

Metode mjerenja 5G sustava.

Ilakovac, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:982996>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-22**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika

METODE MJERENJA 5G SUSTAVA

Diplomski rad

Josip Ilakovac

Osijek, 2024.

Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ime i prezime pristupnika:	Josip Ilakovac
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Komunikacije i
Mat. br. pristupnika, god.	D-1366, 07.10.2021.
JMBAG:	0165077379
Mentor:	prof. dr. sc. Vanja Mandrić
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	prof. dr. sc. Slavko Rupčić
Član Povjerenstva 1:	prof. dr. sc. Vanja Mandrić
Član Povjerenstva 2:	prof. dr. sc. Davor Vinko
Naslov diplomskog rada:	Metode mjerenja 5G sustava.
Znanstvena grana diplomskog rada:	Radiokomunikacije (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	5G sustav. Metode mjerenja mjerenja. Najnovije stanje.
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	05.07.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	15.07.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Vrlo dobar (4)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	16.07.2024.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****IZJAVA O IZVORNOSTI RADA**

Osijek, 16.07.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Josip Ilakovac
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Komunikacije i informatika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1366, 07.10.2021.
Turnitin podudaranje [%]:	11

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Metode mjerenja 5G sustava.**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Vanja Mandrić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada	1
2. POVIJEST MOBILNIH KOMUNIKACIJSKIH SUSTAVA	2
2.1. Mobilne mreže prve generacije (1G)	4
2.2. Mobilne mreže druge generacije (2G)	6
2.3. Mobilne mreže treće generacije (3G)	7
2.4. Mobilne mreže četvrte generacije (4G)	9
2.5. Mobilne mreže pete generacije (5G)	10
3. OSNOVE MJERENJA U 5G SUSTAVIMA	14
3.1. Zračenje 5G sustava	14
3.2. Struktura 5G NR signala	18
3.3. Izloženost 5G zračenju	20
4. METODE MJERENJA 5G SUSTAVA	22
4.1. Kodno selektivna metoda	22
4.2. Frekvencijski selektivna metoda	24
5. MJERENJE ZRAČENJA 5G SUSTAVA	26
5.1. Mjerenje kodno selektivnom metodom	26
5.2. Mjerenje frekvencijski selektivnom metodom	28
5.3. Analiza rezultata mjerenja	33
6. ZAKLJUČAK	35
LITERATURA	36
SAŽETAK	39
ABSTRACT	40
ŽIVOTOPIS	41

1.UVOD

Kontinuirani razvoj mobilnih komunikacija kroz dugi niz godina rezultirao je najnovijim razdobljem mobilne industrije poznato kao peta generacija mobilnih sustava, ili jednostavnije 5G. Pristup mobilnim komunikacijama kontinuirano se razvija, a svaka nova generacija tehnologija predstavlja značajan napredak. U tom kontekstu 5G predstavlja najnoviji korak u razvoju bežičnih komunikacija. Ova nova generacija mobilne tehnologije donosi revolucionarne promjene u načinu korištenja mobilnih usluga postavljajući temelje za razvoj umjetne inteligencije (engl. *Artificial Intelligence, AI*), pametnih gradova, interneta stvari (engl. *Internet of Things, IoT*), proširenu stvarnost (engl. *Augmented Reality, AR*) i virtualnu stvarnost (engl. *Virtual Reality, VR*) [1].

Svaki od prethodnih mobilnih komunikacijskih sustava ima svoje prednosti, ali i nedostatke koji će biti istaknuti u ovome radu, a isti se nastoje smanjiti razvojem novih sustava koji mogu podnijeti sve složenije i naprednije zahtjeve koje postavljaju sami korisnici. Tako su se zahtjevi proširili od najobičnije, ali i dalje složene komunikacije između korisnika mobilnih sustava, do komunikacije velikog broja korisnika sa još većim brojem različitih uređaja, te komunikacije uređaja i sustava međusobno. S razvojem mobilnih komunikacijski tehnologija javila se potreba za provođenjem raznih mjerenja s ciljem regulacije razine elektromagnetskog zračenja i zaštite ljudi od njegovih štetnih posljedica. U ovom radu opisane su dvije metode mjerenja elektromagnetskog zračenja, te su provedena mjerenja korištenjem istih metoda.

Diplomski rad se sastoji od sedam cjelina. Najprije je ukratko objašnjena povijest mobilnih komunikacijskih sustava od 1G do 5G, a zatim se nastavlja na 5G i njegove karakteristike. U slijedećem poglavlju obrađene su dvije metode mjerenja 5G sustava (kodno selektivna i frekvencijski selektivna metoda). Nakon toga objašnjena su provedena mjerenja i dobiveni rezultati, te je izveden zaključak.

1.1. Zadatak diplomskog rada

5G sustav. Metode mjerenja. Najnovije stanje.

2. POVIJEST MOBILNIH KOMUNIKACIJSKIH SUSTAVA

Više od stoljeća radio tehnologija omogućuje bežičnu komunikaciju na sve većim udaljenostima i sa sve većim mogućnostima. Krajem 19. stoljeća Guglielmo Marconi izgradio je prvi bežični telegrafski sustav sposoban za prijenos Morseove abecede putem radio signala na udaljenost do pola milje [2]. Njegov sustav se temeljio na širokopojasnim impulsima radijskog šuma koji su stvoreni pomoću iskre generatora spojenog na antenu. Signal je primljen pomoću slične antene pričvršćene na zanimljiv uređaj poznat kao "koherer", cijev u kojoj su metalne čestice usmjerene da se povežu jedna s drugom prisutnošću radijskog signala. Smanjeni otpor koherera u tom stanju omogućio je detekciju radijskog signala nakon čega je mehanički "taper" vratio čestice u njihovo izvorno stanje. Svaki simbol bio je predstavljen brzim nizom ovakvih signala stvorenih pomoću iskre koji su detektirani kao zvučni ton. Unutar godine dana Marconi je dodao filtriranje kako bi stvorio odvojive kanale i omogućio višestruke istovremene prijenose na istom području. U roku od tri godine uspio je omogućiti radijsku vezu preko Atlantskog oceana, a radiotelegrafija se ubrzo koristila na mnogim brodovima koji su plovili oceanima. Analogna (glasovna) komunikacija koristila se već 1905. godine, ali prvi sustavi su uglavnom bili usmjereni na vojne primjene, i tek 1919. godine pokrenuta je eksperimentalna radiotelefonska usluga između broda i obale [3]. Danas, više od sedam milijardi mobilnih uređaja omogućuje komunikaciju s bilo kime, bilo gdje u svijetu. Prvi potpuno mobilni dvosmjerni radio razvijen je 1923. godine i koristio se u policijskim automobilima u Australiji iako je zauzimao cijelo stražnje sjedalo vozila [2]. Raspoloživi spektar koji bi se mogao koristiti za praktične sustave uvijek je bio ograničen, a mobilne komunikacijske usluge su bile u konkurenciji s vojnim servisima za dostupne kanale. Kao rezultat toga većina mobilnih radijskih kanala bila je posvećena hitnim službama i javnim uslugama sve dok se nije dogodila revolucija mobilnih mreža nekih pedesetak godina kasnije. Unatoč tim poteškoćama prvi mobilni telefonski servis je započeo 1947. godine koristeći nekoliko kanala na 35 MHz. Dodatni kanali su ubrzo dodijeljeni na 150 MHz, a kasnije na 450 MHz. Poboljšani filteri i stabilnost frekvencija omogućili su sužavanje tih kanala stvarajući ukupno više od 40 kanala za mobilnu telefoniju. Rani mobilni telefonski sustavi su koristili snažne odašiljače smještene na visokim tornjevima ili krovovima zgrada kako bi pokrili udaljenost od 40 – 50 kilometara. Ponovna upotreba istog kanala za drugi poziv zahtijevala je razmak od više od 80 kilometara. Na primjer kanali iz New Yorka su se ponovno koristili u Philadelphiji, tako da su svaki grad i njegovo predgrađe bili ograničeni na oko 40 istovremenih poziva [3]. Potražnja za uslugom bila je velika što je rezultiralo preopterećenim kanalima i dugim listama čekanja za uslugu. U praksi,

ljudima s hitnom potrebom za uslugom (npr. liječnicima) pružana je povlaštena obrada dok je prosječna osoba bila prisiljena čekati na svoj red za uspostavu komunikacije [3]. Najraniji mobilni telefonski sustavi bili su "ručni", u smislu da su pozivi u oba smjera uspostavljeni preko mobilnog operatora (postupak koji je i danas uobičajen na pomorskim radio sustavima). U 1960-ima su uvedeni automatski sustavi sa značajnim napretkom. "Prazan ton" bio je postavljen na slobodan kanal tako da skenirajući prijemnik može identificirati i zauzeti taj kanal. Mobilni telefon je mogao dekodirati birani broj na slobodnom kanalu i slati birane znamenke za odlazne pozive. Kombinacija tih mogućnosti rezultirala je mobilnom telefonskom uslugom koja je bila slična konvencionalnoj telefonskoj usluzi tog razdoblja (osim što je zbog pretrpanosti slobodan kanal rijetko bio dostupan). Tijekom nekoliko desetljeća svog postojanja ovi ručni i automatski sustavi stvorili su sliku mobilne telefonije kao prezauzete, ali "elite" usluge koja je uglavnom bila nedostupna javnosti [3]. Mobilni sustavi koji su se koristili tijekom prvog desetljeća pružanja usluge koristili su digitalne signale za kontrolu, ali glasovni signal bio je prenesen kao "analogni" signal. Već tijekom 1970-ih godina postojala je rasprava o potencijalnim prednostima potpuno digitalnog sustava. Tada se zaključilo da tehnologija nije spremna za potpuno digitalni mobilni telefon koji bi postigao istu učinkovitost spektra, kvalitetu glasa i troškove kao analogni dizajn, ali krajem 1980-ih to se brzo promijenilo [3]. Primarni razlog bio je taj što je tehnologija obrade glasa koristeći čipove za digitalnu obradu signala postigla dramatičan napredak. Kvalitetan prijenos glasa koji je nekad zahtijevao 30 000 - 60 000 bitova po sekundi postao je moguć pri brzinama koje su se približavale 10 000 bitova po sekundi. To je omogućilo stvaranje tri puta više glasovnih kanala iz istog spektra što je imalo važne ekonomske implikacije [3]. Ručni radio uređaji tzv. "walkie-talkie" prvi put su korišteni za vrijeme Drugog svjetskog rata. 1973. godine obavljen je prvi poziv putem ručnog mobilnog telefona - mobilni telefon tada je opisan kao "cigla" težine gotovo jedan kilogram sa samo 30 minuta vremena za razgovor i desetosatnim vremenom punjenja baterije. Deset godina kasnije Motorola je predstavila telefon DynaTAC (Slika 2.1.), težak „samo“ oko 450 grama s cijenom od 3500 dolara [2]. Do danas su se mobilne komunikacije neprestano razvijale, a u slijedećim potpoglavljima slijedi detaljnije upoznavanje s njihovim razvojem.

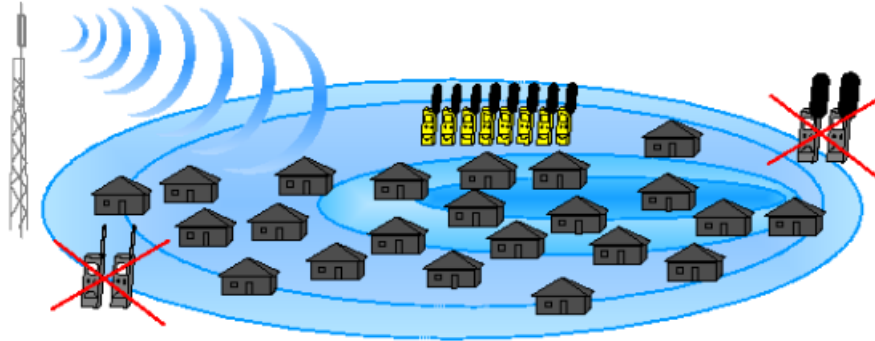


Slika 2.1. Telefon DynaTAC [4].

2.1. Mobilne mreže prve generacije (1G)

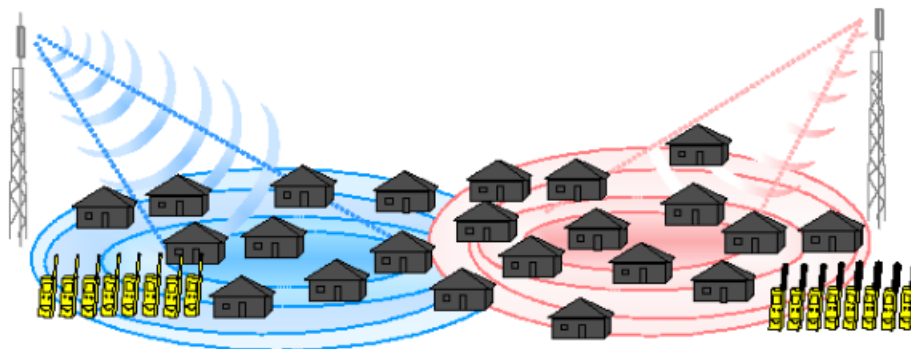
Koncept mobilnog umrežavanja prvi je put predstavio V. H. Mac Donald iz Bell Telephone Laboratories (BTL) u svom radu iz 1979. godine, "The Cellular Concept". Njegov koncept se temelji na podjeli područja kojeg pokriva velika odašiljačka stanica na manja područja poznata i kao ćelije (engl. *cells*). U svakoj ćeliji, s manjom odašiljačkom snagom ostvaruje se bežična komunikacija između mobilnih korisnika u različitim ćelijama putem ograničenog broja frekvencija [5]. Iz ovog koncepta ostvarena su dva vrlo bitna rezultata. Kao prvo ponovno korištenje ograničenog broja dostupnih frekvencija omogućava području koje obuhvaća više ćelija da obradi puno veći broj istovremenih poziva od broja dodijeljenih frekvencijskih kanala. Isti skup frekvencija se može koristiti u ćelijama koje su međusobno dovoljno udaljene da se izbjegne interferencija između ćelija koje koriste isti skup frekvencija. Kao rezultat toga kapacitet sustava ili broj pretplatnika po dodijeljenim kanalima je značajno povećan jer se kapacitet povećava s brojem podskupova ćelija s različitim frekvencijama koje ponovno koriste isti skup frekvencija [5]. Druga bitna značajka ćelijskog koncepta je dijeljenje ćelija, gdje se smanjuje veličina ćelija kako bi se povećao broj istovremenih poziva bez dodavanja novih frekvencija. Time se je povećala gustoća korisnika, odnosno broj korisnika po jedinici površine, ostvarena je efikasna upotreba radiofrekvencijskog spektra, povećala se pokrivenost na razini države i kontinenta, omogućila se prilagodljivost različitim uvjetima gustoće prometa, ostvarila se približno jednaka kvaliteta usluge fiksne mreže, smanjila se cijena usluge i omogućilo se posluživanje različitih tipova korisničkih uređaja [5]. Na slikama 2.2. i 2.3. prikazan je primjer

povećanja kapaciteta primjenom ćelijskog koncepta. Na slici 2.2. prikazano je područje koje je pokriveno s jednom baznom stanicom na rubu i 8 uređaja po području, te se može vidjeti da nema dovoljno kapaciteta za dodavanje novih korisnika u mreži.



Slika 2.2. Područje bez primjene ćelijskog koncepta [6].

Slika 2.3. prikazuje identično područje s proširenim kapacitetom na kojem bazna stanica i dalje poslužuje 8 uređaja, ali dodavanjem nove bazne stanice i smanjenjem ćelije omogućava se spajanje 8 novih korisnika.



Slika 2.3. Primjer implementacije ćelijskog koncepta [6].

1G, prva generacija mobilne mreže prvi puta je predstavljena u Tokiju 1979. godine od strane Nippon Telegraph and Telephone (NTT) i mogla je prenositi samo glas u analognom formatu. Iste godine V. H. Mac Donald objavio je ranije spomenuti ćelijski koncept. 1983. godine Američka federalna komisija za komunikacije (engl. *U.S. Federal Communications Commission, FCC*) odobrila je gore

spomenuti DynaTAC (engl. *Dynamic Adaptive Total Area Coverage of 8000X*) telefon koji je prvi komercijalni mobilni uređaj na svijetu kojeg je predstavio Martin Cooper iz Motorole, a koristio je mobilnu tehnologiju AMPS (engl. *Advanced Mobile Phone System*) [5]. AMPS tehnologija se koristila sve do pojave druge generacije (2G) mobilne tehnologije. AMPS je analogni sustav mobilne telefonije standardno razvijen od strane Bell Telephone Laboratories (BTL), a kasnije je modificiran u suradnji između Bell Labs i Motorole. AMPS radi na dva frekventijska pojasa, svaki širine 25 MHz:

- 824 MHz do 849 MHz
- 869 MHz do 894 MHz [5]

U svakom pojasu polovica frekvencija dodijeljena je za odašiljanje ili kanal za slanje, a druga polovica za prijem ili povratni kanal. Pojasevi su dalje podijeljeni na kanale širine 30 kHz, a ta podjela je postignuta pomoću FDMA (engl. *Frequency Division Multiple Access*) tehnologije koja predstavlja višestruki pristup s frekventijskom podjelom. Kao rezultat toga ostvarena su 832 multipleksirana kanala za svaki pojas (25 MHz/30 kHz). 1G tehnologija bila je opterećena mnogim drugim problemima kao što su mala pokrivenost, nedostatak enkripcije, loša kvaliteta zvuka povezana s analognim signalima i nedostatak roaminga. Usprkos svojim nedostacima 1G je postavila temelje i otvorila vrata poboljšanjima koja će donijeti druga generacija (2G) mobilne telefonije [5].

2.2. Mobilne mreže druge generacije (2G)

Mobilna mreža druge generacije predstavljena je 1991. godine u Finskoj. 2G se temelji na GSM-u (engl. *Global System for Mobile Communication*) i nastao je s ciljem posluživanja sve većeg broja mobilnih uređaja [5]. GSM je digitalni standard za mobilne komunikacije koji je univerzalno prihvaćen. Europski institut za telekomunikacijske standarde (ETSI) razvio je GSM standard kako bi definirao postupke za digitalne mobilne mreže druge generacije. Druga generacija mobilne tehnologije uvela je brojne značajne promjene u odnosu na prvu generaciju. Osim omogućavanja enkriptiranih poziva, analogno signaliziranje zamijenilo je digitalno što je rezultiralo višom kvalitetom prijenosa podataka [5]. Komunikacija više nije bila ograničena samo na glas omogućavajući korisnicima telefona slanje i primanje tekstualnih poruka do 160 znakova, poznato kao SMS usluga (engl. *Short Message Service*). Druga značajna usluga koju je omogućio 2G je prijenos slika, video i audio sadržaja između korisnika telefona dok je slanje podatkovnih paketa postalo poznato kao usluga multimedijских poruka (engl. *Multimedia Messaging Service, MMS*) [5].

Ovdje je potrebno istaknuti tri glavne značajke koje razlikuju 2G od 1G:

- Glasovni signali više nisu analogni, već digitalni, što je rezultiralo poboljšanjem kvalitete glasa. GSM je i dalje sustav s komutacijom kanala.
- Dodano je slanje tekstualnih poruka putem SMS-a, te na kraju prijenos slika i videozapisa putem MMS-a.
- Enkripcija podataka, koja je poboljšala sigurnost prijenosa podataka [5].

Druga generacija je prošla kroz mnoga poboljšanja tijekom desetljeća sa sve boljim performansama od izvornih 2G GSM standarda. Izvorni 2G GSM bio je relativno spor sustav s komutacijom kanala sposoban za obradu ograničene količine podataka. Idući značajan napredak ostvaren je kroz GPRS (engl. *General Packet Radio Services*) uvođenjem komutacije paketa, te je često nazivan i 2.5G. Daljnje poboljšanje uslijedilo je s EDGE-om (engl. *Enhanced Data Rate for GSM Evolution*), nazvanim 2.75G [5]. Na primjer, brzina prijenosa podataka počevši s izvornim GSM standardima, porasla je s 9,6 Kb/s na raspon od 35 Kb/s do 171 Kb/s s GPRS-om. Do kraja stoljeća prije uvođenja 3G tehnologije, brzina prijenosa podataka s EDGE-om dosegla je raspon od 126–384 Kb/s. GSM koristi višestruki pristup s vremenskom podjelom (engl. *Time Division Multiple Access, TDMA*) oblik vremenskog multipleksiranja, i višestruki pristup s frekvencijskom podjelom (engl. *Frequency Division Multiple Access, FDMA*) slično frekvencijskom multipleksiranju [5].

I dok mnogi dijelovi svijeta još uvijek koriste 2G mreže mobilni operateri su započeli gašenje svojih 2G mreža već od 2016. godine. Razlog tome je što radio frekvencijski (RF) spektar predstavlja ograničen resurs, a 2G mreže koriste dijelove spektra koji bi se mogli bolje iskoristiti za naprednije tehnologije. Međutim, neki operateri još uvijek koriste 2G mrežu kao rezervnu opciju na područjima gdje njihove naprednije mreže nemaju pokrivenost. Ostale zemlje koje nisu toliko napredovale u implementaciji novijih standarda mogu još uvijek koristiti 2G kao glavnu opciju povezivanja [7].

2.3. Mobilne mreže treće generacije (3G)

S porastom korištenja mobilnih telefona s 2G tehnologijom došlo je do povećane potražnje za više usluga prijenosa podataka. Postalo je očito da mrežne mogućnosti postojećeg 2G sustava nisu dovoljne za zadovoljavanje rastuće potrebe za pristupom internetu. 3G, treća generacija mobilnih komunikacija najavila je početak 21. stoljeća. Mobilna tehnologija treće generacije je povećala frekvencijski spektar prijenosa podataka na dva pojasa: 1885 - 2025 MHz i 2110 - 2200 MHz, te je

također značajno povećala brzine prijenosa podataka na 2 Mb/s i više [5]. Razvoj 3G tehnologije trajao je tijekom prvog desetljeća ovog stoljeća, od 2000. do 2010. godine. Nadogradnje su se nastavile i nakon 2010. godine s demonstriranim brzinama prijenosa podataka od 20 Mb/s nakon uvođenja četvrte generacije bežične komunikacijske tehnologije (4G). 3G tehnologiju prva je uvela japanska tvrtka Nippon Telegraph and Telephone (NTT) 2001. godine [5]. 3G tehnologija je omogućila međunarodnu komunikaciju s dodatnim uslugama kao što su video streaming i konferencije te *Voice over Internet Protokol* (VoIP). Glavne značajke 3G tehnologije su:

- Podržava veći glasovni i podatkovni kapacitet prijenosa podataka i niže troškove prijenosa podataka pri brzinama od 2 Mb/s i većim.
- Omogućuje sigurnost prijenosa podataka pomoću enkripcije.
- Za razliku od 2G gdje je glas analogan dok je prijenos podataka rudimentaran, 3G pruža digitalizirani glas i podatke [5].

Specifikacije za 3G razvila je Međunarodna telekomunikacijska unija (engl. *International Telecommunication Union, ITU*) i objavila kao standard pod oznakom IMT (engl. *International Mobile Communications*). Razvijena su dva konkurentna sustava:

- UMTS (engl. *Universal Mobile Telecommunications Service*) koji je razvijen u Europi i prisutan u većem dijelu svijeta, i
- CDMA2000 koji je razvijen u SAD-u i prvotno implementiran u Južnoj Koreji [5].

Ipak oba konkurentna sustava, UMTS i CDMA2000, koriste istu tehnologiju višestrukog pristupa: višestruki pristup s kodnom podjelom (engl. *Code Division Multiple Access, CDMA*) tehniku rasprostranjenog spektra koju je razvila tvrtka Qualcomm u SAD-u [5]. CDMA2000 koristi uskopojasni CDMA s kanalima od 1,25 MHz dok UMTS koristi širokopojasni CDMA, poznat kao WCDMA s širinom kanala od 5 MHz. 3G je donio standardizaciju mrežnih protokola u bežične komunikacije. Osim što je još uvijek pružao komutaciju kanala 2G telefonije, koja veže kanal između dva korisnika za trajanje poziva, i 3G UMTS i 3G CDMA2000 mogu dijeliti isti kanal između mnogih korisnika razbijajući odgovarajuće poruke u pakete dogovorene veličine koji se, kada ih specifični korisnik primi, mogu rekonstruirati u izvornu poruku. Ova metoda prijenosa, poznata kao komutacija paketa, postala je norma u 3G bežičnim komunikacijama i narednim generacijama [5].

2.4. Mobilne mreže četvrte generacije (4G)

4G mobilna tehnologija bila je veliki korak naprijed koji je zahtijevao nove uređaje. Jedan od takvih uređaja, Appleov iPhone, značajno je doprinio rastu 4G tehnologije. Ova nova tehnologija uvedena je 2009. godine u Švedskoj i Norveškoj kao *Long-Term Evolution* (LTE) i temeljena je na standardima koje je specificirala *International Telecommunications Union-Radio* (ITU-R) organizacija pod projektom *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) [5]. Istovremeno, konkurentni standard 802.16 mobilni WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) uveden je u SAD-u od strane IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). Ni LTE ni WIMAX nisu uspjeli zadovoljiti 4G standarde te su smatrani privremenim rješenjima, odnosno ažuriranim verzijama 3G standarda [5]. Napokon, u ožujku 2011. godine ažurirana verzija LTE-a, nazvana LTE-Advanced (skraćeno LTE-A), odobrena je od strane 3GPP-a jer je zadovoljila 4G standarde koje je postavila organizacija ITU-R [5]. Otprilike u isto vrijeme IEEE je izdao ažuriranu verziju WIMAX2 koja je bila konkurentna verziji LTE-A. Ključne značajke LTE-A mreže su:

- Mrežne ćelije: Mješavina makroćelija, mikroćelija, pikoćelija i femtoćelija s odašiljačkom snagom (u vatima) po dometom (u metrima) [5]:
 - Makroćelije: 20 W / 35 km.
 - Mikroćelije: 5 W / 2 km.
 - Pikoćelije: 1 W / 200 m.
 - Femtoćelije: 0,1 W / 10 m.
- Frekvencijski spektar:
 - Preko 40 pojaseva koji globalno djeluju između niskih frekvencija, 700 MHz, i visokih frekvencija, 2800 MHz.
 - Svaki pojas ima i uzlaznu vezu (od mobilne stanice do bazne stanice) i silaznu vezu (od bazne stanice do mobilne stanice) [5].
- Širina kanala:
 - 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz i 20 MHz.

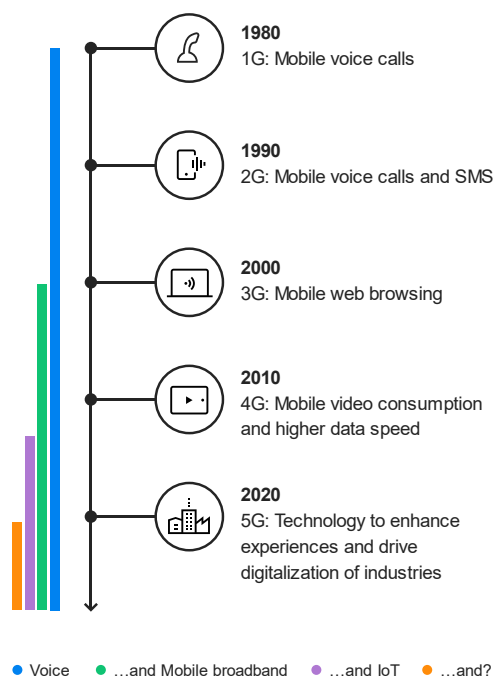
- Agregacija nositelja (tehnologija koja omogućuje kombinaciju više kanala u različitim frekvencijskim pojasevima, značajno povećava propusnost i kapacitet):
 - Efektivna širina pojasa, a time i brzina prijenosa podataka može se povećati pet puta širenjem podataka preko maksimalno 5 različitih frekvencijskih nositelja [5].
 - Dakle, povećanje s 20 MHz na $5 \times 20 \text{ MHz} = 100 \text{ MHz}$.
- Razmak podnosioca (engl. *subcarriers*): 15 kHz.
- Protokol pristupa:
 - Silazna veza: OFDMA (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), ortogonalni višestruki pristup s frekvencijskom podjelom.
 - Uzlazna veza: SC-FDMA (engl. *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*), jednokanalni višestruki pristup s frekvencijskom podjelom (SC-FDMA ima niži omjer vršne i prosječne snage od OFDMA) [5].
- Tehnologija komutacije: integrirani glas i podaci, komutacija paketa.
- Najveće brzine prijenosa podataka pri niskoj mobilnosti (preuzimanje / prienos): 1 Gb/s / 500 Mb/s.
- Najveće brzine prijenosa podataka pri visokoj mobilnosti (500 km/h): 100 Mb/s.
- Kašnjenje < 50 ms [5].

Kvaliteta glasovnih poziva znatno je poboljšana u usporedbi s prethodnim generacijama pružajući jasniji zvuk i manje smetnji tijekom razgovora. Osim poboljšane brzine prijenosa podataka, 4G tehnologija pruža i druge napredne značajke. Nudi podršku za širok spektar multimedijских usluga poput *streaminga* visoke kvalitete, gledanja video sadržaja u visokoj rezoluciji i preuzimanja velikih datoteka u kratkom vremenu. Također omogućuje napredne funkcionalnosti kao što su poboljšana sigurnost podataka i mogućnost pristupa raznim internetskim uslugama putem IP konekcije[1].

2.5. Mobilne mreže pete generacije (5G)

Novе mobilne mreže su se pojavljivale otprilike svakih 10 godina počevši od 1980. godine kada je 1G uveo velike mobilne telefone koji su omogućavali samo telefonske pozive. Kasnije je 2G uveo

moćnost slanja poruka, 3G je omogućio pristup internetu, a 4G, koji se pojavio 2009. godine, donio je značajan napredak u brzinama preuzimanja podataka (Slika 2.4.).



Slika 2.4. Razvoj mobilne tehnologije[8].

Daljnijim razvojem mobilnih komunikacija nastao je 5G. 5G je peta i najnovija generacija mobilnih tehnologija posvećena bežičnom prijenosu podataka. Prva 5G mreža implementirana je u Južnoj Koreji u travnju 2019. godine [5]. 5G je posvećen povezivanju velikog broja uređaja koji komuniciraju putem interneta i komunikaciji između ljudi i uređaja kao što su mobilni telefoni, tableti, računala, senzori i različiti industrijski strojevi [5]. Takva masovna povezanost zahtijeva nove standarde prijenosa podataka kao što su:

- Vrlo velike brzine do 10 Gb/s u uzlaznoj vezi i 20 Gb/s u silaznoj vezi.
- Vrlo nisku latenciju, od 110 ms do 1 ms.
- Povezivanje velikog broja uređaja putem interneta.
- Energetsku učinkovitost.
- Sigurnost - najsigurnija mobilna mreža ikada, sa sigurnošću ugrađenom kao dio procesa standardizacije kako bi se osigurala veća pouzdanost i dostupnost [5].

Kako bi se uspješno ostvarile navedene značajke 5G tehnologija uvodi korištenje milimetarskih valova. Milimetarski valovi zahtijevaju nove mobilne telefone s niskom snagom, malim, pametnim antenama (engl. *Multiple Input/Multiple Output, MIMO*) i ugrađenim modemima (modulator/demodulator) koji su sposobni za 'up' ili 'down' pretvaranje frekvencija milimetarskog područja između 30 i 300 GHz [5].

Ogromno područje pokrivenosti koje proizlazi iz očekivano velikog broja veza između ljudi i uređaja putem interneta naziva se Internet stvari (engl. *Internet of Things, IoT*), pojam koji je oko 1999. godine predstavio Kevin Ashton, britanski menadžer u *Proctor and Gambleu* koji je razvio RFID (engl. *Radio Frequency Identification Tag*). RFID je tehnologija za identifikaciju radio frekvencija koja se koristi za identifikaciju i praćenje robe u raznim poslovima kao što su robne kuće i sl [5].

Ukratko, 5G bežična povezanost odvija se između:

- Mobilnih odašiljača, bežična lokalna mreža (engl. *Wireless Local Area Network, WLAN*), interneta itd.
- Komunikacija između ljudi (pametni telefoni, tableti, osobna računala), uključujući video pozive s više osoba.
- Komunikacija između strojeva koji se koriste za nadzor senzorskih mreža, industrijska automatizacija, autonomni automobili [5].

Kako se 5G nosi s tako povećanim kapacitetom i povezanošću? Odgovor na ovo pitanje jest dodavanjem spektra milimetarskih valova (mmWave) u kombinaciji s manjim antenama. U suštini:

- Prelazak na spektar milimetarskih valova povećava kapacitet prijenosa podataka zahvaljujući većoj širini pojasa dostupnoj na višim frekvencijama.
- Manje antene s MIMO antenskim nizovima koje omogućuju veću povezivost.
- Oboje dovodi do formiranja mikro-ćelija udaljenih nekoliko stotina metara i femto-ćelija udaljenih manje od sto metara [5].

Ukupni frekvencijski spektar koji pokriva 5G u principu se proteže od 3 do 300 GHz. Budući da 5G mora podržavati stare 4G uređaje potrebno je uključiti i frekvencijski raspon 4G LTE, ispod 3 GHz do 600 MHz. Tako da možemo reći da 5G pokriva tri frekvencijska pojasa:

- Visoki pojas (milimetarski valovi), pokriva raspon od 24 do 300 GHz (12,5 do 1,0 mm).

- Srednji pojas, sub-6 GHz, pokriva raspon od 3 GHz do 6 GHz.
- Niski pojas, 4G spektar, obuhvaća raspon između 600 MHz i 3 GHz [5].

Kako bi se 5G mreže učinile izvedivim bilo je potrebno razviti nove tehnologije:

1. Milimetarski valovi (mmWaves).

Osnovni problem mobilne mreže leži u velikom broju korisnika i uređaja koji prenose sve više podataka koristeći jednaki frekvencijski pojas kao i prije što dovodi do manje širine pojasa za pojedinačnog korisnika što rezultira sporijom uslugom i većim brojem „odbačenih mreža“. Zato se kao rješenje uvode milimetarski valovi-područje spektra koje nikada prije nije bilo korišteno za mobilne usluge [9]. Prednosti korištenja milimetarskih valova su dvostruke: proširena pokrivenost i veće brzine prijenosa podataka. Povećane brzine prijenosa podataka su izravan rezultat rada u višem dijelu frekvencijskog spektra, od oko 30 GHz i teoretski do 300 GHz, gdje brzine prijenosa podataka do 10 Gb/s koje zauzimaju širinu pojasa od otprilike 10 GHz čine mali dio dostupnog spektra. Glavni nedostatak milimetarskih valova je njihovo veliko gušenje u slobodnom prostoru jer ne mogu lako prodirati kroz zgrade ili druge prepreke [9]. Rješenje za taj problem je ostvareno uvođenjem malih ćelija. Na taj način se ćelije dijele na više manjih ćelija što omogućava višekratno korištenje istog skupa frekvencija korištenih u osnovnoj ćeliji [9].

2. Masivni MIMO.

MIMO, jedna od revolucionarnih tehnologija 5G smanjuje smetnje kanala uzrokovane višestazjem. MIMO antene smještene na vrhu odašiljača makro-ćelija imaju usmjerene zrake koje omogućuju komunikaciju više korisnika na istoj frekvenciji [5].

3. Mrežno segmentiranje (engl. *network slicing*) predstavlja metodu razdvajanja mnoštva virtualnih mreža koje se nalaze na fizičkom domaćinu (engl. *host*) u različite virtualne mreže koje dodjeljuje određeni stroj ili uređaj odgovarajućoj korisničkoj aplikaciji. Rezultat toga omogućuje pružateljima usluga da posvete specifične dijelove svojih mreža određenom paru uređaj-korisnik [5].

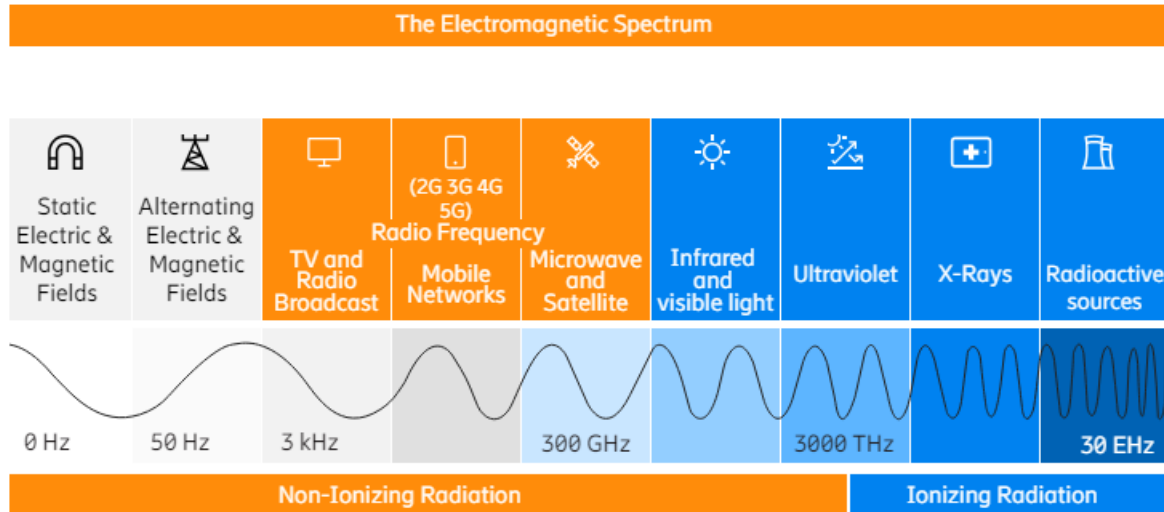
3. OSNOVE MJERENJA U 5G SUSTAVIMA

5G i njegove nove tehnologije poput usmjeravanje snopova (engl. *beamforming*) i frekvencije iznad 3 GHz izazvale su brojne rasprave među populacijom. U 5G NR-u usmjeravanje snopova primjenjuje se na gotovo sve signale, posebice na signale povezane s kanalom za podatke (engl. *Physical Downlink Shared Channel*, PDSCH) i signale za sinkronizaciju (engl. *Synchronization Signal Block*, SSB) [10]. 3GPP je definirao nove pojaseve poput n77 i n78 (3200 MHz do 4200 MHz) koji izazivaju zabrinutost za zdravlje posebno u vezi s povećanim elektromagnetskim zračenjem koje proizlazi iz viših frekvencija u kombinaciji s usmjeravanjem snopova [10].

Pitanje kako izmjeriti izloženost elektromagnetskom zračenju antene za 5G uvelike ovisi o svrsi mjerenja. Prvo, postoji zakonska obveza da antena za 5G radi unutar zakonskih granica. No, u usporedbi s mjerenjima u okruženjima koja koriste samo 2G/3G/4G uvođenje 5G-a donijelo je više poteškoća u mjerenjima [10]. Razlog tome je uvođenje tehnologije usmjeravanja snopova s prostornim i vremenskim upravljanjem zrakama, korištenja zajedničkih frekvencija za 4G i 5G (dinamičko dijeljenje spektra), dijeljenja frekvencija između antene i uređaja te naposljetku, različitog ponašanja propagacije frekvencija 5G -a zbog korištenja visokih frekvencija. Ovo zahtijeva drugačiji pristup za identificiranje maksimalne izloženosti zračenjima 5G sustava [10].

3.1. Zračenje 5G sustava

Kao i sve radiokomunikacije, uključujući radio i televizijsko emitiranje, satelitske komunikacije i prethodne generacije mobilnih mreža, 5G koristi radio valove za prijenos informacija između baznih stanica i povezanih uređaja. Radio valovi su oblik elektromagnetskih polja koji se prenose i primaju putem antena [11]. Oni pripadaju dijelu elektromagnetskog spektra koji se naziva radiofrekvencijski spektar, kako je prikazano na slici 3.1.



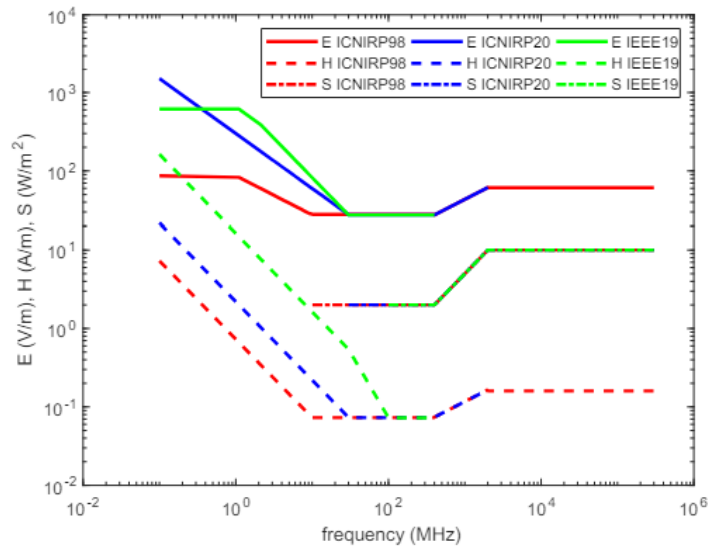
Slika 3.1. Spektar elektromagnetskog zračenja [11].

5G koristi frekvencijske pojaseve koje dodjeljuju regulatori, u rasponu od 600 MHz do 40 GHz, koji su unutar ili uz raspone koje već koriste prethodne generacije mobilnih mreža, satelitske komunikacije i druge radio aplikacije [11]. Radio valovi, uključujući nove više pojaseve koje koristi 5G, nazvane milimetarski valovi, vrlo su različiti od elektromagnetskih polja u gornjem dijelu spektra poznatih kao ionizirajuće zračenje s frekvencijama koje su više od 100.000 puta veće od onih radio valova koji se koriste za komunikaciju. Ionizirajuće zračenje je poznato po tome da ima frekvencije (i energiju fotona) dovoljno visoke da razbijaju kemijske veze što može uzrokovati oštećenje tkiva. Radio valovi nemaju takva svojstva [11].

Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća došlo je do značajnog i kontinuiranog rasta korištenja mobilnih komunikacijskih sustava koji obuhvaćaju razne aspekte svakodnevnog života. Ovaj porast oslanjanja na bežičnu tehnologiju također znači povećane šanse za izloženost izvorima elektromagnetskih polja. Međunarodna komisija za zaštitu od neionizirajućeg zračenja (*The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP*) je neovisna neprofitna organizacija čija je misija definirati smjernice i preporuke za zaštitu ljudi i okoliša od mogućih štetnih učinaka uzrokovanih izlaganjem radiofrekvencijskim elektromagnetskim poljima [12]. Smjernice koje objavljuje ICNIRP redovito se preispituju i ažuriraju na temelju rezultata znanstvenih istraživanja koja su prošla recenziju. Smjernice ICNIRP-a objavljene 1998. godine poslužile su kao osnova za nekoliko nacionalnih standarda i zakonodavstava za regulaciju sigurnih razina izloženosti

elektromagnetskim poljima, kako za radnike, tako i za opću javnost. Na primjer, Vijeće Europske Unije (EU) izdalo je 1999. godine set preporuka o ograničavanju izloženosti opće javnosti elektromagnetskim poljima koje su u potpunosti temeljene na ICNIRP-ovim smjernicama iz 1998. godine [12]. ICNIRP je objavio smjernice za ograničavanje izloženosti elektromagnetskim poljima do 300 GHz kako bi zaštitio opću javnost i radnike od dokazanih štetnih zdravstvenih učinaka. Navedene smjernice rezultat su opsežnih istraživanja objavljenih znanstvenih istraživačkih podataka od strane stručnjaka. Nalazi tih istraživanja poslužili su kao temelj za određivanje osnovnih ograničenja i referentnih razina za izloženost elektromagnetskom zračenju [12]. Osnovna ograničenja odnose se na maksimalne dopuštene razine izloženosti unutar tijela koje uzrokuju štetne zdravstvene učinke. One su obično izražene u fizičkim veličinama koje nisu jednostavne za mjerenje. Referentne razine nude praktičan način da se osigura da osnovna ograničenja, na kojima su temeljena, nisu prekoračena. Veličine koje se koriste za mjerenje referentnih razina uključuju: jakost električnog polja (E), jačinu magnetskog polja (H) i gustoću snage (S) [12].

Nekoliko zemalja diljem svijeta temelji svoje lokalno zakonodavstvo o elektromagnetskom zračenju na ICNIRP smjernicama, uključujući i EU. Još jedna organizacija koja se bavi izloženošću elektromagnetskim zračenjem je *International Committee on Electromagnetic Safety* (ICES), koji djeluje pod *the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE i izradio je IEEE standard za sigurnosne razine u vezi s ljudskom izloženošću elektromagnetskim poljima do 300 GHz [12]. Taj se standard uglavnom primjenjuje u Sjedinjenim Američkim Državama u pravilima koje izdaje Federalna komisija za komunikacije (FCC), a usvojile su ga i druge međunarodne organizacije, npr. NATO (*North Atlantic Treaty Organization*). IEEE Std. C95.1 posljednji put je ažuriran 2019. godine i usklađen s najnovijim ICNIRP smjernicama koje su kasnije objavljene 2020. godine [12]. Struktura glavnih međunarodnih organizacija koje izdaju smjernice o granicama elektromagnetskih zračenja i odnos između njihovih izvedenih smjernica/standarda i nacionalnog zakonodavstva prikazana je na slici 3.2.

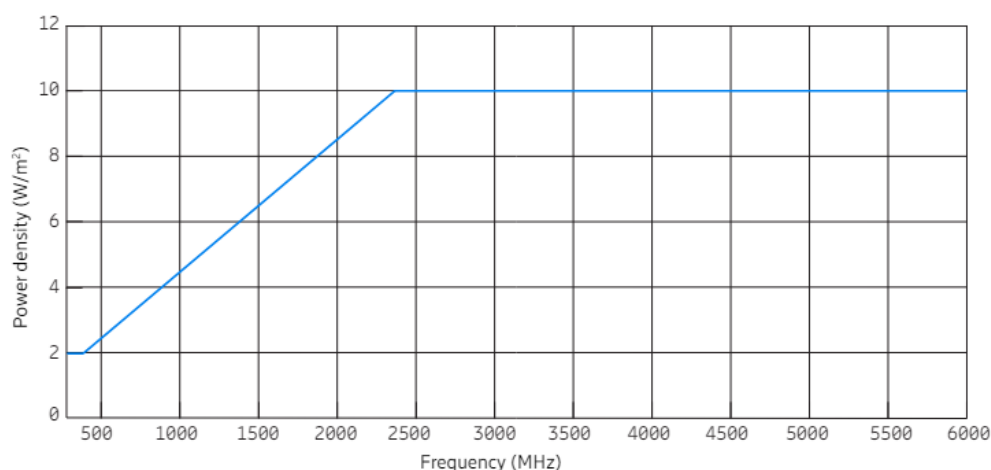


Slika 3.2. Referentne razine jakosti električnog polja (E), jakosti magnetskog polja (H) i gustoće snage (S) kako su definirane ICNIRP smjernicama iz 1998. i 2020. godine te IEEE standardom C95.1-2019 [12].

Elektromagnetsko zračenje ima sposobnost prodiranja u ljudsko tijelo pri čemu je glavni učinak porast temperature u izloženom tkivu. Ljudsko tijelo može se prilagoditi malim povećanjima temperature na isti način kao što to čini tijekom vježbanja i obavljanja sportskih aktivnosti reguliranjem unutarnje temperature. Međutim, iznad određene razine (koja se naziva prag), izloženost elektromagnetskom zračenju i popratni porast temperature mogu izazvati ozbiljne zdravstvene učinke, poput toplinskog udara i oštećenja tkiva (opekline) [13].

Još jedna opća karakteristika elektromagnetskog zračenja je da se s povećanjem frekvencije smanjuje dubina prodiranja elektromagnetskog polja u tijelo. Budući da 5G tehnologije mogu koristiti više frekvencije elektromagnetskog zračenja (>24 GHz) uz one koje se trenutno koriste (<4 GHz), energija tih viših frekvencija će se više apsorbirati površinski nego kod prethodnih tehnologija mobilnih telekomunikacija [13]. Međutim, iako je udio energije koji se apsorbira površinski (za razliku od dubljeg u tijelu) veći za više frekvencije, ICNIRP (2020) ograničenja su postavljena kako bi se osiguralo da će rezultirajuća vršna prostorna snaga ostati znatno niža od one koja bi mogla štetno utjecati na zdravlje. Prema tome, izloženost 5G neće uzrokovati nikakvu štetu pod uvjetom da se pridržava ICNIRP (2020) smjernica [13].

Granične vrijednosti elektromagnetskog zračenja primjenjive za bazne stanice obično su izražene u obliku gustoće snage (jedinica W/m^2) ili jakosti električnog polja (jedinica V/m) [11]. Slika 3.3. u nastavku prikazuje granične vrijednosti gustoće snage za opću javnost koje su propisane u mnogim zemljama diljem svijeta prema ICNIRP smjernicama iz 1998. godine. Ove referentne razine ovise o frekvenciji, ali su od 2 GHz definirane na konstantnoj razini od $10 W/m^2$ (ili $61 V/m$ izraženo kao jakost električnog polja). Važno je napomenuti da su također povezane s vremenskim prosjekom, na primjer 6 ili 30 minuta, što znači da je prosječna gustoća snage tijekom određenog vremena ona koja se uspoređuje s graničnom vrijednošću [11].



Slika 3.3. ICNIRP (1998) granične vrijednosti EM polja za opću javnost u frekvencijskom rasponu od 300 MHz do 6 GHz izražene kao vrijednosti gustoće snage [11].

3.2. Struktura 5G NR signala

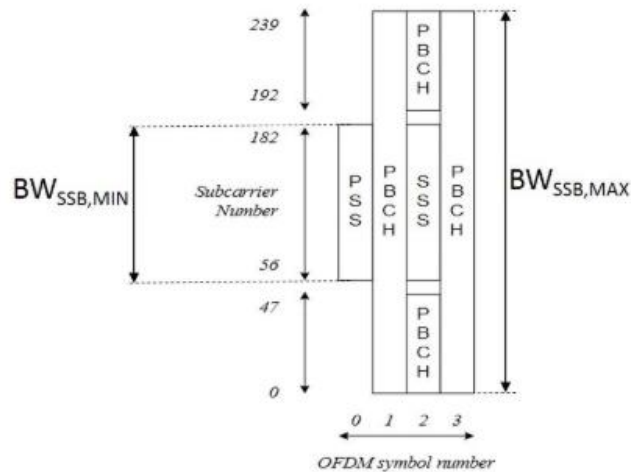
Metode procjene izloženosti elektromagnetskom zračenju za vremenski promjenjive signale mobilnih telekomunikacija oslanjale su se na mjerenje i naknadnu ekstrapolaciju signala neovisnih o korisniku koji se prenose kontinuirano (ili periodično) konstantnom snagom, neovisno o opterećenju prometa. Ti se signali razlikuju od jedne telekomunikacijske tehnologije do druge, pa se koriste *Broadcast Control Channel* (BCCH) za GSM, *Common Pilot Channel* (CPICH) za UMTS i *Cell Specific Reference Signal* (CRS), sinkronizacijski signali (SS) i fizički kanal za emitiranje (PBCH) za LTE [15]. U slučaju NR nema CRS-a, ali komponente signala koje su „uvijek uključene“ su, kao i u LTE-u, primarni i sekundarni sinkronizacijski signali (PSS i SSS) i PBCH. PSS i SSS koriste se od strane

korisničkih uređaja za pronalaženje, identifikaciju i sinkronizaciju s mrežom, dok PBCH sadrži minimalnu količinu informacija o sustavu. Zajedno ti signali čine SS/PBCH blok (također označen kao SS blok ili SSB) [15].

U prethodnim generacijama mobilnih tehnologija korišteni su sinkronizacijski i referentni signali specifični za ćeliju. Referentni signali koji su uvijek uključeni bili su raspoređeni preko cijelog spektra za preciznu procjenu kanala. 5G NR predstavlja potpuno novi pristup u pogledu signala specifičnih za ćeliju [14]. 5G NR emitira samo minimalnu količinu signala specifičnih za ćeliju s poznatim slijedom koji se mogu mjeriti kalibriranim mjernim prijemnim uređajem. Svi ostali signali su specifični za korisničku opremu (engl. *User Equipment*, UE) i njihova se pojava u frekvencijskoj i vremenskoj domeni odnosi na promet podataka [14].

Kao i 4G LTE, 5G NR podržava korištenje FDD (engl. *Frequency Division Duplexing*) i TDD (engl. *Time Division Duplexing*) za ostvarivanje dvosmjerne komunikacije između bazne i mobilne postaje, a signali su modulirani korištenjem metode višestrukog pristupa OFDM (engl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) s cikličkim prefiksom [15]. Osim toga, 5G NR koristi mrežnu strukturu koja se sastoji od podnosilaca u frekvencijskoj domeni i OFDM simbola u vremenskoj domeni. Osnovna granularnost mreže resursa 5G NR (u frekvenciji i vremenu) je resursni element (engl. *resource element*, RE), koji obuhvaća jedan OFDM simbol u vremenu i jedan podnosilac u frekvenciji [15]. U frekvencijskoj domeni mrežna struktura je dalje organizirana u resursne blokove (RB-ove), pri čemu se svaki RB sastoji od dvanaest susjednih podnosilaca. Ukupan broj resursnih blokova dostupnih za prijenos podataka (N_{RB}) ovisi o širini kanala (do 100 MHz za signale ispod 6 GHz) i numerologiji ili razmaku podnosilaca (engl. *subcarrier spacing*, SCS), koji iznosi 15 kHz, 30 kHz ili 60 kHz za signale ispod 6 GHz [15]. Ovdje je vidljiva razlika u odnosu na LTE, gdje je SCS fiksiran na 15 kHz, a širina pojasa na do 20 MHz. U vremenskoj domeni struktura je organizirana u okvire. Radio okvir 5G NR-a traje 10 ms i sastoji se od deset podokvira od po 1 ms. Podokvir je dalje podijeljen na slotove, pri čemu svaki sadrži 14 (u slučaju normalnog cikličkog prefiksa) ili 12 OFDM simbola (u slučaju produženog cikličkog prefiksa). Broj slotova i trajanje simbola ovise o SCS-u. Na primjer, u slučaju SCS-a od 30 kHz, podokvir se sastoji od dva slotova, a trajanje simbola je 35,68 μ s. Analogno RB-u u frekvencijskoj domeni, slot je osnovna jedinica prijenosa u vremenskoj domeni [15].

SS/PBCH blok koji se sastoji od komponenti signala konstantne snage u 5G NR-u proteže se preko četiri OFDM simbola u vremenskom domeni i 240 susjednih podnosilaca, odnosno 12 RB-ova u frekvencijskoj domeni kako je prikazano na slici 3.4. [15].



Slika 3.4. Struktura SS/PBCH bloka u vremenu i frekvenciji, s naznakom minimalne ($BW_{SSB,min}$) i maksimalne širine pojasa ($BW_{SSB,max}$) [15].

Za razliku od ekvivalentnih signala u LTE-u, u 5G NR-u SSB (engl. *Synchronization Signal Block*) nije fiksiran na središnju frekvenciju radio kanala već je njegova pozicija (označena kao SS_{REF}) određena vrijednošću globalnog kanala za sinkronizaciju rastera (engl. *Global Synchronization Raster Channel*, GSCN), koji ga postavlja na diskretni raster [15]. Nadalje, dok se u 4G LTE-u sinkronizacijski signali prenose preko cijele ćelije, 5G NR sustavi mogu primijeniti oblikovanje snopova pri čemu bazna stanica ponavljano prenosi SSB u nekoliko unaprijed definiranih smjerova (ili zraka) u SS burstu ili SS burst setu (uzastopni SS burstovi). SS burst (set) se prenosi u redovitim vremenskim intervalima, koji mogu biti 5, 10, 20, 40, 80 ili 160 ms (s zadanim intervalom od 20 ms), unutar raspona od pola okvira (5 ms) [15].

3.3. Izloženost 5G zračenju

Razina izloženosti na evaluacijskoj točki u vidom polju bazne stanice 5G NR ima maksimalnu vrijednost kada je opterećenje prometa na svom maksimumu (tj. kada je 5G NR okvir potpuno ispunjen podacima u silaznoj vezi) i sav promet se prenosi s maksimalnim mogućim pojačanjem G_{max}

u smjeru evaluacijske točke [15]. Tada, kako bi se dobila najgora (teoretski maksimalna) razina izloženosti elektromagnetskom zračenju E_{max} , jakost električnog polja po resursnom elementu dominantne SSB zrake ($E_{RE,SSB}$) dobiva se na temelju širine kanala i radijacijskog uzorka prometne zrake:

$$E_{max} = \sqrt{\alpha} \sqrt{12N_{RB}} E_{RE,SSB} \quad (3-1)$$

gdje je N_{RB} broj resursnih blokova dostupnih unutar širine 5G NR kanala (npr. 273 za signal sa SCS-om od 30 kHz i širinom pojasa od 100 MHz), i

$$\alpha = \frac{G_{max}}{G_{SSB}} \quad (3-2)$$

je omjer G_{max} u odnosu na pojačanje dominantnog SSB-a, G_{SSB} . Ovaj se omjer izračunava iz dijagrama zračenja bazne postaje. [15].

Budući da se ovdje pretpostavlja da je radio okvir potpuno zauzet prometom silazne veze i podacima o emitiranju/kontroli koji se kontinuirano prenose s najvećim mogućim pojačanjem u smjeru evaluacijske točke, E_{max} predstavlja nerealističnu precijenjenost razine izloženosti. Iako bi ova vrijednost mogla biti korisna za prethodne tehnologije u stvarnosti zbog povećane promjenjivosti korištenja u prostoru i vremenu nerealno je očekivati da bazna stanica 5G NR emitira svojom maksimalnom snagom i koncentrira svu svoju snagu u jedan snop tijekom dužeg vremena (npr. 6 minuta, što je prosječno vrijeme prema ICNIRP smjernicama) [15]. Uzimajući u obzir dodatne faktore kao što su iskorištenost bazne stanice, prostorna distribucija energije tijekom određenog vremena, kao i radni ciklus prijenosa silaznom vezom (u slučaju TDD-a), može se izračunati realističnija, stvarna maksimalna razina izloženosti [15].

4. METODE MJERENJA 5G SUSTAVA

S uvođenjem New Radio (NR) kao tehnologije u 5G mobilne telekomunikacijske mreže bilo je potrebno razviti referentnu metodu za mjerenje razina polja NR instalacija u unutarnjim i vanjskim okruženjima. Zahtjevi za takvu metodu mjerenja su bili:

- Metoda treba biti robusna i praktična,
- Mora dati što točnije rezultate izbjegavajući prekomjerno ili nedovoljno procjenjivanje jakosti električnog polja,
- Mora uzimati u obzir značajke usmjeravanja snopa 5G tehnologije,
- Mora biti u skladu s prethodnim preporukama za mjerenje,
- Mora biti primjenjiva na FDD kao i na TDD načine rada [16].

Dvije temeljno različite metode koje ispunjavaju gore navedene zahtjeve mjerenja s nekoliko prednosti i nedostataka su: kodno selektivna i frekvencijski selektivna metoda. Frekvencijsko selektivni mjerni postupci temelje se isključivo na mjerenjima spektra snage. Za razliku od kodno selektivnog postupka, primljeni signali se niti dekodiraju niti dodjeljuju određenoj tehnologiji, operatoru ili ćeliji, te se uzimaju u obzir specifična snaga signala i smetnje [16]. Ova metoda je definitivno najbliža u određivanju ukupne primljene snage na određenom mjestu, ali postoje neki praktični razlozi koji čine ovu metodu manje privlačnom od kodno selektivnih mjerenja.

Koji se postupak primjenjuje ovisi o propisima specifičnim za pojedinu zemlju koje u većini slučajeva definiraju savezni instituti ili slične organizacije. U nastavku su objašnjene obje metode prema [16].

4.1. Kodno selektivna metoda

Kodno selektivna metoda se temelji na određivanju zračenog polja koje proizvodi sekundarni sinkronizacijski signal (SSS) silazne veze fizičkog kanala za emitiranje (PBCH). Potrebno je odrediti identitet snopa SS/PBCH (indeks bloka SS/PBCH). SSS je dio blokova SS/PBCH koji su raspoređeni preko širine pojasa od 3,6 MHz do 7,2 MHz (za prijenosne frekvencije do 6 GHz) unutar NR silazne veze [16]. SSS zauzima širinu pojasa od 1,905 MHz ili 3,810 MHz (127 resursnih elemenata). Blok SS/PBCH nije centriran s prijenosnom frekvencijom silazne veze. Svaki SS/PBCH blok zauzima skup od četiri uzastopna OFDM simbola. SS/PBCH blok sadrži referentni signal za demodulaciju (DM-RS). DM-RS resursni elementi SS/PBCH bloka nose informacije o broju identiteta ćelije (od 0 do 1007) kao i o identitetu snopa SS/PBCH (indeks bloka SS/PBCH). Mjerenje SSS-a, kao i dekodiranje

DM-RS signala zahtijeva kodno-selektivnu sondu za polje, mjerni prijemnik ili analizator spektra sposoban za dekodiranje NR signala i određivanje njihove snage [16]. Širina pojasa mjerne opreme za mjerenje SSS-a nije specificirana, ali mora pokriti ukupnu širinu pojasa SSS-a silazne veze. Širina pojasa SSS signala je $127 \cdot \Delta f$, dok SS/PBCH blok ima širinu pojasa od $240 \cdot \Delta f$, gdje je Δf razmak podnosilaca PBCH bloka. Razmak podnosilaca može biti 15 kHz, 30 kHz i 60 kHz za prijenosne frekvencije do 6 GHz. Razmaci podnosilaca od 120 kHz i 240 kHz namijenjeni su za prijenosne frekvencije iznad 24 GHz [16].

Mjerenje se provodi na sljedeći način: za svaku NR ćeliju i moraju se identificirati svi mjerljivi SS/PBCH blokovi u smislu njihovog broja ćelije i i indeksa SS/PBCH bloka j (dobiven demodulacijom DM-RS signala). Svaki SS/PBCH blok s indeksom j odgovara PBCH snopu antene. Za svaki SS/PBCH blok (identificiran indeksom j) mjeri se jakost električnog polja $E_{RE,SSB}$ po resursnom elementu SSS-a [16]. Svi SS/PBCH blokovi prenose se unutar istog polu-okvira i može se pretpostaviti da se ovaj polu-okvir prenosi s periodom od 2 okvira, što znači svakih 20 ms. Prostorni maksimum se određuje tako da prijemna antena uzima u obzir [16]:

- Stojne valove u cijelom području mjerenja.
- Polarizaciju mjernih antena (prijemna antena).
- Orijentaciju (azimut i elevaciju) mjernih antena.

Također se moraju zadovoljiti sljedeći uvjeti mjerenja:

- Minimalna udaljenost do zidova, poda, stropa, namještaja i prozora: 50 cm.
- Visina iznad poda između 0,5 m i 1,75 m.

Prijemna antena korištena za mjerenja trebala bi biti malih dimenzija kako bi se lako koristila u zatvorenom prostoru [16].

Kako bi se dobio najgori scenarij, odnosno kako bi se izračunala najveća moguća razina zračenja električnog polja E_{max} , jakost električnog polja po resursnom elementu dominantnog SSB snopa računa se prema formuli (4-1).

$$E_{max} = E_{RE,SSB} \cdot K_i \quad (4-1)$$

Gdje je:

$E_{RE,SSB}$ - jakost električnog polja po resursnom elementu dominantnog SSB snopa [16].

K_i - globalni ekstrapolacijski faktor za ćeliju i koji se računa prema formuli (4-2).

Globalni ekstrapolacijski faktor K_i za ćeliju i računa se kao:

$$K_i = \sqrt{\alpha} \sqrt{12N_{RB}} \quad (4-2)$$

Gdje je:

$\sqrt{\alpha}$ - omjer maksimalnog pojačanja G_{max} i pojačanja dominantnog SSB-a G_{SSB} (3-2).

$\sqrt{12N_{RB}}$ - broj resursnih blokova dostupnih u 5G NR kanalu [16].

4.2. Frekvencijski selektivna metoda

Frekvencijski selektivna metoda izvedena je iz kodne metode i također se temelji na mjerenjima sekundarnog sinkronizacijskog signala (SSS). Frekvencijski selektivna mjerenja sinkronizacijskih signala zahtijevaju spektralni analizator s RMS detektorom, minimalni RBW (Resolution bandwidth) SS signala ($127 \cdot \Delta f$) i *max-hold* funkciju [16].

U frekvencijski selektivnoj metodi *max-hold* vrijednost polja $E_{MH,SSB}$ množi se s dva faktora:

$$E_{max} = E_{MH,SSB} \cdot \sqrt{\frac{1}{127}} \cdot K_i^{FSM} \quad (4-3)$$

$$E_{RE,SSB} = E_{MH,SSB} \cdot \sqrt{\frac{1}{127}} \quad (4-4)$$

Gdje je:

$E_{RE,SSB}$ - jakost električnog polja po resursnom elementu dominantnog SSB snopa.

$E_{MH,SSB}$ - *max-hold* vrijednost jakosti električnog polja izmjerenog preko cijele širine pojasa mjerenja (barem širene pojasa SSS) koja je postavljena na spektralnom analizatoru [16].

$\sqrt{\frac{1}{127}}$ - redukcijski faktor jakosti polja po resursnom elementu.

K_i^{FSM} - faktor frekvencijski selektivne metode. Definiran je kao $K_i^{FSM} = \sqrt{2}$ ako ćelija i ima više od jednog SS/PBCH snopa, ili kao $K_i^{FSM} = 1$ ako ćelija i ima samo jedan SS/PBCH snop. Ovdje se uzima u obzir činjenica da se električno polje proizvedeno zasebnim snopovima ne može izmjeriti pa se ne može zbrojiti kvadratno [16].

Postoji mogućnost mjerenja $E_{RE,SSB}$ -a signala korištenjem frekvencijski selektivne metode na način da se mjerenje ne provodi u cijelom mjernom opsegu, već u *zero-span* modu na središnjoj frekvenciji SSB signala prema predloženim mjernim postavkama prema [15]. Parametri mjerenja u tom slučaju za numerologiju 1, 30 kHz SCS su:

- Mjerenje se provodi u *zero span* modu
- Frekvencija mjerenja je jednaka središnjoj frekvenciji SS/PBCH bloka
- RBW = VBW (Video bandwidth) = 1 MHz
- *Sweep time* = 1.140 – 3.344 s
- Detecor: RMS
- *Max-hold* mod
- Trajanje mjerenja: 60 s.

Ova predložena metoda mjerenja će se koristiti za mjerenje u ovom radu.

Prilikom mjerenja frekvencijski selektivnom metodom treba uzeti u obzir sljedeće faktore:

- Središnja frekvencija mjernog instrumenta mora biti postavljena na središnju frekvenciju SS/PBCH bloka koja općenito ne odgovara središnjoj frekvenciji silazne veze NR kanala. Središnju frekvenciju SSS-a mora dati operater.
- Budući da spektralni analizator ne može razlikovati silaznu i uzlaznu vezu u TDD prijenosnom načinu važno je isključiti sve mobilne telefone u blizini mjernog sustava.

5. MJRENJE ZRAČENJA 5G SUSTAVA

Provedeno mjerenje u ovom radu temelji se na uputama iz literature [15]. Za mjerenje zračenja 5G-a u korištena su dva mjerna instrumenta: NARDA SRM-3006 s ugrađenim 5G NR dekoderom signala za mjerenje kodno selektivnom metodom i ROHDE & SCHWARZ FSH8 za mjerenje frekvencijski selektivnom metodom. Mjerni sustav se temelji na mjerenju naponskih signala tri ortogonalna smjera antene: U_x , U_y i U_z . Jakosti električnog polja se zatim određuju na temelju izmjerenih vrijednosti napona pomoću formule:

$$E_i = U_i \times AF, i = \{x, y, z\} \quad (5-1)$$

Efektivna vrijednost jakosti električnog polja zatim se izračuna pomoću formule:

$$E_{ef} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \cdot AF \quad (5-2)$$

Gdje AF označava faktor antene.

Kako bi se izbjegle pogreške zbog brzih promjena signala provedeno je mjerenje u trajanju od šest minuta s prosječnim vrijednostima. Mjerni sustav je kalibriran i kalibracija sustava ograničena je na određivanje faktora antene na diskretnim frekvencijama unutar mjernog raspona. Provedene su obje mjerne metode te su na kraju uspoređeni dobiveni rezultati.

5.1. Mjerenje kodno selektivnom metodom

Najprije je provedeno mjerenje kodno selektivnom metodom korištenjem NARDA SRM-3006 mjernog instrumenta s ugrađenim 5G NR dekoderom signala (Slika 5.1.). SRM-3006 (SRM = *Selective Radiation Meter*) iz Narda Safety Test Solutions je prijenosni, frekvencijski selektivni mjerni sustav za analizu sigurnosti i okolišna mjerenja u visokofrekventnim elektromagnetskim poljima u rasponu od 9 kHz do 6 GHz. Budući da je izravno digitalno uzorkovanje tako visokih frekvencija signala teško moguće, SRM-3006 koristi kombinaciju analogne i digitalne obrade signala. Pogodan je za mjerenje visokofrekventnih elektromagnetskih polja koje proizvode odašiljači za audio emitiranje (AM, FM, DAB), televiziju (analogna, digitalna), mobilne komunikacije (GSM, TETRA, UMTS, LTE, 5G NR), radar ili lokalne bežične sustave (npr. WLAN, DECT) [17]. Mjerenje je provedeno devet puta na istoj mjerenoj poziciji, te je određena srednja vrijednost svih mjerenja. Mjerna točka je na trećem katu (visina 9 metara), 1,5 metar od krova zgrade (ukupno 10,5 metara). Vremenski uvjeti tijekom mjerenja su bili sunčani s temperaturom zraka od 21°C i vlagom zraka od

42%. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 5.1. Posljednji redak u tablici 5.1. predstavlja srednju vrijednost svih devet provedenih mjerenja.



Slika 5.1. NARDA SRM-3006 mjerni sustav

Prije samog mjerenja bilo je potrebno odrediti centralnu frekvenciju SS/PBCH bloka koja u ovom slučaju iznosi 3511.2 MHz. Ostali parametri mjerenja su SCS=30 kHz, RBW (*Resolution bandwidth*) = 1MHz, VBW (*Video bandwidth*) = 1MHz, SWP time = 3.344 s.

Tablica 5.1. Rezultati mjerenja kodno selektivnom metodom (NARDA SRM-3006)

NARDA (CF=3511.2 MHz; SCS=30 KHz; RBW=1MHz; VBW=1 MHz; SWP time = 3.344 s; measurement duration 6 min)	
<i>Meas. No</i>	<i>E_m decode, dBμV/m</i>
1.	63.17
2.	63.79
3.	64.37
4.	64.69
5.	62.39
6.	65.13
7.	57.44
8.	63.90
9.	64.01
AVG	63.21

5.2. Mjerenje frekvencijski selektivnom metodom

Nakon toga provedeno je mjerenje frekvencijski selektivnom metodom korištenjem ROHDE & SCHWARZ FSH8 mjerenog uređaja (Slika 5.2.) na istoj lokaciji.



Slika 5.2. ROHDE & SCHWARZ FSH8 mjerna oprema

R&S FSH8 je spektralni analizator koji pruža najvažnije RF analize u rasponu frekvencija od 9 kHz do 8 GHz. Na primjer, može se koristiti za održavanje ili instalaciju odašiljačkih sustava, provjeru kabela i antena, procjenu kvalitete signala u emitiranju, radiokomunikacijama i servisima, mjerenje jakosti električnog polja ili u jednostavnim laboratorijskim primjenama [18]. Karakterizira ga visoka osjetljivost i niska mjerna nesigurnost (< 1 dB).

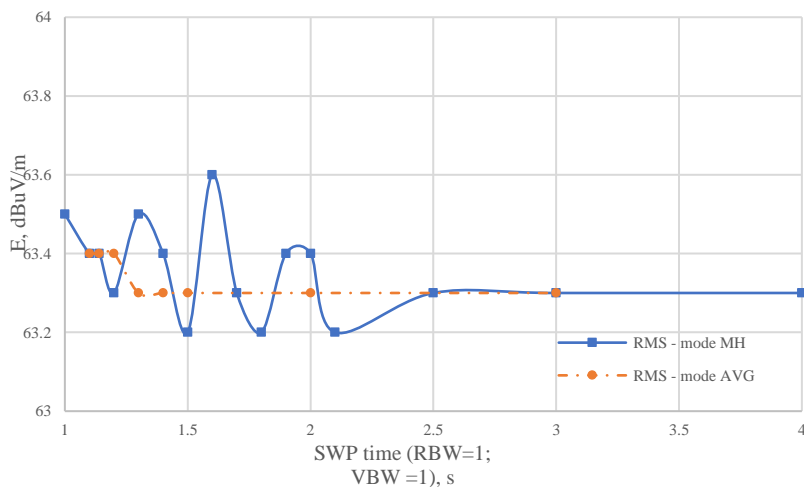
Vrijednosti parametara za ovo mjerenje postavljeni su prema uputama iz [15], dakle: korišten je *zero span mode*, frekvencija mjerenja je 3511.2 MHz, RBW = 1 MHz, VBW = 1 MHz, *sweep time* = 1.14 s, detektor: RMS, *max-hold* mod, vrijeme mjerenja: 60 s. Rezultati mjerenja frekvencijski selektivne metode prikazani su u tablici 5.2.

Tablica 5.2. rezultati mjerenja frekvencijski selektivnom metodom (ROHDE & SCHWARZ FSH8)

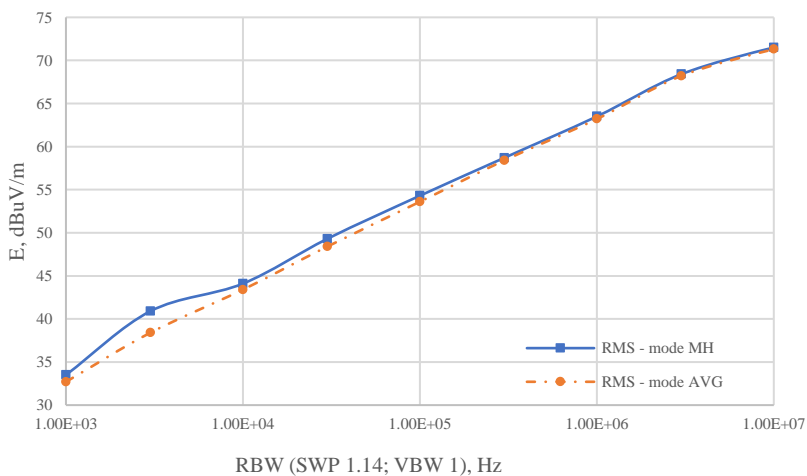
Meas. parameter	$E_{m,ref}$, dB μ V/m
SWP time MH	63.40
SWP time (AVG10)	63.40
RBW (MH)	63.50
RBW (AVG10)	63.20
VBW (MH)	63.50
VBW (AVG10)	63.20
Meas. time (MH, SWP=1.14 s)	63.70
Meas. time (AVG10, SWP=1.14 s)	63.60
AVG	63.44

Frekvencijski selektivno mjerenje je provedeno s promjenom različitih parametara mjerenja: RBW (Tablica 5.3.), VBW (Tablica 5.4.), SWEEP TIME (Tablica 5.5.) i trajanje mjerenja (Tablica 5.6.) s ciljem dobivanja uvida o utjecaju promjene parametara na same rezultate mjerenja pri čemu nam rezultati kodne metode predstavljaju referentne vrijednosti.

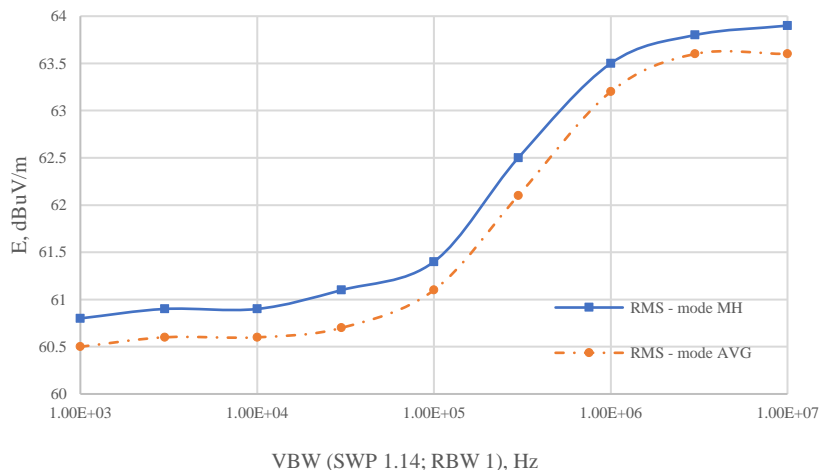
Jakosti električnog polja prikazane na slikama 5.3., 5.4. i 5.5. rezultat su mjerenja u dva različita moda: *Max-hold* (MH) i AVG. Izmjerene vrijednosti u MH modu trebale bi uvijek biti veće ili jednake izmjerenim srednjim vrijednostima, ali na slici 5.3. se može vidjeti da su dvije MH vrijednosti (plave točke) manje od AVG vrijednosti (crvene točke). Razlog tome je što se mjerenja ne mogu provesti istovremeno. Međutim, ovo odstupanje nema značajan utjecaj na ukupne rezultate.



Slika 5.3. Jakosti električnog polja u *zero span* modu s promjenom *sweep time*-a.

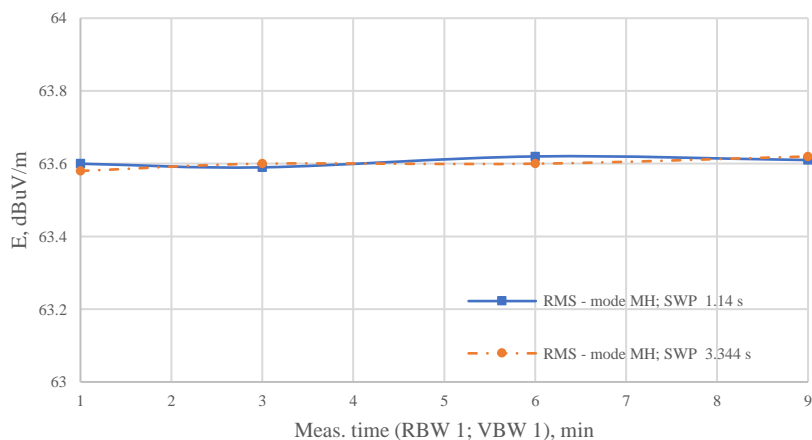


Slika 5.4. Jakosti električnog polja u *zero span* modu s promjenom RBW-a.

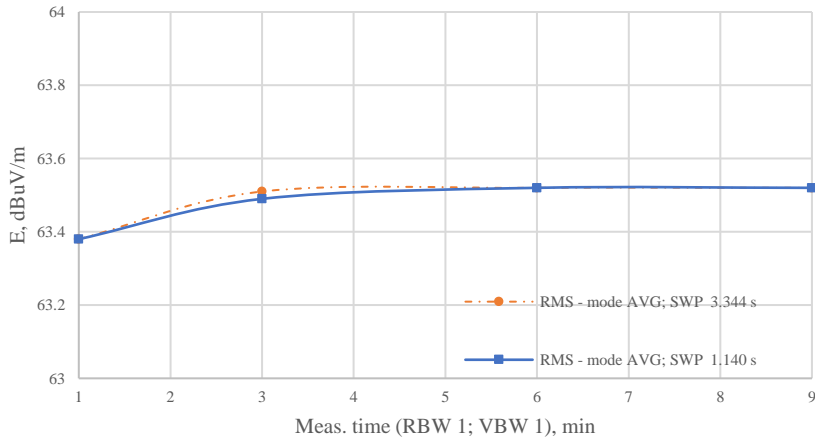


Slika 5.5. Jakosti električnog polja u *zero span* modu s promjenom VBW-a.

Kao bi se provjerio utjecaj trajanja mjerenja na rezultate provedena su mjerenja jakosti električnog polja u *nozero span* modu uz $VBW = 1.140$ i 3.344 s. Rezultati mjerenja sa promjenom trajanja mjerenja RMS/MH i RMS/AVG prikazani su na slikama 5.6. i 5.7. Na slikama se vidi da trajanje mjerenja nema nikakav utjecaj na rezultate niti u MH niti u AVG modu.



Slika 5.6. Jakost električnog polja u ovisnosti o trajanju mjerenja (RMS/MH).



Slika 5.7. Jakost električnog polja u ovisnosti o trajanju mjerenja (RMS/AVG).

Tablica 5.3. Izmjerene vrijednosti jakosti polja u *zero span* modu uz promjenu SWP vremena u rasponu od 1 – 4 s.

ZERO SPAN (VBW = 1MHz; RBW = 1 MHz; 6 min)								
Meas. parameter	Detector/ mode	SWP _{min} , s	SWP _{max} , s	E_{min} , dBµV/m	E_{max} , dBµV/m	SWP _{m,ref} , s	$E_{m,ref}$, dBµV/m	$\Delta E = E_{max} - E_{min}$, dB
SWP time (1-4 s)	RMS/MAXHOLD	1.50 and 1.80	1.60	63.20	63.60	1.14	63.40	0.40
	RMS/AVG10	All others	1.00; 1.10; 1.14 and 1.40	63.30	63.40	1.14	63.40	0.10

Tablica 5.4. Izmjerene vrijednosti jakosti polja u *zero span* modu uz promjenu RBW parametra u rasponu od 0.1 – 10 MHz.

ZERO SPAN (SWP time = 1.14 s; VBW = 1 MHz; 6 min)								
Meas. parameter	Detector/ mode	RBW _{min} , MHz	RBW _{max} , MHz	E_{min} , dBµV/m	E_{max} , dBµV/m	RBW _{m,ref} , MHz	$E_{m,ref}$, dBµV/m	$\Delta E = E_{max} - E_{min}$, dB
RBW (0.1-10MHz)	RMS/MAXHOLD	0.10	10	54.30	71.50	1	63.50	17.20
	RMS/AVG10	0.10	10	53.60	71.30	1	63.20	17.70

Tablica 5.5. Izmjerene vrijednosti jakosti polja u *zero span* modu uz promjenu VBW parametra u rasponu od 0.1 – 10 MHz.

ZERO SPAN (SWP time = 1.14 s; RBW = 1 MHz; 6 min)								
Meas. parameter	Detector/ mode	VBW _{min} , MHz	VBW _{max} , MHz	E_{min} , dB μ V/m	E_{max} , dB μ V/m	VBW _{m ref} , MHz	$E_{m,ref}$, dB μ V/m	$\Delta E = E_{max} - E_{min}$, dB
VBW (0.1-10 MHz)	RMS/MAXHOLD	0.10	10	61.40	63.90	1	63.50	2.50
	RMS/AVG10	0.10	10	61.10	63.60	1	63.20	2.50

Tablica 5.6. Izmjerene vrijednosti jakosti polja u *zero span* modu uz promjenu trajanja mjerenja u rasponu od 60 – 420 sekundi .

ZERO SPAN (VBW = 1 MHz; RBW = 1 MHz)								
Meas. parameter	Detector/ mode	Meas.t _{min} , s	Meas.t _{max} , s	E_{min} , dB μ V/m	E_{max} , dB μ V/m	Meas.t _{m,ref} , s	$E_{m,ref}$, dB μ V/m	$\Delta E = E_{max} - E_{min}$, dB
Meas. time (60-420 s)	RMS/MAXHOLD LD SWPtime=1.14 0s	180	360	63.50	63.70	6	63.70	0.20
	RMS/MAXHOLD LD SWPtime=3.34 4s	60	420	63.50	63.70	6	63.60	0.20
Meas. time (60-420 s)	RMS/AVG10 SWPtime=1.14 0s	60 and 120	420	63.50	63.70	6	63.60	0.20
	RMS/AVG10 SWPtime=3.34 4s	60	180, 360 and 420	63.50	63.60	6	63.60	0.10

5.3. Analiza rezultata mjerenja

Izmjerena jakost električnog polja korištenjem kodno selektivne metode iznosi 63.21 dB (Tablica 5.1), dok je korištenjem frekvencijski selektivne metode izmjerena jakost električnog polja jednaka 63.44 dB (Tablica 5.2.), što predstavlja razliku od 0.23 dB.

Ostala mjerenja pokazuju da parametar *sweep time* ima jako mali utjecaj na izmjerene vrijednosti jakosti električnog polja. Maksimalna razlika izmjerene vrijednosti polja je 0.40 dB (Tablica 5.3.).

Tablica 5.4. prikazuje utjecaj RBW parametra na jakost električnog polja. Na temelju rezultata vidljivo je da upravo ovaj parametar ima najveći utjecaj na dobivene rezultate mjerenja. Vidljiva je razlika od 17.20 dB.

Tablica 5.5. prikazuje utjecaj promjene VBW parametra na mjerne rezultate. Dobivena razlika iznosi 2.50 dB.

Vrijeme mjerenja u rasponu od 60 do 420 sekundi nema značajan utjecaj na dobivene rezultate jakosti polja u *zero span* modu. Najveća razlika, vidljiva u tablici 5.6., iznosi 0.20 dB.

Usporedbom jakosti električnog polja $E_{RE,SSB}$ izmjerenog s FSH8 R&S spektralnim analizatorom i NARDA SRM-3006 spektralnim analizatorom primjetno je odstupanje od 0,23 dB. Ovo odstupanje nije značajno, ali treba napomenuti da je razlika vrijednosti jakosti polja uzrokovana nesinkronim mjerenjem $E_{RE,SSB}$ -a. Zbog nesinkronog mjerenja jakosti polja pomoću dvije metode, uvjeti propagacije se mijenjaju tako da se rezultati mjerenja razlikuju.

Rezultati mjerenja s instrumentom R&S FSH8 jasno pokazuju da je najvažniji parametar koji značajno doprinosi razini jakosti električnog polja RBW.

Treba zaključiti da se mjerenje $E_{RE,SSB}$ -a može provesti korištenjem frekvencijski selektivne metode pomoću analizatora spektra u *zero span* modu i postavljanjem središnje frekvencije na središnju frekvenciju SS/PBCH bloka koju daje operator, uz pažljivo odabrane parametre mjernog sustava. Međutim, važno je napomenuti da spektralni analizator u TDD prijenosnom modu ne razlikuje uzlaznu i silaznu vezu, pa bi svi telefoni u blizini mjernog sustava trebali biti isključeni. Osim toga, ovom metodom se mjere doprinosi različitih okolnih ćelija, ali ne postoji mogućnost njihovog razdvajanja (nema dekodiranja ID-a ćelije), što može utjecati na konačni rezultat.

Treba naglasiti da u ovom radu nije provedeno naknadno procesiranje rezultata budući da nema utjecaja na rezultate dobivenih mjerenja.

6. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog diplomskog rada bio je objasniti i definirati osnovne metode mjerenja 5G sustava i na temelju tih metoda napraviti odgovarajuća mjerenja. Dvije osnovne metode koje se koriste u ovome radu su: kodno selektivna i frekvencijski selektivna metoda.

U radu su najprije objašnjene navedene metode, a zatim su uspješno provedena mjerenja korištenjem obje metode te je izveden zaključak. Nakon provedenih mjerenja i obrade podataka zaključeno je da postoji razlika između dobivenih rezultata, ali je ta razlika vrlo mala. Potvrđena je prvobitna pretpostavka da RBW parametar postavki mjerenja ima najveći učinak na izmjerene vrijednosti električnog polja dok ostali parametri imaju puno manji utjecaj. Glavni uzrok razlike između dobivenih rezultata mjerenja ove dvije metode je taj što se mjerenja nisu provodila u isto vrijeme. Kako mjerenja nisu provedena u istom vremenu došlo je do promjene uvjeta propagacije elektromagnetskih valova pa tako i do razlike u izmjerenoj jakosti električnog polja.

Obje metode imaju svoje prednosti i nedostatke, ali možemo zaključiti da je kodna metoda ipak točnija jer frekvencijski selektivna metoda ima tendenciju precijeniti jakost električnog polja i također nema mogućnost razlikovanja različitih ćelija istog operatera. Dodatni nedostatak u našem slučaju je taj što spektralni analizator u TDD prijenosnom modu ne razlikuje uzlaznu i silaznu vezu pa bi svi telefoni u blizini mjernog sustava trebali biti isključeni. Osim toga, ovom metodom se mjere doprinosi različitih okolnih ćelija, ali ne postoji mogućnost njihovog razdvajanja, što može utjecati na konačni rezultat.

Kako se mobilne tehnologije neprestano razvijaju, a zabrinutost za štetne učinke elektromagnetskih polja nikada nije bila veća, već će u bliskoj budućnosti nastati potreba za razvojem novih metoda mjerenja koje će biti točnije i preciznije od postojećih. Upravo bi ove dvije metode mogle poslužiti kao osnova za razvoj novih rješenja po pitanju mjerenja u mobilnim komunikacijama.

LITERATURA

- [1] M. Attaran, The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 14, pp 5977-5993, veljača 2021.
- [2] K. Sundhar, L.C. Miller, *5G For Dummies*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2017.
- [3] R. Frenkiel, *A Brief History of Mobile Communications*, Rutgers, The State University of New Jersey, dostupno na:
https://www.winlab.rutgers.edu/~narayan/Course/Wireless_Revolution/vts%20article.pdf
[02.03.2024.]
- [4] Mobile Phone Museum, MOTOROLA DYNATAC 8000X, Mobile Phone Museum, dostupno na : <https://www.mobilephonemuseum.com/phone-detail/dynatac-8000x>
[02.03.2024.]
- [5] H. Hodara, E. Skaljo, *From 1G to 5G, Fiber and Integrated Optics*, Vol. 40, pp 85-183, Prosinac 2021.
- [6] Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Zavod za komunikacije, Mobilne komunikacije – predavanje "Celularni (ćelijski) koncept" [Moodle], Sveučilišni računski centar Sveučilišta u Zagrebu (Srce), dostupno na:
https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7632707/mod_resource/content/8/Predavanja/10.%20Celularni%20koncept.pdf [03.03.2024.]
- [7] S. Rockman, *Why 2G wants to live forever*, Cambridge Wireless, 14.02.2022., dostupno na:
<https://www.cambridgewireless.co.uk/news/cw-journal/why-2g-wants-live-forever/>,
[03.03.2024.]
- [8] Ericsson, *5G by Ericsson*, Ericsson, dostupno na: <https://www.ericsson.com/en/5g>,
[04.03.2024.]

- [9] Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Zavod za komunikacije, Mobilne komunikacije – predavanje "5G mobilne mreže" [Moodle], Sveučilišni računski centar Sveučilišta u Zagrebu (Srce), dostupno na:
https://moodle.srce.hr/2022-2023/pluginfile.php/7632723/mod_resource/content/8/22_5G_2021%20web.pdf,
[05.03.2024.]
- [10] U. Roth, L. Selmane, S. Fayem, Measuring the EMF Exposure From Mobile Network Antennas: Experience From Luxembourg, in IEEE Access, Vol. 12, pp. 57688-57710, 2024.
- [11] C. Törnevik, D. Colombi, Accurately assessing exposure to radio frequency electromagnetic fields from 5G networks, Ericsson White Paper, listopad 2021.
- [12] A. Fellan, C. Hobelsberger, C. Schellenberger, D. Lindenschmitt, H. D. Schotten, Electromagnetic Field Strength Measurements in a Private 5G Campus Network, In Proceedings of the 18th ACM International Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks (Q2SWinet '22), 24–28 listopad, 2022, Montreal, QC, Canada. ACM, New York, NY, USA.
- [13] ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, objavljeno u HEALTH PHYS 118(5): 483–524; 2020, dostupno na:
<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf>, [18.04.2024.]
- [14] M. Mielke, EMF MEASUREMENTS IN 5G NR, Rohde&Schwarz, white paper, svibanj 2020., 2020 Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG.
- [15] S. Aerts, L. Verloock, M. Van Den Bossche, D. Colombi, L. Martens, C. Tornevik, W. Joseph, In-situ Measurement Methodology for the Assessment of 5G NR Massive MIMO Base Station Exposure at Sub-6 GHz Frequencies, IEEE Access, Vol. 7, pp. 184658-184667, prosinac 2019.
- [16] Technical Report: Measurement Method for 5G NR Base Stations up to 6 GHz, Federal Institute of Metrology METAS, veljača 2020.

[17] Narda Safety Test Solutions, SRM-3006 - frequency-selective EMF measurement up to 29.5 GHz, Narda Safety Test Solutions, dostupno na:

<https://www.narda-sts.com/en/products/emf-selective-measuring-devices/srm-3006/>, [21.06.2024.]

[18] Rohde & Schwarz, R&S®FSH Handheld spectrum analyzer, Rohde & Schwarz, dostupno na: <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/Rohde-Schwarz-FSH8-Datasheet.pdf>

[21.06.2024.]

SAŽETAK

Razvoj mobilnih komunikacija zahtijeva razvijanje i definiranje mjernih metoda koje će što točnije i preciznije dati rezultate mjerenja. Zadatak ovog diplomskog rada bio je objasniti i definirati osnovne metode mjerenja 5G sustava i na temelju tih metoda napraviti odgovarajuća mjerenja. U ovom radu objašnjene se dvije takve metode za mjerenje razine elektromagnetskog zračenja 5G sustava - kodno selektivna i frekvencijski selektivna metoda. Obje metode su najprije teorijski izložene, a zatim testirane. Nakon testiranja obrađeni su dobiveni rezultati i definiran je zaključak. Obje metode su korisne, ali je kodno selektivna metoda istaknuta kao bolji pristup za dobivanje cjelovitijeg rezultata mjerenja jer obuhvaća više parametara pa je samim time točnija. Navedene metode mogu poslužiti kao osnova za razvoj preciznijih metoda.

Ključne riječi: mobilne komunikacije, mjerne metode, 5G

ABSTRACT

5G system measurement methods

The development of mobile communications requires the development and definition of measurement methods that will provide the most accurate and precise measurement results. The task of this thesis was to explain and define the basic measurement methods for 5G systems and to conduct appropriate measurements based on these methods. In this thesis, two such methods for measuring the level of electromagnetic radiation of 5G systems are explained - the code-selective and frequency-selective methods. Both methods are first theoretically presented and then tested. After testing, the obtained results were processed, and a conclusion was defined. Both methods are useful, but the code-selective method is highlighted as a better approach for obtaining more comprehensive measurement results because it encompasses more parameters and is therefore more accurate. These methods can serve as a basis for the development of more precise methods.

Keywords: mobile communications, measurement methods, 5G

ŽIVOTOPIS

Josip Ilakovac rođen je 23. rujna 1999. godine u Slavonskom Brodu. Pohađao je Osnovnu školu Ivan Filipović u Velikoj Kopanici i nakon osnovne škole upisuje Tehničku školu Slavonski Brod. Nakon završene srednje škole, 2018. godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, te se opredjeljuje za smjer Komunikacije i informatika. U rujnu 2021. godine završava preddiplomski studij i upisuje sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, smjer Komunikacije i informatika, izborni blok Mrežne tehnologije na istom fakultetu.