

Određivanje snage signala na mjestu prijama u urbanom okruženju

Bićanić, Petar Krešimir

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:511078>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-08**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Petar Krešimir Bićanić

**ODREĐIVANJE SNAGE SIGNALA NA MJESTU PRIJAMA U
URBANOM OKRUŽENJU**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2024.

Zagreb, 21. ožujka 2023.

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

ZAVRŠNI ZADATAK br. 7095

Pristupnik: **Petar Krešimir Bičanić (0135235232)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Informacijsko-komunikacijski promet**

Zadatak: **Određivanje snage signala na mjestu prijama u urbanom okruženju**

Opis zadatka:

Opisati načine širenja elektromagnetskog vala s obzirom na frekvenciju i vrste prepreka kakve se mogu naći u urbanom okruženju. Objasniti način formiranja grozdova ćelija i ograničenja s obzirom na ponovnu uporabu istog frekvencijskog pojasa u susjednim grozdovima. Navesti najčešće korištene propagacijske modele elektromagnetskih valova. Navesti načine mjerenja i potrebnu instrumentaciju za mjerenje jačine signala. Dati primjere aplikativnih rješenja koja se koriste za projektiranje mreže s obzirom na pokrivenost dovoljnom razinom signala.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

izv. prof. dr. sc. Mario Muštra

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**ODREĐIVANJE SNAGE SIGNALA NA MJESTU PRIJAMA U
URBANOM OKRUŽENJU**

**DETERMINING SIGNAL STRENGTH AT THE POINT OF RECEPTION
IN URBAN ENVIRONMENT**

Mentor: izv.prof.dr.sc. Mario Muštra

Student: Petar Krešimir Bićanić

JMBAG: 0135235232

Zagreb, svibanj 2024.

SAŽETAK

Cilj ovog rada je analiza jačine signala mobilne mreže u urbanom okruženju, uzimajući u obzir utjecaj različitih prepreka na širenje elektromagnetskih valova. Opisana su svojstva elektromagnetskih valova te njihova primjena u pokretnim komunikacijama. Obrazloženi su načini širenja valova s obzirom na frekvenciju i prepreke. Uz kratki osvrt o propagaciji elektromagnetskih valova, navedeni su i opisani propagacijski modeli. U praktičnom dijelu rada su izvršena mjerenja razine prijamnog signala u urbanom području mobilnim uređajem te odabranim aplikativnim rješenjima. Rezultati mjerenja prikazani su na kraju rada ilustracijama i grafikonima.

Ključne riječi: elektromagnetski val, propagacija, propagacijski modeli, frekvencija.

SUMMARY

The aim of this thesis is to analyse the signal strength of the mobile network in urban environment, considering the influence of various obstacles on the propagation of electromagnetic waves. Here are described performance of electromagnetic waves and their appliance in mobile communications. Here are also briefly explained the way of wave propagation in view of frequency and obstacles. Along with a brief overview of the propagation of electromagnetic waves, propagation models are also listed and described. A practical part consists of the signal reception measurements which were made using a mobile device and a chosen application solution in the urban area. The results of the measurements are presented at the end of the thesis with illustrative and graphic displays.

Keywords: electromagnetic waves, propagation, propagation models, frequency

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Priroda širenja elektromagnetskih valova s obzirom na prepreke.....	2
2.1. Definicija i svojstva elektromagnetskih valova.....	2
2.2. Načini širenja elektromagnetskog vala s obzirom na frekvenciju.....	5
2.3. Korištenje elektromagnetskih valova u pokretnim telekomunikacijama	6
2.4. Širenje elektromagnetskog vala s obzirom na prepreke u urbanom okruženju.....	10
3. Propagacijski modeli elektromagnetskih valova	12
3.1. Propagacija elektromagnetskih valova	12
3.2. Propagacijski modeli	13
4. Čelijski sustavi	17
4.1. Čelije u sustavu pokretnih komunikacija	17
4.2. Projektiranje rasporeda ćelija	17
5. Instrumenti za mjerenje jačine signala	19
5.1. Mjerenje jačine signala.....	19
5.2. Performanse odabranog sustava za mjerenje.....	19
5.3. Očekivana točnost i ograničenja mjerenja.....	22
6. Aplikativna rješenja za mjerenje signala u određenom području	23
7. Zaključak	27
Popis literature.....	28
Popis grafičkih prikaza	29

1. Uvod

Predmet rada je prikaz mjerenja jačine snage signala na mjestu prijama u urbanom okruženju u kojem na širenje elektromagnetskih valova utječu specifične prepreke.

Rad se sastoji od sedam cjelina, kako slijedi:

1. Uvod
2. Priroda širenja elektromagnetskih valova s obzirom na prepreke
3. Propagacijski modeli elektromagnetskih valova
4. Čelijski sustavi
5. Instrumenti za mjerenje jačine signala
6. Aplikativna rješenja za mjerenje signala u određenom području
7. Zaključak.

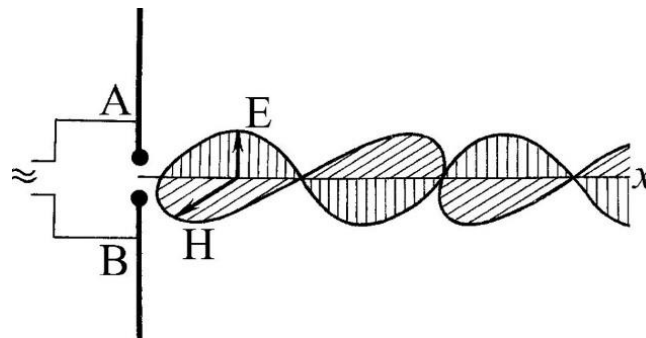
Nakon uvodnog poglavlja, u drugom poglavlju objašnjena je priroda širenja elektromagnetskih valova s obzirom na prepreke, odnosno, navedeni su definicija i svojstva elektromagnetskih valova, načini njihova širenja s obzirom na frekvenciju i obrazloženo je korištenje elektromagnetskih valova u pokretnim telekomunikacijama i širenju elektromagnetskog vala s obzirom na prepreke u urbanom okruženju. U trećem poglavlju navedeni su propagacijski modeli elektromagnetskih valova, odnosno, opisana je propagacija i navedeni su propagacijski modeli. U četvrtom poglavlju opisani su čelijski sustavi, točnije, ćelije u sustavu pokretnih komunikacija i projektiranje rasporeda ćelija. U petom poglavlju opisani su instrumenti za mjerenje jačine signala. U šestom poglavlju navedena su aplikativna rješenja za mjerenje signala u određenom području. Sedmo poglavlje donosi zaključak.

Motivacija za odabir ove teme jest prije svega snažan razvoj tehnologije pokretnih komunikacija. Također, riječ je o vrlo zanimljivoj tehnologiji koja obilježava gotovo sve aspekte našeg svakodnevnog života. Nadalje, dodatna motivacija je i činjenica da se teorija vezana za ovu problematiku može potkrijepiti mjerenjima koja su praktična i interesantna, te se mogu uspoređivati različite tehnologije (2G, 3G, 4G, 5G).

2. Priroda širenja elektromagnetskih valova s obzirom na prepreke

2.1. Definicija i svojstva elektromagnetskih valova

Elektromagnetski val je širenje međusobno povezanih i vremenski promjenljivih električnih i magnetskih polja kroz prostor. Širenjem elektromagnetskih valova kroz prostor širi se i energija, a to se naziva zračenjem [1]. Promjena jednog polja potiče promjenu drugog polja i tako se valovi šire. Ravnine titranja svih polja su okomite jedna na drugu i na smjer širenja vala pa su elektromagnetski valovi transverzalni. Elektromagnetski valovi mogu nastati iz različitih izvora. Izvor može biti titrajni električni strujni krug, titranje atoma i molekula i dr. Kratki impulsi elektromagnetskih valova mogu nastati i prilikom iskrenja električnih instalacija, kada se događaju atmosferska izbijanja na Zemlji, eksplozije na Suncu i dr. [2]



Slika 1. Elektromagnetski valovi
(Hrvatska enciklopedija, 2024.)

Elektromagnetski valovi otkriveni su zahvaljujući ponajprije Michaelu Faradayu koji je 1831. uočio poveznicu između električnih i magnetskih polja, što se naziva elektromagnetskom indukcijom. Nakon toga je uslijedio razvoj elektrodinamike, za koji je zaslužan James Clerk Maxwell. On je 1864. postavio matematičke jednadžbe koje pokazuju kako promjene u električnom polju uzrokuju promjene u magnetskom polju i obrnuto. Te se jednadžbe nazivaju Maxwellovim jednadžbama. Maxwell je tim jednadžbama pokazao i da je svjetlost zapravo elektromagnetski val.

Proučavajući Maxwellove jednadžbe, George Francis Fitzgerald 1883. dolazi do zaključka da se elektromagnetski valovi mogu proizvesti oscilatornim izbijanjem električnoga kondenzatora.

Nakon toga je Heinrich Rudolf Hertz 1888. napravio radiovalove kojima je uspio prenijeti električnu energiju između strujnih krugova kojih nisu bili povezani žicom. Godine 1895. otkrivene su x-zrake, za što je zaslužan Wilhelm Conrad Röntgen, po kojem su i nazvane rendgenskim zrakama, odnosno po čemu je nastao termin rendgenskog zračenja. Tri godine kasnije Nikola Tesla je uz pomoć radiovalova izumio daljinsko upravljanje [2].

Elektromagnetski valovi opisuju se sljedećim parametrima [2]:

- frekvencijom
- brzinom širenja
- valnom duljinom
- refleksijom i refrakcijom
- prigušenjem.

Frekvencija elektromagnetskih valova (f) ovisi o frekvenciji titranja izvora i o brzini čestica koje imaju električni naboj. Brzina širenja elektromagnetskih valova u vakuumu je jednaka brzini svjetlosti, a prijenosom energije ista se ne gubi. Tvar u kojoj se elektromagnetski valovi šire utječe na brzinu širenja, stoga se valovi u materijalnom optičkom sredstvu odnosno vakuumu šire sporije, a u praznom okruženju brže. Valna duljina elektromagnetskoga vala ovisi o brzini širenja (v) i frekvenciji (f) kojom se mijenja polje, iz čega proizlazi sljedeća formula (1):

$$\lambda = v/f \quad (1)$$

Refleksija i refrakcija elektromagnetskih valova nastupaju kada se val nađe između dvaju optičkih sredstava pa se jednim dijelom reflektira u sredstvo iz kojeg dolazi, a drugim dijelom se prelama i nastavlja širiti u drugo sredstvo.

Totalna refleksija nastupa pri prelasku iz optički gušćeg sredstva u optički rjeđe sredstvo, odnosno povećanjem upadnog kuta do određenog iznosa (kut loma iznosi 90°). Ovo svojstvo elektromagnetskog vala koristi se u izradi valnih reflektora i u radu radara. Radijacijski tlak nastaje kada elektromagnetski val padne na plohu nekog sredstva, no energija koju taj val prenosi je veoma male gustoće pa je i tlak vrlo nizak. Prigušenje elektromagnetskog vala nastaje kada sredstvo u kojem se širi val pruža otpor, zbog čega val gubi energiju.

Ovisno o frekvenciji i valnoj duljini, razlikuje se više vrsta elektromagnetskih valova, a to su: gama-zračenje, rendgensko zračenje, ultraljubičasto zračenje, vidljiva svjetlost, infracrveno zračenje, mikrovalovi i radiovalovi. U sljedećoj tablici prikazane su vrijednosti frekvencije i valne duljine za svaku od navedenih vrsta.

Tablica 1. Vrste elektromagnetskih valova i frekvencija i valna duljina istih

Vrsta elektromagnetskih valova	Frekvencija	Valna duljina
Gama-zračenje	veća od $1,5 \cdot 10^{19}$ Hz	manja od 0,02 nm
Rendgensko zračenje	$3 \cdot 10^{19}$ Hz – $3 \cdot 10^{16}$ Hz	0,01 nm – 10 nm
Ultraljubičasto zračenje	$3 \cdot 10^{16}$ Hz – $7,5 \cdot 10^{14}$ Hz	10 nm – 400 nm
Vidljiva svjetlost	$7,7 \cdot 10^{14}$ Hz – $4 \cdot 10^{14}$ Hz	390 nm – 750 nm
Infracrveno zračenje	$4 \cdot 10^{14}$ Hz – $3 \cdot 10^{11}$ Hz	750 nm – 1 mm
Mikrovalovi	$3 \cdot 10^{11}$ Hz – $3 \cdot 10^8$ Hz	1 mm – 1 m
Radiovalovi	$3 \cdot 10^8$ Hz – 0,3 Hz	1 m – 100.000 km

(Hrvatska enciklopedija, 2024.)

Kada je riječ o prijenosu električne energije i signala, kroz električne vodove se elektromagnetski valovi šire brzinom manjom od brzine svjetlosti, odnosno ta brzina iznosi oko dvije trećine brzine u slobodnom prostoru, ovisno o svojstvima vodiča.

Za prijenos električne energije u području vrlo visokih frekvencija, koje imaju vrlo male valne duljine, koriste se valovodi, odnosno cijevi vodljivih stjenki. Elektromagnetskim valovima prenose se različite vrste signala na daljinu: između ostaloga u pokretnim telekomunikacijama [2].

U suvremenom dobu je, prema nekim procjenama, zračenje je čak od 100 do 200 puta jače nego prije stotinu godina. Elektromagnetska polja stvaraju brojni uređaji - dalekovodi, radari, odašiljači, električni vodovi, mobilni telefoni, televizori, računala, bežični internet, a posebno tome doprinose sve naprednije i različitije bežične tehnologije [3].

2.2. Načini širenja elektromagnetskog vala s obzirom na frekvenciju

Frekvencija elektromagnetskog vala je broj titraja u jedinici vremena, a izražava se u hercima (Hz). Kada elektromagnetski valovi djeluju na neku tvar, imaju svojstva čestice, odnosno javljaju se fotoni koji se opisuju kao čestice čija je energija usklađena s frekvencijom elektromagnetskog vala. Iz toga proizlazi da je energija (E) jednaka umnošku Planckove konstante (h) i frekvencije elektromagnetskog vala [2]. (Planckova konstanta je prirodna konstanta s pomoću koje je Max Planck 1900. postavio jednadžbu za zračenje crnoga tijela, količnik energije i frekvencije fotona. Planck je ovu vrijednost nazvao kvantom djelovanja. Prema Međunarodnom sustavu jedinica iz 2019., $h = 6,626\ 070\ 015 \cdot 10^{-34}$ J s) [4].

Kao što je već navedeno, frekvencija elektromagnetskih valova (f) ovisi o izvoru i ubrzanju čestica s električnim nabojem. Odnosno frekvencija elektromagnetskih valova povećava se paralelno s povećanjem ubrzanja čestica. Frekvencija elektromagnetskih valova ostaje ista kroz različita sredstva, no ovisno o okruženju, mijenjaju se valna duljina (λ) te brzina širenja vala (v).

Brzina širenja ovisi o relativnoj dielektričnoj permitivnosti (ϵ_r) i relativnoj magnetskoj permeabilnosti (μ_r) optičkoga sredstva u kojem se valovi šire, iz čega proizlazi sljedeća formula (2):

$$v=c/(\epsilon_r\mu_r)^{1/2} \quad (2)$$

Pritom c označava brzinu elektromagnetskog vala u vakuumu, v brzinu širenja u prostoru ispunjenom nekom tvari, a omjer između c i v se označava kao n i taj se omjer izražava formulom (3)

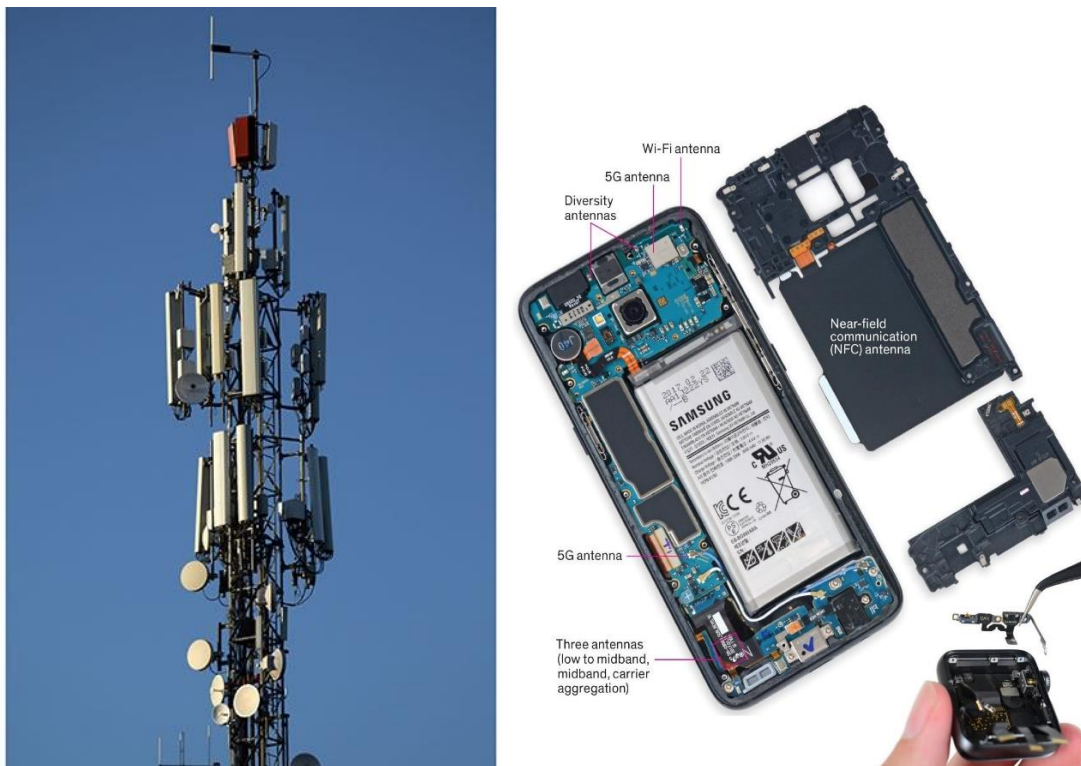
$$n = c/v \quad (3)$$

i definira kao indeks loma sredstva. [2]

Izvor iz kojega nastaju elektromagnetski valovi naziva se predajnikom, a val se širi prema prijammniku. Kada su usklađene frekvencije predajnika i prijammnika, elektromagnetski val se širi u prostoru. No, jednaka impedancija će omogućiti maksimalan prijenos energije, a da bi se komunikacija mogla ostvariti mora postojati informacija o frekvenciji na kojoj odašiljač šalje informaciju.

Antena, odnosno antenski sustav, dio je sustava pokretne mreže, njen podsustav, koji se sastoji od sljedećih ključnih dijelova:

- konektora
- kabela
- antene i
- raznih sklopova za prijenos signala koji mogu biti aktivni i pasivni.



Slika 2. Primjena dipola: telekomunikacijska antena i mobilni telefon
(Galović i Tuškan, 2021.)

2.3. Korištenje elektromagnetskih valova u pokretnim telekomunikacijama

Pokretne (mobilne) komunikacije (eng. *mobile communications*) jesu “komunikacijski sustavi koji radiovalovima omogućuju uspostavljanje veze s korisnicima na različitim mjestima ili u pokretu” [5]. Komunikacija može biti jednosmjerna ili dvosmjerna.

Pokretne komunikacije mogu se ostvarivati u simpleksnom, dupleksnom i poludupleksnom radu.

Simpleksni rad podrazumijeva da korisnik izmjenično prima i odašilje, dupleksni znači da korisnik istodobno prima i odašilje, a poludupleksni rad podrazumijeva istodobnu komunikaciju putem oba kanala, ali dopušta samo prijenos signala u jednom smjeru na jednom kanalu u određeno vrijeme. Stoga se može reći da je poludupleksna komunikacija isto što i simpleks komunikacija, ali s promjenjivim smjerovima. Poludupleks ili semidupleks je drugim riječima, način rada u mobilnim komunikacijama u kojem korisnik može ili samo govoriti ili samo slušati, ali se veza ostvaruje putem dvaju radiokanala. Odašiljač je uključen samo za vrijeme govora, čime se omogućuje ušteda energije. Između dviju osnovnih postaja koje imaju isti par kanala nema smetnja, jer su im odašiljačke i prijamne frekvencije različite. Zbog toga se postaje mogu više geografski približiti nego pri simpleksnom radu (s jednakom odašiljačkom i prijamnom frekvencijom), što omogućuje uštedu na potrebnom broju radiokanala. [5]

Sustavi pokretnih komunikacija u načelu se sastoje od bazne postaje s antenama koje su smještene na povišenom položaju i drugom opremom i uređajima koji omogućuju odašiljanje signala i upravljanje mrežom, uz iznimku koju čine sustavi izravnih komunikacija između uređaja.

Efikasnost sustava pokretnih komunikacija ovisi o prostornom i vremenskom koeficijentu. Osnovni dijelovi pokretnog telekomunikacijskoga sustava su nepokretna (stacionarna) bazna postaja i pokretna prijamna postaja (mobitel krajnjeg korisnika). Informacije se iz bazne postaje šalju radiovalovima uz pomoć neke od modulacijskih metoda koje omogućuju da se informacije pretvore u formu koja se može odašiljati.

Prijamna postaja (korisnik) može ostvariti vezu s baznom postajom samo unutar određenog područja, s obzirom na to da bazna postaja odašilje informaciju putem antene koja pokriva ograničeno područje. To područje koje antena pokriva jest ćelija.

U telekomunikacijama se koristi poseban dio elektromagnetskog spektra, a to je radiofrekvencijski spektar s frekvencijama i do 300 GHz, iako najčešće, ako govorimo o mobilnim komunikacijama, koriste se frekvencije između 800 MHz i 3800 MHz (na primjer, 5G je u Republici Hrvatskoj standardiziran u tri velika frekvencijska područja). Elektromagnetski valovi temelj su bežične komunikacije, odnosno bežične širokopolasne mobilne tehnologije i WiFi sustava, korištenja bežičnih mikrofona i kamera, inteligentnih prometnih sustava, komunikacijskih mreža za hitne službe, za funkcioniranje interneta stvari (*Internet of Things*), alarmnih sustava, telemedicine i dr. [6]

Ovisno o stupnju razvoja, generacije mreža pokretnih komunikacija su 1G, 2G, 3G, 4G i 5G. Mreža 1G odnosi se na analogne sustave za javne mreže, NMT (*Nordic Mobile Telephone*). Mreža 2G, odnosi se na digitalne sustave za prijenos govora i podataka, GSM (*Global System for Mobile Communication*) koji omogućuju i slanje kratkih poruka (SMS) te spajanje na internet. Ova se mreža uz manje zahvate nadograđuje na 2,5 G mrežu koja omogućuje veći protok podataka komutacijom paketa GPRS (*General Packet Radio Service*) Mreža 3G temelji se na prijenosu paketa brzinom do 21 Mbit/s, a planirana je kao svjetski sustav, neovisan o mjestu na Zemlji. [6].

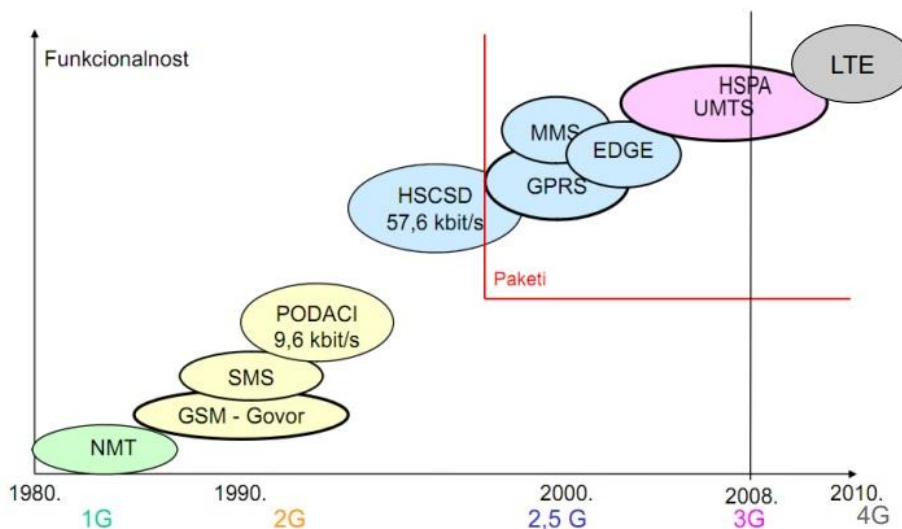
Mreža 4G (LTE, *Long Term Evolution*) omogućuje još bolju kvalitetu usluge i veću brzinu (standard 4G mreže je brzina od 100 Mbit/s).



Slika 3. Slikovni prikaz razvoja sustava mobilnih komunikacija od 1G do 5G mreže (Afrić, 2022.)

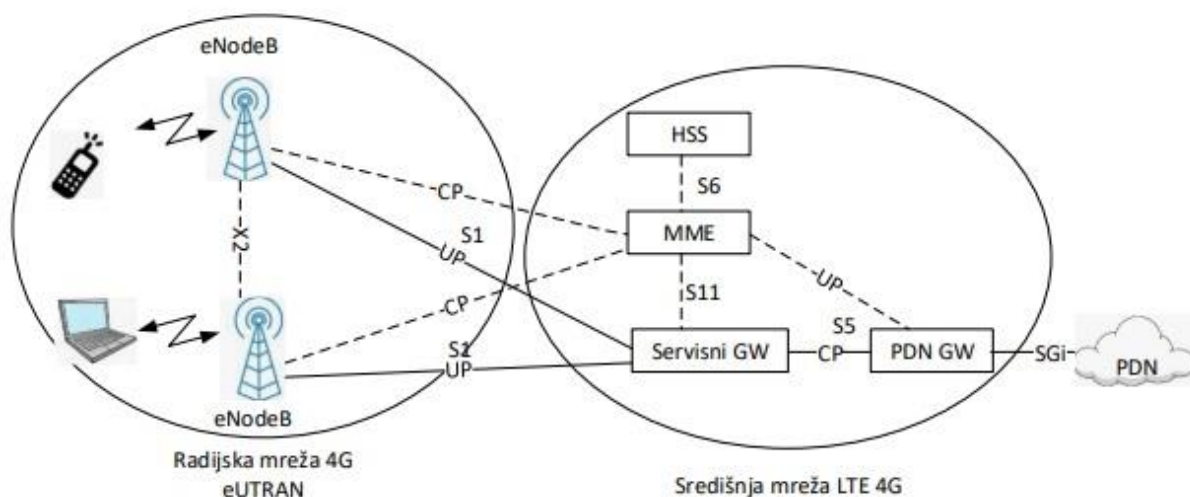
Mreža 5G je najnovija generacija širokopolasne mreže, dosad najbrža mreža kada je riječ o odzivu i brzini preuzimanja podataka. 5G mreža obrađuje podatke puno brže nego 4G mreža. Postavljanje odašiljača za ovu mrežu praktički je tek započelo pa ona još nije u potpunosti zamijenila 4G mrežu, koja se još uvijek koristi, kao i 3G i 4G LTE mreža.

Danas se uglavnom sve više koriste 4G i 5G mreže. 4G digitalni sustavi mobilnih komunikacija temelje se isključivo na paketnom spajanju korisničkih informacija, dok 5G digitalni sustavi imaju za cilj povećati kapacitete prijenosa informacija, konsolidirati sve komunikacijske potrebe i potpuno podržati IoT (*Internet of Things*). [7]



Slika 4. Evolucijski prikaz mobilnih mreža
(Hrvatski Telekom, 2023.)

Mreže 4G LTE podržavaju samo prijenos paketa, zbog čega u središnjoj mreži nestaje čvor MSC (mobilni komutacijski centar) koji je bio prisutan u 2G i 3G mrežama, a koristio je za kanalska prospajanja. “U radijskoj mreži 4G LTE koja se naziva eUTRAN, gdje oznaka „e“ znači *enhanced* (unaprijeđena ili poboljšana), ukinuta je funkcija područnog kontrolera (u 2G to je bio BSC, a u 3G RNC). Kako više nema područnog kontrolera, manji dio njegovih funkcija prelazi na baznu postaju koja sada nosi oznaku eNodeB, gdje oznaka „e“ znači *enhanced*, a veći dio funkcija prelazi na čvor koji se je u 2G i 3G označavao kao VLR. Sada primajući na sebe veći dio funkcija koji je obavljao područni kontroler, to postaje jedan od najvažnijih upravljačkih čvorova za upravljanje u mobilnoj mreži 4G i nosi novu oznaku MME (*Mobile Management Entity*). Kako bi se olakšao prijelaz između susjednih ćelija, susjedne ćelije (bazne postaje) povezane su novim signalizacijskim linkom X2 čija je osnovna funkcija dogovaranje prelaska iz ćelije u ćeliju.” [7]



Slika 5. Arhitektura mreže 4G LTE
(Afrić, 2022.)

Sustav 4G mreže ima puno jednostavniju strukturu nego sustav 3G mreže. Više je razloga za to, između ostaloga, pri konstrukciji 4G mreže odbačena je komutacija kanala i koristi se komutacija paketa. Također je smanjen broj čvorova, odnosno eliminiran je područni kontroler. Kada je u podatkovnoj mreži manji broj čvorova to doprinosi smanjenju kašnjenja signala, no, s druge strane, dovodi do promjena u organizaciji mreže. Naime, kada se ukine neki čvor, tada okruženje preuzima njegove funkcije te tako dolazi do promjena koje uzrokuju nadogradnju okolnih čvorova. [7]

2.4. Širenje elektromagnetskog vala s obzirom na prepreke u urbanom okruženju

Jedna od ključnih karakteristika elektromagnetskog vala je to što za njegovo širenje nije potreban medij, odnosno neko sredstvo ili tvar. No, sredstvo, odnosno, tvar koja ispunjava prostor ili se nalazi u prostoru kojim se širi elektromagnetski val aktivno sudjeluje u širenju elektromagnetskih valova. Kao što je spomenuto, dolazi do pružanja otpora od strane te tvari ili sredstva zbog čega se elektromagnetski val u tvarima/sredstvima kreće drugačijim brzinama, tj. sporije nego u vakuumu.

To uzrokuje promjenu smjera širenja valne fronte, primjerice kada val prolazi između različitih optičkih sredstava, dolazi do loma svjetlosti (elektromagnetskog vala), a taj lom ovisi

o duljini elektromagnetskog vala. Omjer brzine elektromagnetskog vala u vakuumu i brzina u prostoru ispunjenom nekim sredstvom ili tvari naziva se indeksom loma.

Na širenje elektromagnetskog vala imat će ključan utjecaj svojstvo tvari u prostoru, odnosno postojanje i razina električne provodljivosti neke tvari. Tvar koja je provodljiva uzrokovat će nastanak električne struje čime se prigušuje val.

Nadalje, kada se govori o širenju valova, vrlo je važno uzeti u obzir okolinu, ali i vegetaciju na određenom prostoru. U idealnim uvjetima gdje ne postoje prepreke, val bi ravnomjerno propagirao prostorom. Međutim, u objektivnim uvjetima, gdje nailazimo na razne reljefne nepravilnosti, to nije slučaj. Zgrade, drveća te drugi objekti uvelike mogu predstavljati problem prilikom širenja vala. Također, bitan faktor predstavljaju i sami materijali te njihova debljina. Na primjer, betonski zidovi mogu apsorbirati dio signala što može rezultirati slabijim signalom u neposrednoj blizini objekta ili unutar istog. Gubici koji nastaju zbog spomenutih prepreka u urbanom okruženju gdje su građevine gusto raspoređene svedeni su na minimum zbog unaprijed provedenog planiranja i projektiranja o čemu će više govora biti u nastavku rada.

3. Propagacijski modeli elektromagnetskih valova

3.1. Propagacija elektromagnetskih valova

Propagacija se definira kao “kretanje radiovalova kroz atmosferu i prelazak pomoću mehanizma valova izračene energije od odašiljačke antene do prijamne antene” [8].

Ključni čimbenici koji utječu na propagaciju, odnosno širenje signala, jesu [9]:

- atenuacija
- latencija
- hardverski uređaji na mreži
- topologija
- dizajn mreže.

Fizičke pojave koje dovode do slabljenja ili gubitka signala, odnosno prigušenja elektromagnetskog vala, mogu biti različite. Jedna od tih pojava je refleksija, odnosno odbijanje elektromagnetskog vala od površina koje mogu imati razna svojstva, no bitno je da su ona drugačija od onih koje ima materijal kojim je val putovao do tada. Neki materijali imaju veću, neki manju sposobnost refleksije, no u najvećem broju slučajeva val prolazi kroz materijal i pritom ima minimalne gubitke. Međutim, kada je riječ o većim udaljenostima, refleksija može uzrokovati gubitak signala, dok na manjem prostoru pomaže da signal, tako što se odbija od prepreke, dođe do odredišta. [9]

Druga pojava koja dovodi do slabljenja ili gubitka signala je refrakcije zbog koje val koji prolazi kroz materijal mijenja putanju pod drugačijim kutom. Zbog tog svojstva, pomoću refrakcije se može usmjeravati val, no cilj je ipak da se refrakcija smanji kako bi se sačuvala ključna obilježja vala, odnosno njegova cjelovitost i preciznost, odnosno kako bi se sačuvala informacija koju val prenosi. Širenje vala može biti ometano i apsorpcijom, odnosno prolaskom vala kroz neki materijal, odnosno prepreku. Ovisno o tome koliko je pojedini materijal gust, apsorpcija će biti veća ili manja. Gušći i deblji materijali imaju i veću mogućnost apsorpcije energije.

Prilikom širenja vala može doći do njegova raspršivanja, odnosno širenja u više smjerova koje se događa kada elektromagnetsko zračenje dođe do neravne površine. U svakodnevnom životu raspršivanje najčešće uzrokuje namještaj, okrugli objekti, biljke, kada je riječ, primjerice, o uredskom okruženju, dok u vanjskom okruženju to mogu biti metalni stupovi, krovovi i sl. [9]

3.2. Propagacijski modeli

Okumura-Hata model za propagaciju radio signala je zasigurno jedan od najpoznatijih i najkorištenijih modela za procjenu gubitaka na putu (eng. *path loss*) u bežičnim komunikacijama. Razvijen je u 1980-ima i temelji se na opsežnim istraživanjima izvedenim u Japanu. Model uzima u obzir različite faktore koji utječu na gubitke signala, kao što su frekvencija, visina antene, udaljenost između predajnika i prijamnika, te karakteristike okoline. Iako je Okumura-Hata popularan, važno je napomenuti da su se od tada pojavili i drugi modeli koji su dodatno razvijeni i prilagođeni različitim okruženjima i tehnologijama. Gušenje na putu PL (*Path loss*) u dB definiran je sljedećom formulom gdje faktori ovise o frekvenciji i visini antene [10]. Faktor se povećava s porastom frekvencije podnosioca, a smanjuje se s povećanjem visine bazne stanice (BS) i mobilne stanice (MS).

Okumurin model, iako stariji, i dalje je izuzetno koristan za predviđanje gubitaka prijenosa u bežičnim komunikacijama, posebno u velikim mobilnim ćelijama gdje su bazne stanice postavljene iznad okolnih krovova. Primjena ovog modela često se viđa u praksi zbog svoje pouzdanosti i jednostavnosti korištenja. Model uzima u obzir visinu bazne stanice i okruženje terena, što mu omogućuje da preciznije predvidi gubitke signala u takvim scenarijima. Poboljšani oblici Okumurinog modela uključuju razne korekcije i prilagodbe kako bi bolje odgovarali stvarnim uvjetima. Važno je napomenuti da Okumurin model ima svoje ograničenje u frekvencijskom rasponu do 3000 MHz i pretpostavlja da su odašiljač i prijamnik na otvorenom prostoru. Udaljenost između odašiljača i prijamnika može biti prilično velika, čak do 100 km, dok visina prijamnika može varirati od 3 m do 10 m. Ovaj model pruža vrijedne informacije inženjerima i planerima mreža kako bi bolje razumjeli očekivane performanse bežičnih sustava u različitim okruženjima i scenarijima. Gubitak putanje u Okumura modelu može se izračunati kao

$$PL[\text{dB}] = L_f + A_{mn}(f, d) - G(h_t) - G(h_r) - G_{\text{AREA}} \quad (3)$$

Ovdje je L_f gubitak na putu slobodnog prostora i izračunava se prema sljedećem izrazu:

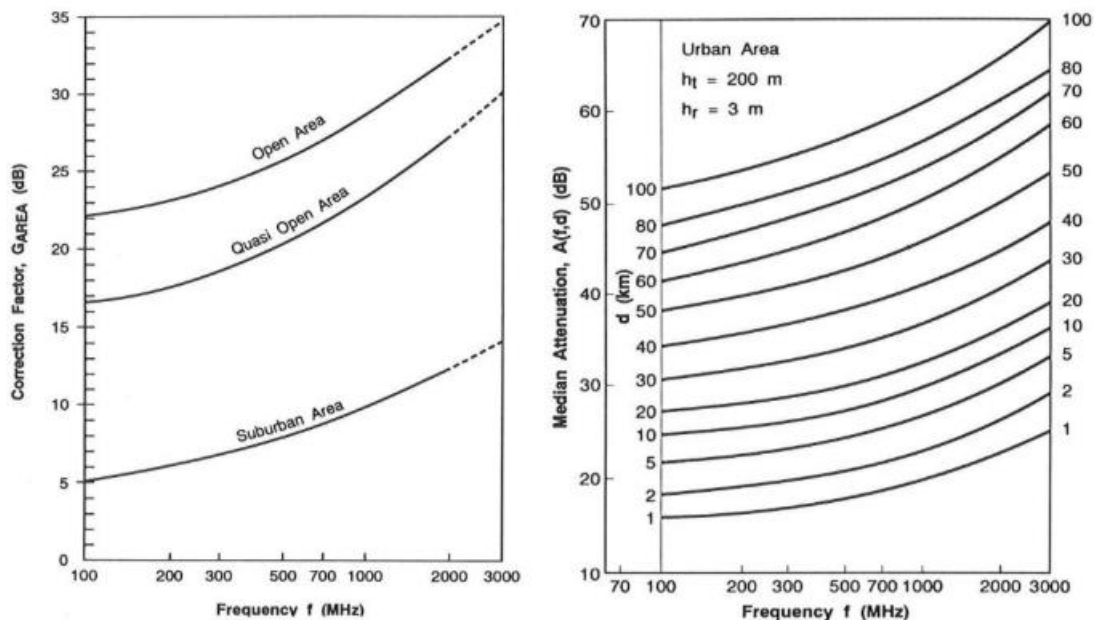
$$L_f = -20 \log \frac{\lambda}{4\pi d}, \quad (4)$$

pri čemu λ označava valnu duljinu signala, d udaljenost između odašiljača i prijamnika, dok su $G(h_t)$ i $G(h_r)$ faktor pojačanja BS antene odnosno faktor pojačanja prijamnika. Njihove formule su sljedeće:

$$G(h_t) = 20 \log \left(\frac{h_t}{200} \right) \quad (5)$$

$$G(h_r) = 10 \log \left(\frac{h_r}{3} \right) \quad (6)$$

gdje su h_t i h_r visine bazne stanice i prijamnika. $A_{mn}(f, d)$ naziva se srednjim faktorom prigušenja. Koriste se različite krivulje za srednji faktor prigušenja ovisno o frekvenciji i udaljenosti između odašiljača i prijamnika. Dobitak područja G_{AREA} ovisi o području koje se koristi, a njegov grafikon zajedno s srednjim faktorom prigušenja prikazan je na Slici 6 [11].

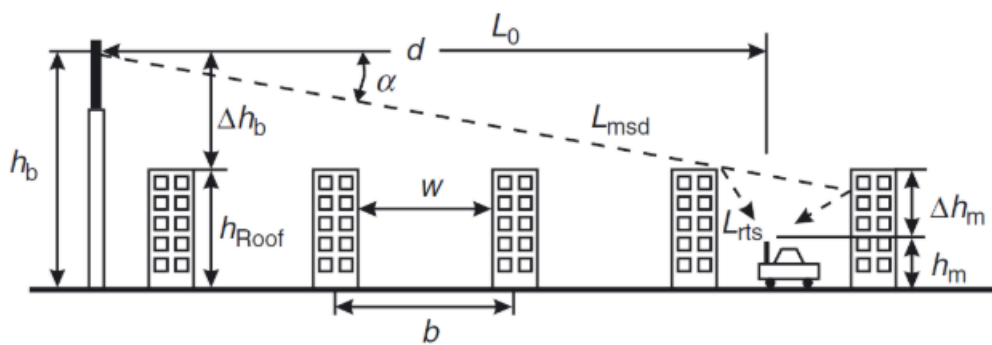


Slika 6. Srednji faktor prigušenja za Okumura model
(Romakrishnan, 2010.)

COST-231 Walfisch-Ikegami model je proširenje COST Hata modela. Može se koristiti za frekvencije iznad 2000 MHz [12]. Model COST231-Walfish-Ikegami je prikladan za

mikročelije jer ima manje ograničenja na udaljenost između BS i MS i na visinu antene. U ovom modelu, ukupni gubitak prijenosa se sastoji od gubitka slobodnog prostora, gubitka višestrukih zaslona duž puta rasprostiranja i prigušenja od strane posljednjeg ruba krova do MS, kako se vidi na Slici 7.

Gubitak slobodnog prostora ovisi o frekvenciji i udaljenost, dok gubitak uslijed difrakcije od ruba krova ovisi o frekvenciji, širini ulice i visine MS, kao i o orijentaciji ulice u odnosu na vezu BS-MS. Prigušenje od višestrukih objekata ovisi o udaljenosti između zgrada, udaljenosti između BS i MS, frekvenciji, visini BS i visina krova. Primjena frekvencije također je bitna jer visoke frekvencije imaju tendenciju da se više apsorbiraju ili reflektiraju u urbanim okruženjima, dok niže frekvencije mogu prodrijeti kroz prepreke poput zgrada s manje gubitaka. Ovaj model omogućuje inženjerima za bežične komunikacije da procijene koliko će signal biti oslabljen ili iskrivljen pri prijenosu kroz urbanu infrastrukturu.



Slika 7. Parametri COST 231-Walfish-Ikegami modela
(Correia, Damosso 1999.)

Kada postoji linija vidljivosti (L_{oS}) između odašiljača i prijarnika, gubitak putanje se daje sljedećom formulom:

$$PL = 42.64 + 26\log(d) + 20\log(f) \quad (7)$$

Dok je u uvjetima izvan linije vidljivosti (NL_{oS}), gubitak putanje dan je kao:

$$PL = L_o + L_{RTS} + L_{MSD} \quad (8)$$

gdje je L_o prigušenje u slobodnom prostoru i opisuje se kao:

$$L_o = 32.45 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (9)$$

L_{RTS} predstavlja difrakciju s krova na ulicu i definira se kao:

$$L_{RTS} = -16.9 - 10\log(w) + 10\log(f) + 20\log(h_b - h_r) - L_{ori} \quad (10)$$

gdje je h_b visina odašiljača, h_r visina prijamnika, dok L_{ori} predstavlja dodatni faktor gubitka za specifično okruženje, odnosno okoliš.

L_{MSD} označava prigušenje od višestrukih prepreka i izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$L_{MSD} = L_{BSH} + k_A + k_d \log(d) k_f \log(f) - 9\log(s_b) \quad (11)$$

gdje je L_{BSH} empirijska korekcija između odašiljača i prijamnika, k_A faktor gustoće, k_d faktor udaljenosti, a k_f faktor frekvencije.

Praćenje zrake (engl. *Ray-Tracing*) model je koji se koristi u svrhu izračuna snage zračenja gdje se prati prijedeni put i refleksija zrake od djelomično ili potpuno reflektivnih objekata. Temelji se na geometrijskoj optici i njenim proširenjima. Kod ovog modela, potrebni su podaci o preprekama (najčešće trodimenzionalni) poput obrisa ili visina zgrada. Kako je ovaj pristup računalno intenzivan, to određuje raspon na kojem se ova metoda može primjenjivati do najviše nekoliko kilometara. Ovaj model koristi koeficijente Fresnelove refleksije, koeficijente Fresnelove transmisije te jedinstvenu teoriju difrakcije (eng. *Uniform Theory of Diffraction*). Kako bi predviđanja bila što točnija, potrebno je pratiti što je više moguće zraka između predajnika i prijamnika. Razlikujemo dvije različite metode praćenja zrake.

Prva metoda je metoda slikanja. Pomoću nje se modeliraju pojedinačne i višestruke refleksije lociranjem svih slika odašiljača na sve površine u okolini. Također lociraju se svi obasjani rubovi u svrhu modeliranja pojedinačnih i višestrukih difrakcija. Poslije toga, svi obasjani rubovi koji djeluju kao sekundarni izvori, slikaju se kako bi se modelirale zajedno refleksije i difrakcije. Ukoliko je transmisija kroz zidove značajna, nastavlja se praćenje zrake kroz njih.

Druga metoda naziva se metoda lansiranja zrake. Ona podrazumijeva lansiranje zraka s malim kutnim razmakom na odašiljaču. U trenutku u kojem zraka presječe površinu, primjenjuje se zakon refleksije. Kada zraka prođe kroz kratku udaljenost od ruba ili primatelja, smatra se da ih obasjava. Pretpostavka je da male razlike u kutovima lansiranja zraka rezultiraju u put zrake koja postoji te točno presijeca rub ili primatelja. Rubovi se tada smatraju sekundarnim izvorom. Metoda lansiranja zrake, uglavnom je dosta brža od metode slikanja, no ponekad može propustiti bitne zrake što utječe na točnost iste. [13]

4. Čelijski sustavi

4.1. Čelije u sustavu pokretnih komunikacija

Čelija je, kao što je spomenuto, jedan od dijelova sustava pokretnih komunikacija. Najčešće je nepravilnog oblika s obzirom na to da na propagaciju utječu razne prepreke koje mogu biti prirodne, kao što su reljef i vegetacija, ili pak one koje je stvorio čovjek, kao što su zgrade i sl. No prilikom projektiranja se kao oblik ćelije uzima šesterokut s obzirom na to da takav oblik prekriva čitavu površinu bez preklapanja. Određeni broj frekvencijskih kanala koji se dodjeljuje svakom operateru svrstavaju se u određene ćelije, a skup ćelija u kojem se nalaze sve moguće frekvencije bez ponavljanja naziva se grozdom ćelija (eng. *cluster*). Odnosno, grozd se definira kao “niz susjednih ćelija kojima se ne mogu upotrijebiti kanali istih frekvencija zbog mogućih smetnji” [8]. Na području koje pokriva pojedini operater uglavnom ima više grozdova ćelija.

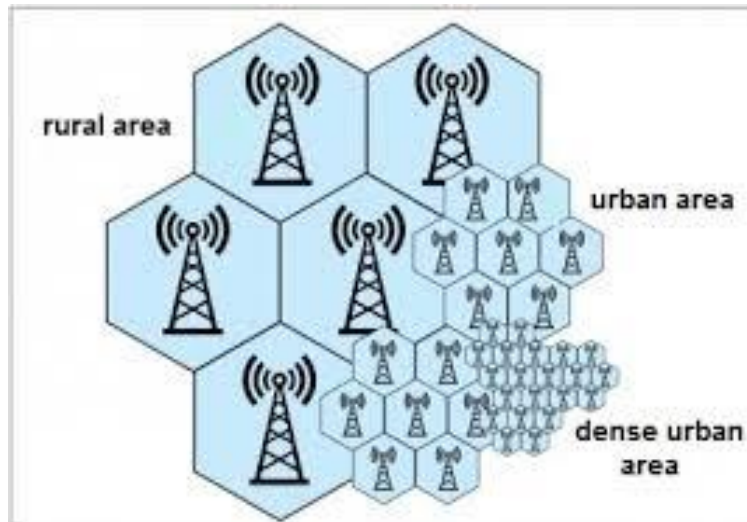
4.2. Projektiranje rasporeda ćelija

Jedno od rješenja u projektiranju rasporeda ćelija je razvoj manjih ćelija visoke gustoće, čime se postiže povećanje kapaciteta 5G mreže. Razvoj manjih ćelija visoke gustoće omogućuje i povećanje spektralne efikasnosti u području u kojem ćelije djeluju. Manje ćelije visoke gustoće mogu se postaviti na dva načina [14]:

- preklapanjem postojećih sustava ćelija manjim ćelijama visoke gustoće i iste tehnologije (mikro, piko, femto ćelije) ili
- preklapanjem postojećih sustava ćelija manjim ćelijama visoke gustoće i različitih tehnologija (HSPA, LTE, LTE-A...).

Dodavanje manjih ćelija visoke gustoće može dvostruko povećati kapacitet svaki put kada se udvostruči broj malih ćelija.

Male ćelije koriste se za urbane centre, dok se velike ćelije koriste za prigradska područja (Slika 8).



Slika 8. Male i velike ćelije – prikaz dijeljenja ćelija
(TNUDA.org, 2024.)

Kada se stvaraju male ćelije mogu se javiti problemi kao što su povećanje istokanalnih smetnji ili gubitci zbog takozvane “sjene”. Također, dijeljenje ćelija zahtijeva dodatna ulaganja jer su potrebni dodatni odašiljači, najčešće veći broj njih, kao i zemljište. Zato se može zaključiti da je planiranje pokretnog celularnog sustava kompleksna zadaća, koja uključuje optimizaciju međusobno suprotnih ciljeva u projektiranju, kao što su cijena, pokrivanje signalom, kvaliteta usluge i kapacitet. [8]

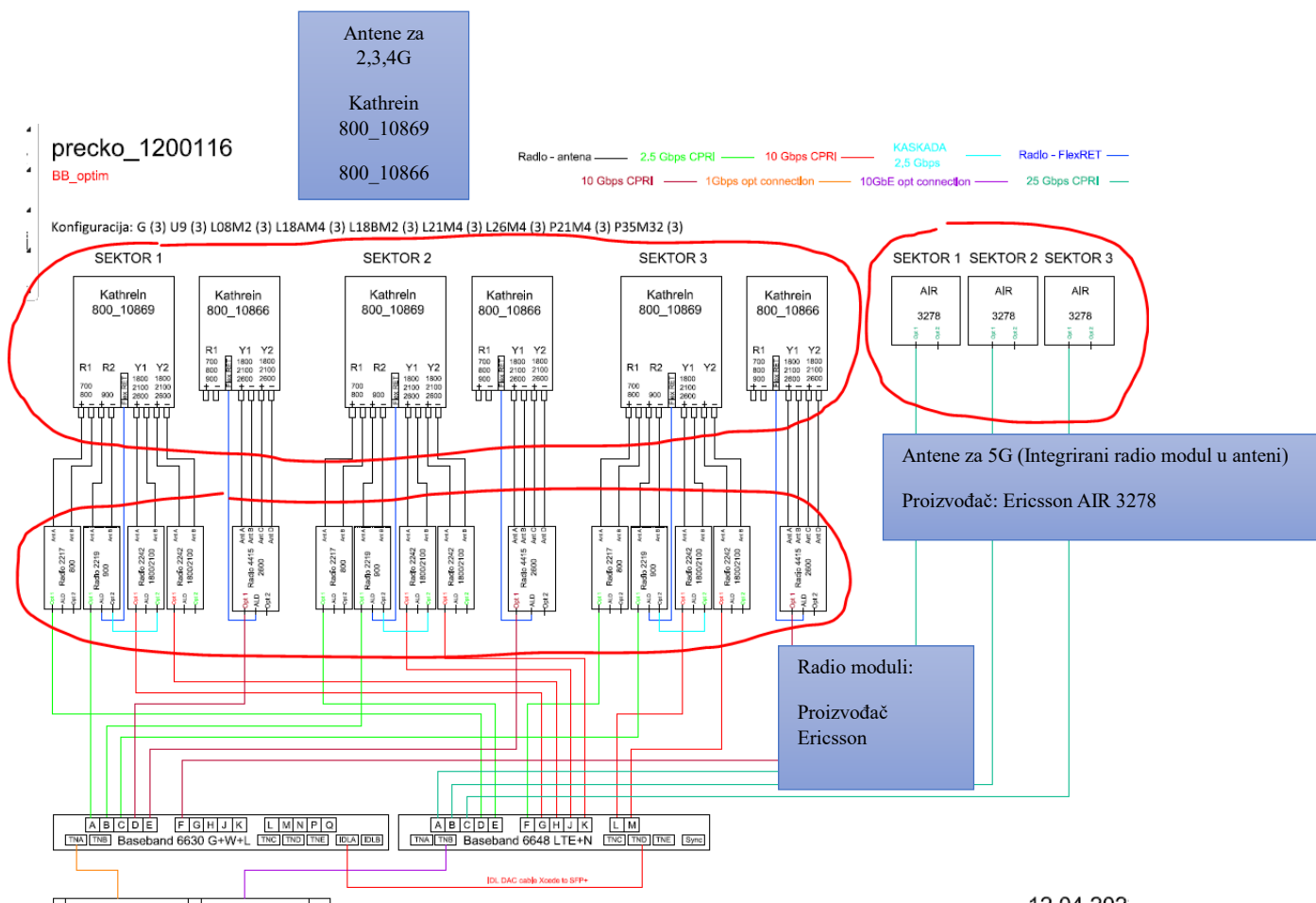
5. Instrumenti za mjerenje jačine signala

5.1. Mjerenje jačine signala

Sve veća potreba krajnjeg korisnika za bržom, efikasnijem i pouzdanijom telekomunikacijskom uslugom iziskuje stručna planiranja sustava. Položaj antena, karakteristike antenskog sustava i što točnija mjerenja signala u svim uvjetima neophodna su za realizaciju što bolje usluge. Mjerenja signala dostupna su svima te su korisnicima javno dostupne jednostavne i besplatne aplikacije pomoću kojih se može dobiti prikaz prijamne snage signala za određenu tehnologiju ili brzina podatkovnog prijenosa. Projektanti mreže, dakako koriste znatno naprednije aplikacije sa većim uvidom u pokrivenost određenog područja kako bi unaprijedili mrežu, no mjerenja se rade i zbog dijagnostike problema. Primjer tomu su CRM (*customer relationship management*) mjerenja na koja stručnjaci izlaze nakon određenih žalbi korisnika. Mjerenja su izuzetno bitna i zbog utvrđivanja kvalitete usluga. Također, osim mobilnim aplikacijama, mjerenja se izvode i profesionalnim instrumentima, spektralnim i signalnim analizatorima, a postoje i alati za umjeravanje antena u svrhu točnijeg mjerenja. Sve je to potrebno kako bi u konačnici imali pouzdani sustav.

5.2. Performanse odabranog sustava za mjerenje

Kao što je gore spomenuto, najčešći oblik mjerenja signala je upravo putem mobilne aplikacije. Kretanjem po određenom području, korisnik sa svojim mobilnim uređajem prelazi iz ćelije u ćeliju te je njegov terminalni uređaj, pokriven signalom kojeg, s obzirom na vremenske uvjete omogućuje antenski sustav bazne postaje na koju je je korisnik u tom trenutku spojen. U nastavku, na Slici 9. imamo blok shemu bazne postaje u Prečkom (Prečko 1200116“) s njezinim elementima [15].



Slika 9. Shema antenskog sustava bazne postaje Prečko (Metal-Projekt, 2018.)

Na shemi su prikazane antene proizvođača „Kathrein“ koje su namijenjene za 2G, 3G i 4G tehnologije i koje su gabaritima par puta veće od modernih „AIR“ 5G antena. One su za razliku od modernih 5G antena, debelim oklopljenim koaksijalnim kabelima koji su otporni na vanjska zračenja, spojene s radio modulima kako je prikazano na shemi te nakon toga optikom na „Baseband“ koji se nalazi na dnu bazne postaje. Svrha radio modula je filtriranje frekvencija. 5G antene, iako manje, radio module sadrže u sebi. Osim što bolje pokrivaju područje signalom, omogućuju manje smetnje unutar ćelije, pružaju bolji kapacitet, manje su, lakše i bolje oblikuju emitirajući snop. Na slikama 10. i 11. prikazane su karakteristike „Kathrein“ i „AIR“ antena.

8-Port Antenna	R1	R2	Y1	Y2
Frequency Range	698-862	880-960	1695-2690	1695-2690
Dual Polarization	X	X	X	X
HPBW	65°	65°	65°	65°
Gain	16.5dBi	17dBi	18dBi	18dBi
Adjust. Electr. DT	1.5°-10°	1.5°-10°	2.5°-12°	2.5°-12°

set by **FlexRET**

KATHREIN



8-Port Antenna 2LB/2HB 2.4m 65° | 698-862 16.5dBi | 880-960 17dBi | 2x1695-2690 18dBi

Type No.	80010869		
Left side, lowbands	R1, connector 1-2	R2, connector 3-4	
	698-862	880-960	
Frequency Range	MHz 698 - 806	790 - 862	880 - 960
Gain at mid Tilt	dBi 16.0	16.4	17.0
Gain over all Tilts	dBi 15.9 ± 0.4	16.3 ± 0.4	16.9 ± 0.3
Horizontal Pattern:			
Azimuth Beamwidth	° 68 ± 2.8	66 ± 2.2	64 ± 2.3
Front-to-Back Ratio, Total Power, ± 30°	dB > 21	> 24	> 25
Cross Polar Discrimination over Sector	dB > 6.5	> 7.5	> 9.5
Azimuth Beam Port-to-Port Tracking	dB < 2.0	< 2.5	< 2.0
Vertical Pattern:			
Elevation Beamwidth	° 8.7 ± 0.6	8.0 ± 0.5	7.2 ± 0.3
Electrical Downtilt continuously adjustable	° 15 - 10.0		15 - 10.0
Tilt Accuracy	° < 0.3	< 0.3	< 0.2
First Upper Side Lobe Suppression	dB > 17	> 15	> 19
Upper Side Lobe Suppression, 20° Sector above Main Beam	dB > 15	> 15	> 17
Cross Polar Isolation	dB > 30	> 30	> 30
Port to Port Isolation	dB > 28 (R1 // R2) > 30 (R1 // Y1, Y2)	> 28 (R2 // R1) > 30 (R2 // Y1, Y2)	> 30 (R2 // Y1, Y2)
Max. Effective Power for Group of Ports 1+3 // 2+4	W 400 (at 50 °C ambient temperature)		
Max. Effective Power Ports R1 + R2	W 800 (at 50 °C ambient temperature)		

Values based on NGMN-P-BASTA (version 9.6) requirements.



Electrical specifications, all ports	
Impedance	Ω 50
VSWR	< 1.5
Return Loss	dB > 14
Inband Isolation	dB > 28
Passive Intermodulation	dBc < -150 (2 x 43 dBm carrier)
Polarization	° +45, -45
Max. Effective Power for the Antenna	W 900 (at 50 °C ambient temperature)

Values based on NGMN-P-BASTA (version 9.6) requirements.

Mechanical specifications	
Input	8 x 7.16 female
Connector Position	bottom
Adjustment Mechanism	FlexRET, continuously adjustable
Wind load (at Rated Wind Speed, 150 km/h)	N Ibf Frontal: 530 1187 Maximat: 960 2116
Max. Wind Velocity	km/h mph 200 154
Height / Width / Depth	mm inches 2441 / 397 / 169 96.1 / 15.6 / 6.7
Category of Mounting Hardware	H (Heavy)
Weight	kg lb 40.0 / 42.0 (clamps incl.) 88.2 / 92.6 (clamps incl.)
Packing Size	mm inches 2641 / 397 / 232 104.0 / 15.6 / 8.3
Scope of Supply	Panel, FlexRET and 2 units of clamps for 42-115 mm 1.7-4.5 inches diameter

Accessories (order separately if required)

Type No.	Description	Remarks mm inches	Weight approx. kg lb	Units per antenna
85010002	1 clamp	Mast diameter: 110-220 4.3-8.7	2.7 6.0	2
85010003	1 clamp	Mast diameter: 210-390 8.3-15.0	4.8 10.6	2
85010009	1 downtilt kit	Downtilt angle: 0°-8°	4.4 9.7	1
86010154	Site Sharing Adaptor	3-way (see figure below)	0.65 1.4	
86010155	Site Sharing Adaptor	6-way (see figure below)	1.35 3.0	
86010162	Gender Adaptor	Solely to be used in combination with the FlexRET module 86010153ver	0.045 0.099	1
86010163	Port Extender		0.16 0.35	1

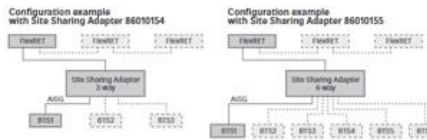
Accessories (included in the scope of supply)

738546	1 clamp	Mast diameter: 42-115 1.7-4.5	1.1 2.4	2
86010153ver	FlexRET			1

For downtilt mounting use the clamps for an appropriate mast diameter together with the downtilt kit. Wall mounting. No additional mounting kit needed.

Material: Reflector screen: Aluminum. Fiberglass housing: E covers totally the internal antenna components. The special design reduces the loading areas to a minimum and guarantees the best weather protection. Fiberglass material guarantees optimum performance with regards to stability, stiffness, UV resistance and painting. The color of the radome is light grey. **All nuts and bolts:** Stainless steel or hot-dip galvanized steel.

Grounding: The metal parts of the antenna including the mounting kit and the inner conductors are DC grounded.



For more information please refer to the respective data sheets.



Slika 10. Karakteristike „Kathrein 80010868“ antene

Table 2 Technical Data

Description	Value
Maximum nominal output power ^{(1) (2)}	B78K: 200 W (License key is required for total output power over 20 W.)
Number of carriers	NR: up to two
Frequency ⁽²⁾	B78K for NR 3420–3800 MHz

(1) For detailed information about licenses and HWAC, see:

NR: Manage Licenses and Hardware Activation Codes in the NR RAN library.

(2) For detailed information about output power, see:

NR: Hardware-Related Capabilities in the NR RAN library.

(3) For information about IBW and supported carrier bandwidths, see Radio Node Configurations.

EIRP Data

Traffic Beams

This section describes the EIRP of traffic beams for the AIR unit.

Table 3 AIR Unit Typical EIRP Performance Data for Traffic Beams

Unit	Uniform Traffic Beams ⁽¹⁾	Direction		
		Parameter	H0V6 deg	H55V6 deg
AIR 3278 B78K	Vertical Beamwidth	8.5°	8.5°	8°
	Horizontal Beamwidth	12.5°	20.5°	13°
	Peak EIRP (Typical) ⁽²⁾⁽³⁾	2 x 74 dBm	2 x 71 dBm	2 x 71.5 dBm

Broadcast Beams

This section describes performance data for broadcast beams in two different scenarios.

Table 4 AIR Unit Typical Antenna Performance Data for Broadcast Beams in Macro and Hotspot Scenarios

Unit	Parameter	Macro	Hotspot
		BrM1 ⁽¹⁾	BrHS1 ⁽²⁾
AIR 3278 B78K	Vertical Beamwidth	8.5±1°	17±2°
	Horizontal Beamwidth	65±5°	65±5°
	Digital Downtilt	4° to 9°	Fixed 6°
	Vertical Beam Pointing Error	≤ 1°	≤ 1°
	Horizontal Beam Pointing Direction	0±5°	0±5°
	EIRP (Typical)	1 x 70 dBm	1 x 67 dBm
	Vertical Side Lobe Suppression	13 dB	12 dB
	Front to Back Ratio	25 dB	-
Beam Parallelity	N/A	N/A	

Slika 11. Karakteristike „AIR“ antene

5.3. Očekivana točnost i ograničenja mjerenja

Prilikom mjerenja signala postoji više faktora koji utječu na točnost rezultata. Specifikacije instrumenata, mjernih uređaja ili pak dotrajalost te oštećenja antena mogu predstavljati ograničenja. Ipak, antene su samo posrednici u postupku kako bi se signal dobro izračio u prostor, stoga je vrlo bitan faktor snaga odašiljača. Upravo ona definira koja će razina prijamnog signala biti prilikom mjerenja. Ona se dinamički mijenja ovisno o raznim uvjetima te prometnom opterećenju, a što je veća, omogućuje veći doseg signala, otpornost na vanjske smetnje te osigurava pouzdanu komunikaciju. Vremenski uvjeti, okoliš, razne prepreke poput zgrada, drveća, brda u velikoj mjeri diktiraju točnost mjerenja. Dakako da održavanje opreme te kalibracija instrumenata pridonose većoj točnosti mjerenja. Što se tiče neprofesionalnih mjerenja dostupnih svim korisnicima, preciznost rezultata mjerenja manje je pouzdana te su za mjerenja provedena na istoj lokaciji, u istim vremenskim uvjetima i sa istom opremom, rezultati varijabilni unutar nekolicine mjerenja zaredom.

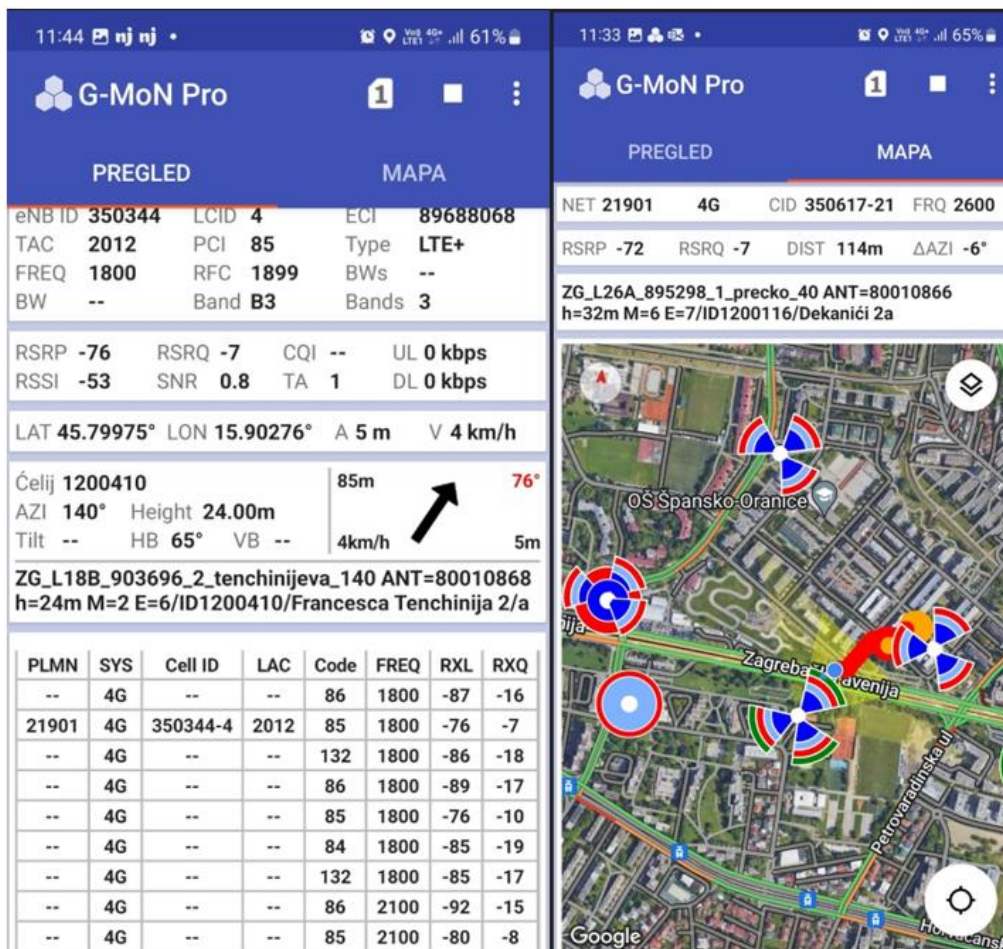
6. Aplikativna rješenja za mjerenje signala u određenom području

Mnoga su aplikativna rješenja dostupna za mjerenje signala u određenom području. Korisnici mobilnih uređaja imaju pregršt aplikacija sa raznolikim mogućnostima te jednostavnijim ili kompleksnijim sučeljima dostupnih ovisno o sustavu mobilnih uređaja. Sljedeća mjerenja temeljena su na specifikacijama mobilnog uređaja Samsung SM-S911B, komercijalnog naziva „Samsung S23“ koji radi na operativnom sustavu „Android 13“ te mogućnostima aplikacija „G-MoN Pro“ te „Speedtest by Ookla“. Mobilni uređaj Samsung S23 s 8GB RAM (eng. *Random Access Memory*) memorije, pokretan je 8-jezgrenim „Qualcomm Snapdragon 8 Gen 2“ procesorom. Uređaj podržava korištenje 5G mobilne mreže te su mjerenja omogućena javno dostupnim telefonskim uslugama u pokretnoj elektroničkoj komunikacijskoj mreži operatora „Hrvatski Telekom“.

Sva četiri mjerenja rađena su hodajući s mobilnim uređajem u ruci po ulicama istom rutom, unutar područja koje pokrivaju četiri bazne postaje. Visine s kojih su antene emitirale signal razlikuju se kod sve četiri bazne postaje. Postavljene su na 24 m, 28 m, 32 m i 42 m visine u odnosu na tlo, a ti podaci nalaze se na početnom prikazu aplikacije „G-MoN Pro“ što se može vidjeti na slici 13. Ispitivana je snaga prijemnog signala za svaku od 4 tehnologije. 2G, 3G, 4G i 5G. Kao dodatan parametar, mjerene su brzine prijenosa podataka u svakoj od tehnologija.

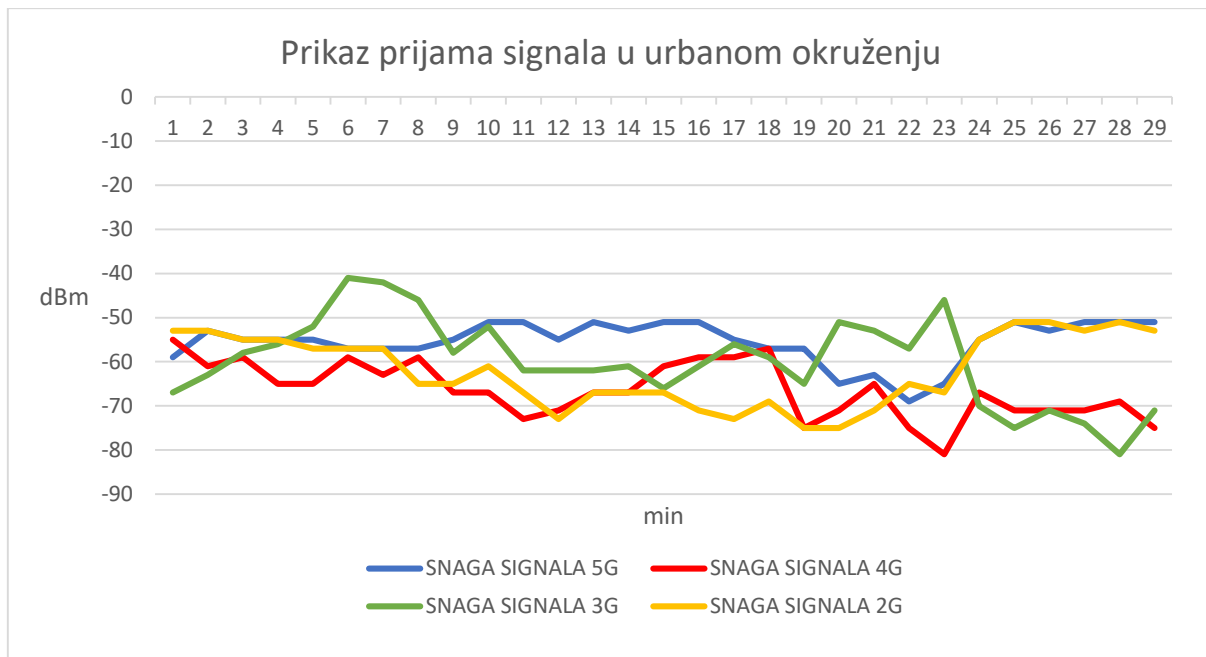


Slika 12. Prikaz područja mjerenja signala
(Google Maps, 2024.)



Slika 13. Izgled sučelja „G-MoN Pro“
(Screenshot)

Aplikacija G-MoN Pro, osim što tijekom mjerenja točno prikazuje kretanje mobilnog uređaja, daje mogućnost izvoza .kml datoteke nakon što se mjerenje snimi te se naknadno može ubaciti u Google Maps, kako je prikazano na slici 12. Aplikacija daje uvid u velik broj parametara vezanih za signal u tom trenutku. Osim snage prijemnog signala i tehnologije koja se mjeri, može se očitati i naziv bazne postaje na koju je mobilni uređaj spojen, frekvencija na kojoj radi, ID ćelije u kojoj se nalazi, udaljenost do antene, koordinate koje očitava GPS, azimut, visinu antene, ali i još poneke parametre.



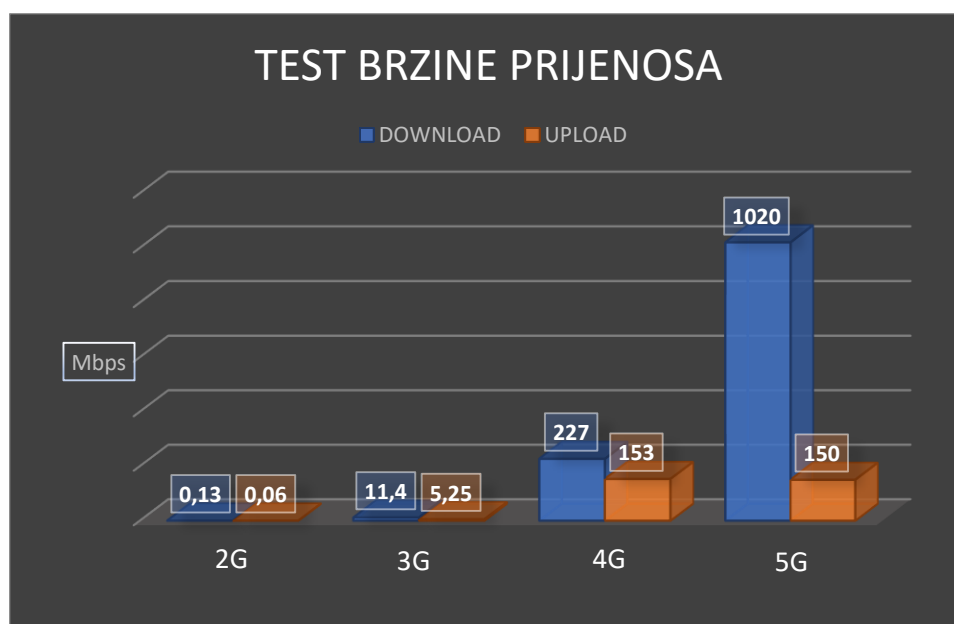
Slika 14. Prikaz omjera snage signala za pojedine tehnologije

Iz grafa sa Slike 14. vidljivo je kako se na mjenom području, signal u sve četiri tehnologije mijenjao tijekom 29 min hodanja rutom od 2 km. Ispitivanje se cijelom rutom kretanja odnosilo isključivo na jednu tehnologiju te nije bilo moguće prespajanje mobilnog uređaja na tehnologiju koja prima bolji signal u datom trenutku. Dakle, napravljena su četiri zasebna mjerenja. Naravno, kada korisnik mobilne usluge svakodnevno koristi svoj mobilni uređaj, isti je namješten da se, kako se kreće i u koje područje dolazi, prespaja na tehnologiju koja na tom mjestu ima bolji signal. Bolji, zato jer prijamna snaga signala nije jedina karakteristika po kojoj se ocjenjuje kvaliteta, pa će tako mobilni uređaj gotovo uvijek odabrati 5G bez obzira što je u tom trenutku bolja prijamna snaga 2G signala.

Tijekom svakog od četiri mjerenja napravljen je i test brzine prijenosa podataka što je vidljivo na Slici 15. Može se primijetiti kako se varijacija kašnjenja (eng. *Jitter*) smanjuje kod mjerenja brzine prijenosa u višim tehnologijama. Što je jitter manji, performanse mreže su bolje. Isto je vidljivo i za ping vrijednosti koje su pokazatelj koliko je vremena potrebno podacima da prođu kroz čvorove mreže do svog odredišta te se vrata natrag. Na Slici 16. grafički su prikazane brzine prijenosa u svim tehnologijama te je njima dokazano da su brzine preuzimanja podataka i slanja podataka tijekom mjerenja doista onakve kakve su i predviđene od strane operatora za pojedinu tehnologiju. Također, grafički prikaz jasno daje uvid koliko je zapravo velik napredak u brzini prijenosa s prelaskom na višu tehnologiju.



Slika 15. Brzine prijenosa podataka za svaku tehnologiju (Screenshot prikaza aplikacije „Speedtest by Ookla“)



Slika 16. Grafički prikaz brzina prijenosa podataka za svaku tehnologiju

7. Zaključak

Neprestani razvoj telekomunikacijske znanosti i sve veća ljudska potreba za gotovo pa savršenim funkcioniranjem sustava doveli su do toga da su kašnjenja i pucanja veza gotovo pa svedeni na minimum. Moderna tehnologija, posebno razvoj u komunikacijskim modulima i protokolima, omogućuju čovjeku uživanje u prednostima nove tehnologije. Ipak, značaj onih koji projektiraju mrežu te onih koji mjere signal kako bi se mreža popravila, optimizirala i unaprijedila, također je neupitan. Kvalitetna i precizna mjerenja ključna su za pouzdanu i stabilnu komunikaciju. Na temelju njih operatori mogu prilagoditi svoju infrastrukturu u vidu što bolje pokrivenosti i učinkovitosti za određeno područje. Brojni su faktori koji utječu na snagu signala na nekoj lokaciji, poput onih geografskih, gdje prepreku mogu činiti brda, doline, razni objekti, kuće, zgrade, drveća te vremenski uvjeti poput kiše, magle, vjetra. Udaljenost korisnika od bazne postaje također je jedan od faktora, kao i gustoća korisnika na promatranom području. Korisnicima je danas javno dostupno jako puno aplikativnih rješenja i alata za provjeravanje signala koji osim snage prikazuju i druge zanimljive parametre pa tako u svakom trenutku korisnici mogu vidjeti koja im je udaljenost do najbliže bazne stanice ili pak preko koje frekvencije, odnosno kanala, radi mobilni uređaj.

Provedenim mjerenjima u sklopu ovoga rada, dokazano je kako prijamni signal na mobilnim uređajima doista ovisi o više faktora. Snaga signala, između ostalog, ovisila je o udaljenosti mobilnog uređaja od antena baznih postaja, visinama zgrada koje su blokirale nesmetanu propagaciju prilikom hodanja rutom mjerenja, a na aplikaciji „G-MoN Pro“ je bilo moguće pratiti u kojem trenutku će se uređaj prespojiti na drugu baznu postaju. Izmjerene brzine prijenosa podataka za aktualnu tehnologiju 5G te snaga signala bili su očekivani bez obzira što je mjerenje provedeno u području s gusto raspoređenim zgradama i ostalim preprekama odnosno u vrlo urbanom okruženju. Dokaz je to kako stručnjaci za projektiranje mreže i inženjeri koji se svakodnevno bave ovom tematikom, omogućuju korisnicima bolju povezanost, lakšu komunikaciju, ali i unapređuju kvalitetu života kako u urbanim tako i u ruralnim područjima.

Popis literature

- [1] Mileusnić E. *Izloženost ljudi elektromagnetskim poljima*. Energija, Vol. 55 No. 5, 2006., str. 550 – 577.
- [2] Hrvatska enciklopedija: *Elektromagnetski valovi*. Preuzeto s: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/elektromagnetski-valovi> [Pristupljeno: 06.03.2024.]
- [3] Stipić D, Beroš V, Gnjidić Ž: *Uzrokuje li upotreba mobilnih telefona tumore mozga?* Medicina, Vol. 47 No. 2, 2011., str. 200 – 205.
- [4] Hrvatska enciklopedija: *Planckova konstanta*. Preuzeto s: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/planckova-konstanta> [Pristupljeno: 06.03.2024.]
- [5] Tehnički leksikon: *Pokretne komunikacije*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2024. Preuzeto s: <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/komunikacije-pokretne> [Pristupljeno: 07.03.2024.]
- [6] Europska komisija: *Radiofrekvencijski spektar: temelj bežične komunikacije*. Službene internetske stranice EU-a. Preuzeto s: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/hr/policies/radio-spectrum> [Pristupljeno: 09.03.2024.]
- [7] Afrić W. *Mobilni komunikacijski sustavi 4G i 5G, utjecaj elektromagnetskih valova na ljudsko zdravlje i mobilna forenzika*. Odjel za stručne studije Sveučilišta u Splitu, 2022. Preuzeto s: <https://www.oss.unist.hr/Portals/0/adam/Contents/TnPnQrlyXEeYJna9tPx2wQ/Text/Mobilni%20komunikacijski%20sustavi%204G%20i%205G.pdf> [Pristupljeno: 07.04.2024.]
- [8] Marin D. *Osnove pokretnih komunikacija u sustavu telekomunikacijskog prometa*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2004., str. 42.
- [9] Đelekovićan K, Širanović Ž. *Utjecaj čimbenika atenuacije i latencije na funkcionalnost i efikasnost WiFi mreže*. Politehnika i dizajn, Vol. 10 No. 3, 2022.
- [10] Molisch, AF. *Wireless communications*. 2nd Edition, Wiley, IEEE, 2011.
- [11] Ramakrishnan B, Rajesh RS, Shaji RS.: *Učinkovita komunikacija vozilima izvan gradskog okruženja*. Međunarodni časopis za mreže sljedeće generacije (IJNGN), svezak 2, prosinac 2010.
- [12] Amarasinghe KC, Peiris KGAB, Thelisinghe LADMD, Warnakulasuriya GM, Samarasinghe ATLK. *Četvrta međunarodna konferencija o industrijskim i informacijskim sustavima*, ICIS, Šri Lanka, 2009.
- [13] Barclay L. *Propagation of Radiowaves*, 2nd Edition, IET, 2003.
- [14] Rodriguez J. *Fundamentals of 5G mobile networks*. John Wiley & Sons, West Sussex, 2015.
- [15] Metal-Projekt: *Osnovna postaja pokretnih komunikacija Prečko, ID 1200116*. Projektna dokumentacija – Interni dokumenti, Metal-Projekt d.o.o. za projektiranje i inženjering, Zagreb, 2018.

Popis grafičkih prikaza

Slika 1. Elektromagnetski valovi.....	2
Slika 4. Primjena dipola: telekomunikacijska antena i mobitel.....	6
Slika 5. Slikovni prikaz razvoja sustava mobilnih komunikacija od 1G do 5G mreže.....	8
Slika 4. Evolucijski prikaz mobilnih mreža.....	9
Slika 5. Arhitektura mreže 4G LTE.....	10
Slika 6. Srednji faktor prigušenja za Okumura model.....	14
Slika 7. Parametri COST 231-Walfish-Ikegami modela.....	15
Slika 8. Male i velike ćelije – prikaz dijeljenja ćelija.....	18
Slika 9. Shema antenskog sustava bazne postaje Prečko.....	20
Slika 10. Karakteristike „Kathrein 80010868“ antene.....	21
Slika 11. Karakteristike „AIR“ antene.....	21
Slika 12. Prikaz područja mjerenja signala.....	23
Slika 13. Izgled sučelja G-MoN Pro.....	24
Slika 14. Prikaz omjera snage signala za pojedine tehnologije.....	25
Slika 15. Brzine prijenosa podataka za svaku tehnologiju.....	26
Slika 16. Grafički prikaz brzina prijenosa podataka za svaku tehnologiju.....	26

Tablice

Tablica 1. Vrste elektromagnetskih valova i frekvencija i valna duljina istih.....	4
--	---

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom "Određivanje snage signala na mjestu prijama u urbanom okruženju, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 30.4.2024.

Petar Kresimir Bicačić
(ime i prezime, potpis)