- [23] A. Agarwal, K. Agarwal, S. Agarwal i G. Misra, Evolution of Mobile Communication Technology towards 5G Networks and Challenges, American Journal of Electrical and Electronic Engineering, Vol. 7, no. 2, 2019., str. 34-37.
- [24] Mashael M. Alsulami, Nadine Akkari, The role of 5G wireless networks in the internet-of- things (IoT), IEEE Internet of Things Journal, 2018., str. 2-7.
- [25] L. Mutanu, K. Gupta, J. Gohil, Leveraging IoT solutions for enhanced health information exchange, Technology in Society, Vol. 68, 101882, 2022.
- [26] T. Endeshaw Bogale, Long Bao Le, Massive MIMO and mmWave for 5G Wireless HetNet: Potential Benefits and Challenges, IEEE Internet of Things Journal, vol. 11, 2016., str. 65-75.
- [27] D. Astely, E. Larsson, M. Frenne, F. Ghasemzadeh, M. Hagström, H. Asplund, G. Jöngren, T. Chapman, J. Karlsson, P. von Butovitsch, B. Hogan i F. Kronstedt, Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments, Academic press, 2020.
- [28] T. Endeshaw Bogale, Long Bao Le, Massive MIMO and mmWave for 5G Wireless HetNet: Potential Benefits and Challenges, IEEE Internet of Things Journal, vol. 11, 2016., str. 64-75.
- [29] J. Lee, JK. Han i J. Zhang, MIMO Technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced, J Wireless Com Network 2009, 302092, 2009.
- [30] Ying-Chang Liang, Sumei Sun, Chin Keong Ho, Block-iterative generalized decision feedback equalizers for large MIMO systems: algorithm design and asymptotic performance analysis, IEEE Internet of Things Journal, vol. 54, 2006., str. 2035 – 2048.
- [31] R.Chataut, R. Akl: Massive MIMO Systems for 5G and beyond Networks— Overview, Recent Trends, Challenges, and Future Research Direction, Sensors, vol. 20, no. 10:2753., 2020.
- [32] J. Tronc, P. Angeletti, N. Song, M. Haardt, J. Arendt i G. Gallinaro, Overview and comparison of on-ground and on-board beamforming techniques in mobile



- satellite service application, *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 32, no. 4, 2013., str. 291-308.
- [33] C. Guiraud, D. Rousset, I. Albert, Digital beamforming for multimedia flexible antennas, *IEEE Internet of Things Journal*, 2003., str. 366-369.
- [34] H. Steyskal, Digital Beamforming, *IEEE Internet of Things Journal*, 1988., str. 49-56.
- [35] M. N. Hamdy, Beamformers Explained, <https://www.commscope.com/beamformers-explained/>, dostupno 01.08.2023.
- [36] T. Maksymyuk, J. Gazda, O. Yaremko, D.Nevinskiy, Deep Learning Based Massive MIMO Beamforming for 5G Mobile Network, *IEEE Internet of Things Journal*, 2018., str. 241-243.
- [37] A. K. Noor, Computational structures technology: leap frogging into the twenty-first century, *Computers & Structures*, Volume 73, Issues 1–5, 1999., str. 1-31.
- [38] Rachmansyah, Antonius Irianto, A. Benny Mutiara, Designing and Manufacturing Microstrip Antenna for Wireless Communication at 2.4 GHz, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 3, 2011., str. 670-674.

## Popis slika

Slika 2.1 Usporedba mobilnih mreža, Emil Dumić, Osnove antena, 2023. ....	14
Slika 2.2: GSM , Izvor: Rashmi Bhardwaj, CDMA vs GSM: Detailed Comparison of Mobile Technologies, IP With Ease, 2021. ....	15
Slika 2.3: CDMA , Izvor: Rashmi Bhardwaj, CDMA vs GSM: Detailed Comparison of Mobile Technologies, IP With Ease, 2021. ....	15
Slika 2.4: 4G struktura , LN Degambur, A. E. U. Mungur, S. Armoogum, S. Pudaruth, Resource Allocation in 4G and 5G Networks: A Review, ResearchGate, 2021. ....	18
Slika 3.1: 5G struktura , Tushar Anand, 5G Network Architecture, GeeksforGeeks, 2022. ....	20
Slika 3.2: MIMO antena , Korea, Samsung Shares Massive MIMO Roadmap in New Whitepaper, Samsung Global Newsroom, 2023. ....	22
Slika 3.3: Antena za 5G komunikaciju , Ayushee Sharma, Antennas For Emerging 5G Communication, Electronics For You, 2020. ....	23
Slika 4.1: Elektromagnetski val , Retevis Solutions, How does the antenna receive electromagnetic waves?, Retevis Solutions, 2020. ....	26
Slika 4.2: Beamforming , Riina,, Beamforming Antennas –How they work and are tested?, Beamforming, 2021. ....	31
Slika 8.1: Antena 2,4 GHz .....	48
Slika 8.2: S parametar 2,4 GHz .....	49
Slika 8.3: E polje 2,4 GHz .....	49
Slika 8.4: H polje 2,4 GHz.....	50
Slika 8.5: 3D dijagram zračenja u dalekom polju, 2,4 GHz (usmjerenost 6,69 dBi, dobitak 1,79 dBi) .....	50
Slika 8.6: Antena 1x2 3,6 GHz .....	51
Slika 8.7: S parametar 1x2 3,6 GHz .....	52
Slika 8.8: E polje 1x2 3,6 GHz .....	53
Slika 8.9: H polje 1x2 3,6 GHz.....	53
Slika 8.10: 3D dijagram zračenja u dalekom polju, 1x2 3,6 GHz (usmjerenost 9,92 dBi, dobitak 9,68 dBi).....	54
Slika 8.11: Antena 2x2 3,6 GHz .....	54
Slika 8.12: S parametar 2x2 3,6 GHz .....	55
Slika 8.13: E polje 2x2 3,6 GHz .....	55
Slika 8.14: H polje 2x2 3,6 GHz.....	56
Slika 8.15: 3D dijagram zračenja u dalekom polju, 2x2 3,6 GHz (usmjerenost 10,90 dBi, dobitak 10,63 dBi).....	56
Slika 8.16: Antena 24 GHz .....	57
Slika 8.17: S parametar 24 GHz .....	58
Slika 8.18: E polje 24 GHz .....	58
Slika 8.19: H polje 24 GHz.....	59
Slika 8.20: 3D dijagram zračenja u dalekom polju, 24 GHz (usmjerenost 12,02 dBi, dobitak 11,38 dBi) .....	59

MLTON  
ALISBAINO

# Sveučilište Sjever



SVEUČILIŠTE  
SIEVER

## IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, LORENA GREGORIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom ANTEME ZA 59 KOMUNIKACIJSKE SUSTAVE (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Lorena Gregorić  
(vlastoručni potpis)

Sukladno čl. 83. Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Sukladno čl. 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje znanstvena i umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.