

5G sustav u Hrvatskoj i svijetu

Tomić, Janja

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:200:661070>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**

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 studij

5G SUSTAV U HRVATSKOJ I SVIJETU

Završni rad

Janja Tomić

Osijek, 2023.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada.....	1
2. EVOLUCIJA MOBILNIH KOMUNIKACIJSKIH SUSTAVA	2
2.1. Komunikacijski sustavi.....	2
2.2. Prva generacija (1G).....	3
2.3. Druga generacija (2G).....	4
2.4. Treća generacija (3G).....	7
2.5. Četvrta generacija (4G).....	8
3. PETA GENERACIJA MOBILNIH KOMUNIKACIJSKIH SUSTAVA	10
3.1. Počeci i razvoj 5G sustava.....	10
3.2. Tehničke karakteristike 5G sustava.....	11
3.3. Arhitektura 5G sustava	15
3.4. Ključna područja usluge.....	18
3.4.1. eMMB	19
3.4.2. mMTC	19
3.4.3. URLLC.....	19
3.4.4. OMA i NOMA.....	20
4. MJERENJA 5G SUSTAVA	21
4.1. Mjerenje i testiranje 5G tehnologije u RH.....	22
5. PRIMJENA 5G MREŽE	24
5.1. Industrija 4.0	25
5.2. Medicina i 5G.....	26
5.3. Pametni gradovi	28
5.4. Virtualna i proširena stvarnost.....	29
6. 5G U HRVATSKOJ I SVIJETU	31
6.1. Ekonomski učinci 5G u Republici Hrvatskoj.....	32
7. ZAKLJUČAK	36

LITERATURA	37
SAŽETAK	42
ABSTRACT	43

1. UVOD

U današnjem brzom razvoju tehnologije, mobilni komunikacijski sustavi postali su neizostavni dio našeg svakodnevnog života. Omogućuju nam glasovnu komunikaciju, pristup internetu, slanje poruka te upotrebu različitih aplikacija i usluga. Cilj ovog rada je pružiti sveobuhvatan pregled 5G sustava, uključujući potencijalne primjene i utjecaj na društvo.

Kroz povijest, svaka generacija je donijela značajne promjene i napretke koji su opisani u drugom poglavlju. Treće poglavlje usredotočuje se na petu generaciju mobilnih komunikacijskih sustava. Rad istražuje razvoj i tehničke karakteristike 5G sustava, njegovu arhitekturu te ključna područja usluga koja omogućava. Četvrto poglavlje usmjereno je na ključnu ulogu mjerenja u optimizaciji 5G sustava. Nadalje, rad istražuje primjene 5G mreže u različitim sektorima kao što su industrija, medicina, pametni gradovi te virtualna i proširena stvarnost. Analiza obuhvaća kako 5G tehnologija doprinosi inovacijama unutar tih sektora, potiče rast ekonomije te pruža nove načine komunikacije.

1.1. Zadatak završnog rada

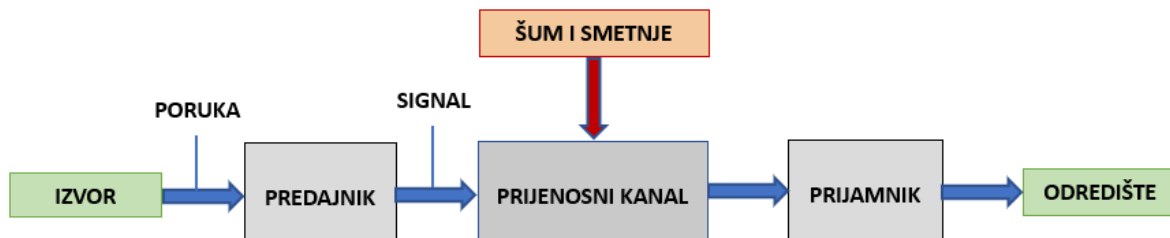
U ovom završnom radu potrebno je istražiti i dati prikaz prijašnjih generacija komunikacijskih sustava i poboljšanja koja svaka nova generacija donosi. Potrebno je detaljno opisati najnoviji 5G komunikacijski sustav, njegove karakteristike i primjene.

2. EVOLUCIJA MOBILNIH KOMUNIKACIJSKIH SUSTAVA

Komunikacija je oduvijek bila središnji dio društva, omogućujući ljudima razmjenu ideja, informacija i osjećaja. U modernom svijetu bežična elektronička komunikacija postala je neizostavan dio naše svakodnevice, pružajući nam mogućnost brze globalne razmjene informacija. Sustavi mobilnih komunikacija postali su temeljni stup moderne komunikacije, evoluirajući kroz nekoliko generacija od 1G do najnovije 5G tehnologije. Svaka slijedeća generacija mobilnih komunikacijskih sustava donosi naprednije usluge i proširuje područje primjene. Sve veća potražnja društva za brzim i pouzdanim internetom pokreće daljnje inovacije u mobilnim komunikacijskim sustavima.

2.1. Komunikacijski sustavi

Komunikacijski sustav predstavlja cjelokupni sustav koji omogućuje prijenos podataka, glasa, slika i drugih oblika informacija između udaljenih lokacija te tako povezuje ljude diljem svijeta. Dizajnirani su za prenošenje podataka putem određenih medija, kao što su električni signali, te elektromagnetski valovi, uključujući svjetlost i radio valove. Ovi sustavi koriste razne tehnike kodiranja, modulacije i protokole kako bi osigurali siguran i pouzdan prijenos informacija. [1] Na slici 2.1. prikazan je pojednostavljeni prikaz komunikacijskog sustava.



Slika 2.1. Pojednostavljeni prikaz komunikacijskog sustava [3]

Izvor predstavlja početnu točku komunikacije, gdje se generira informacija koja se prenosi. Ovisno o prirodi komunikacije, informacija može biti u različitim oblicima. To može uključivati zvučne signale poput govora ili glazbe, tekstualne podatke, vizualne podatke poput fotografija i videozapisa te mnoge druge oblike podataka. Svaki oblik informacije ima svoje jedinstvene osobine i zahtjeve za njihov prijenos i obradu. [2]

Predajnik je uređaj koji prima informacije od izvora i pretvara ih u oblik prikladan za prijenos putem prijenosnog kanala. On obavlja različite funkcije pripremajući signal za prijenos, uključujući kodiranje, modulaciju i obradu signala. [2]

Prijenosni kanal je sredstvo preko kojeg se signal prenosi između predajnika i prijemnika. Taj kanal može biti žica, zrak, optička vlakna ili neki drugi prijenosni medij. Bez obzira na oblik, kanal može utjecati na signal i degradirati ga. Degradacija podrazumijeva pad kvalitete signala tijekom prijenosa, što se može dogoditi zbog buke, smetnji, slabljenja ili drugih čimbenika. Kako bi se osigurao dobar prijenos, koriste se tehnike modulacije koje prilagođavaju signal karakteristikama prijenosnog kanala. [3]

Prijemnik je uređaj koji prima signal koji je prenesen putem prijenosnog kanala. Prijemnik obavlja suprotne funkcije u odnosu na predajnik. To uključuje demodulaciju, dekodiranje i obradu signala kako bi se izvorni podaci vratili u njihovu izvornu formu. Demodulacija se koristi za pretvaranje analognog ili digitalnog signala u izvornu informaciju. [3]

Odredište je krajnja točka komunikacije, gdje se primljeni podaci dalje koriste ili interpretiraju. Ovisno o vrsti informacije, odredište može biti osoba, uređaj ili sustav koji prima i obrađuje informaciju u svrhu daljnje upotrebe. [3]

2.2. Prva generacija (1G)

Prva generacija mobilnih komunikacija, predstavljena 1980-ih, temeljila se na analognom prijenosu glasovnih usluga i podržavala je brzinu do 2.4 kilobita u sekundi (kbit/s). Godine 1979. Nippon Telephone and Telegraph (NTT) sa sjedištem u Tokiju lansirao je prvi mobilni sustav na svijetu. Nakon toga uslijedile su implementacije analognih mobilnih sustava i u drugim dijelovima svijeta. Sustav Nordic Mobile Telephone (NMT) razvijen je u Europi, dok je u Sjedinjenim Američkim Državama predstavljen Advanced Mobile Phone System (AMPS). [4]

AMPS radi unutar frekvencijskog raspona od 800 MHz do 900 MHz i koristi višestruki pristup s podjelom frekvencije FDMA (engl. *Frequency Division Multiple Access*) za uspostavljanje glasovnih kanala. FDMA se koristi za podjelu frekvencije iz šireg pojasa na uže frekvencijske kanale kako bi se omogućila istovremena komunikacija. Svaki kanal se koristi za prijenos glasovnih podataka između mobilnog uređaja i bazne stanice. [5] Slika 2.2. prikazuje kako mobilni uređaj i bazna stanica koriste FDMA za komunikaciju putem dva kanala širine 30 kHz. Kanali prenose signale između korisničkog uređaja i bazne stanice s frekvencijama unutar raspona od 824 do 849 MHz za uplink (uzlazna veza) te od 869 do 894 MHz za downlink

(silazna veza). Dva različita frekvencijska pojasa omogućuju full-duplex komunikaciju između baznih stanica i korisničkog uređaja. [6]



Slika 2.2. Višestruki pristup s podjelom frekvencije (FDMA) [6]

Motorola DynaTAC 8000X predstavljen je javnosti 1983. godine kao prvi mobilni telefon dizajniran za AMPS sustav. Ovaj telefon koštao je skoro 4000 američkih dolara, a trajao je samo 35 minuta uz punjenje od 10 sati. Bio je težak gotovo kilogram i dugačak 33 centimetra, čime je opravdao nadimak "cigla". [7]

Komunikacijski sustavi prve generacije imali su mnoge nedostataka i ograničene usluge. Neki od nedostataka 1G sustava: [4]

- samo glasovni pozivi, bez podatkovne komunikacije
- ograničeni kapacitet
- veliki (nepraktični) mobilni uređaji
- lošija kvaliteta razgovora (zbog osjetljivosti analognog signala na buku i smetnje)
- nemogućnost roaminga
- slaba sigurnost

Sve veći zahtjevi korisnika doveli su do razvitka sljedeće generacije komunikacijskih sustava.

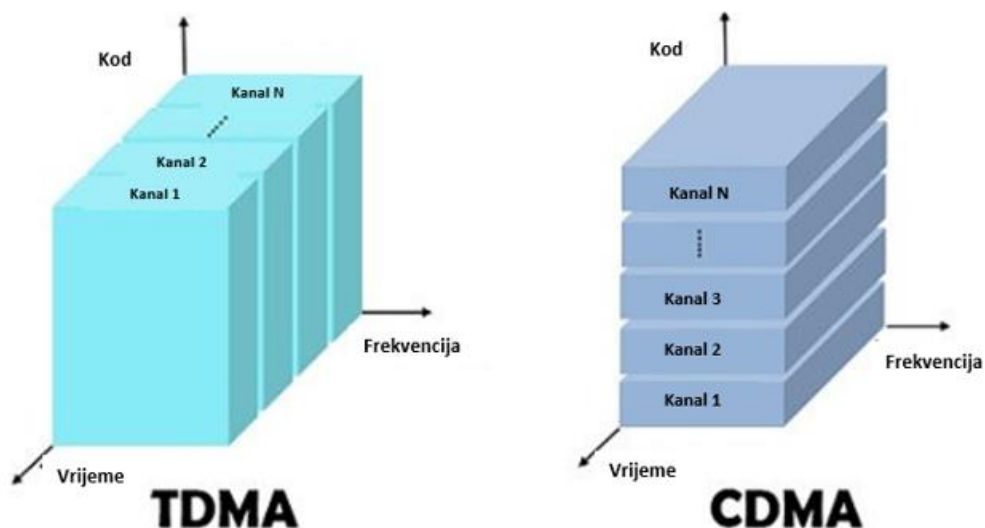
2.3. Druga generacija (2G)

Druga generacija (2G) komunikacijskih sustava prešla je s analognog na digitalni sustav. Sredinom 1991. godine finski mobilni operater Radiolinja pokrenuo je prvu GSM mrežu (engl. Global System for Mobile communication). Radiolinja je bila grupa privatnih regionalnih telefonskih kompanija koje su radile zajedno na pružanju mobilnih usluga te im je Nokia osiguravala opremu. GSM je ubrzo postao najrašireniji standard mobilnih komunikacija i danas broji više od milijardu korisnika. [8]

Mobilni telefoni druge generacije koriste TDMA (engl. Time division multiple access) i CDMA (engl. Code division multiple access) metode kako bi omogućili da više korisnika dijeli isti kanal. Najznačajnija poboljšanja 2G u odnosu na 1G su digitalna enkripcija poziva i optimalnija upotreba spektra. Ova poboljšanja omogućila su sigurniju razmjenu informacija i podržavanje većeg broja korisnika. Također, 2G je uveo SMS (engl. Short Message Service) ili uslugu kratkih poruka, koja je vrlo brzo zbog svoje praktičnosti postala popularna među korisnicima. [5]

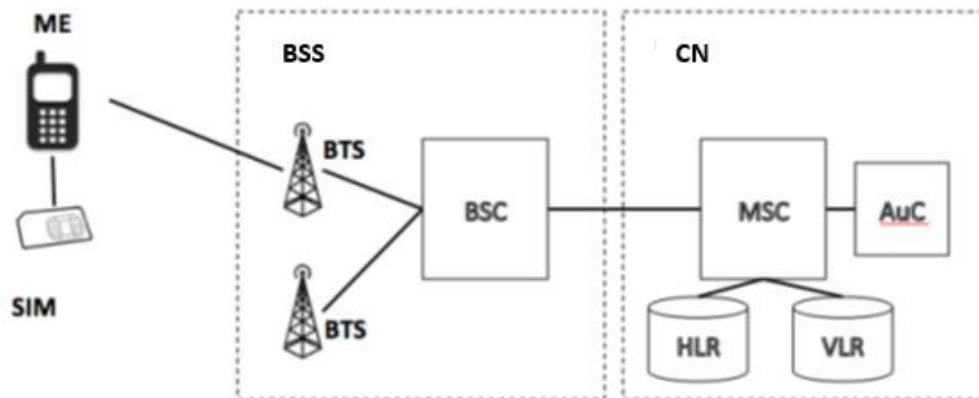
Višestruki pristup s vremenskim dijeljenjem (TDMA) je tehnologija koja dijeli prijenos podataka (npr. telefonski poziv) na fragmente i svaki fragment se prenosi u svom vremenskom odsječku. Fragmenti se ponovno sastavljaju na prijemu. Korisnici ne primjećuju ovu fragmentaciju jer se fragmenti prenose tako brzo da se percipiraju kao kontinuirani signal. [4]

Višestruki pristup tehnologijom proširenog spektra (CDMA) je tehnologija koja dijeli poziv na manje digitalizirane dijelove i kodira ih jedinstvenim kodovima. To omogućuje prijenos više poziva istim signalom bez međusobnog ometanja. [3] CDMA je sigurnija i učinkovitija metoda, ali TDMA je jeftinija i jednostavnija za implementaciju. Obje tehnologije pružaju veći mrežni kapacitet i manji broj smetnji. Slika 2.3. prikazuje kako TDMA omogućuje dijeljenje kanala na vremenske odsječke, dok CDMA distribuira kanal jedinstvenim kodom. [9]



Slika 2.3. Razlika između TDMA i CDMA [9]

Global System for Mobile communication (GSM) je razvio ETSI kao standard za drugu generaciju mobilnih komunikacijskih sustava. GSM koristi TDMA tehnologiju kako bi omogućio većem broju korisnika da dijele isti frekvencijski kanal. [10] Slika 2.4. prikazuje strukturu GSM mreže i njene glavne elemente.



Slika 2.4. *Struktura GSM mreže [10]*

Glavni elementi GSM mreže su: Mobile Station (MS), Core Network (CN) i Base Station Subsystem (BSS). MS se sastoji od mobilnog uređaja i SIM kartice (engl. *Subscriber Identity Module*). SIM kartica je čip koji sadrži podatke o korisniku mobilnog uređaja. CN je okosnica mobilne mreže i odgovorna je za usmjeravanje poziva te pružanje ostalih mrežnih usluga. Sastoji se od nekoliko komponenti:

- Mobile switching center (MSC) je primarni čvor odgovoran za uspostavljanje i prekid poziva i naplatu preplatnicima.
- Home location register (HLR) je središnja baza podataka koja sadrži pojedinosti o svakom pretplatniku ovlaštenom za korištenje okosnice mreže.
- Visitor location register (VLR) je baza podataka koja sadrži pojedinosti o pretplatnicima koji se trenutno nalaze u određenom području.
- Authentication center (AuC) je centar za autentifikaciju pretplatnika.

Podsustav bazne stanice (BSS) odgovoran je za upravljanje prometom između MS i CN. Bazna primopredajna stanica (BTS) dio je infrastrukture mobilne mreže koji je odgovoran za prienos i prijem radio signala. Postavljaju se na zgrade i tornjeve te omogućavaju glatku bežičnu komunikaciju. Komponenta mreže koja upravlja baznim stanicama naziva se Regulator bazne stanice (BSC). Obično se nalazi u središnjem dijelu mreže. [10]

Nedostatci 2G sustava kao što su ograničen kapacitet, ograničene funkcionalnosti i brzina prijena podataka do samo 64 kbit/s bili su razlozi za daljnje razvijanje i implementaciju 3G sustava. [4]

2.4. Treća generacija (3G)

Treća generacija mobilnih mreža (3G) uvedena je početkom 2000-ih godina u Japanu. Nova tehnologija pružila je značajna poboljšanja u odnosu na prošle generacije:

- brže brzine prijenosa podataka (do 2 megabita u sekundi (Mbit/s))
- bolja kvaliteta zvuka
- dodatne usluge (GPS (engl. *Global Positioning System*), mobilna televizija, videopozivi)
- brži mobilni pristup internetu
- povećan kapacitet (može podržati više korisnika)
- poboljšane mogućnosti roaminga. [4]

Tehnologiju 3G mreže razvila je Međunarodna telekomunikacijska unija (ITU), koja je i definirala tehničke zahtjeve za 3G mobilne mreže s novim IMT-2000 standardom. Dvije najpoznatije implementacije IMT-2000 standarda su UMTS u Europi i CDMA2000 u Sjevernoj Americi. [5] U tablici 2.5. prikazane su razlike ove dvije tehnologije. [11]

Tablica 2.5. Razlike između UMTS i CDMA2000

Značajke	UMTS	CDMA2000
Širina pojasa	5 MHz	1.5 MHz
Zračno sučelje	W-CDMA	CDMA
Brzina čipa	3.84 Mcps	1.2288 Mcps
Brzina prijenosa podataka	do 2 Mbit/s	do 14.4 Mbit/s
Duljina okvira	10 ms	20 ms

UMTS koristi veću širinu pojasa što mu omogućuje rukovanje većim podatkovnim prometom. UMTS koristi W-CDMA, dok CDMA2000 koristi CDMA zračno sučelje. W-CDMA (engl. *Wideband Code Division Multiple Access*) je novija i naprednija tehnologija od CDMA te nudi veće brzine prijenosa podataka. Iako u tablici CDMA ima veću maksimalnu brzinu prijenosa podataka, W-CDMA često postiže veće brzine u svakodnevnoj uporabi. To je zbog toga što je W-CDMA učinkovitiji u korištenju dostupne širine pojasa te može podnijeti veći podatkovni promet, što znači da je manja vjerojatnost da će biti zakrčen. Također, UMTS ima veću brzinu čipa te manju duljinu okvira od CDMA2000 što mu omogućuje postizanje većih brzina prijenosa podataka.

2.5. Četvrta generacija (4G)

Kako se razvila potreba za većim brzinama, boljim performansama i povećanjem učinkovitosti došlo je do razvijanja četvrte generacije telekomunikacijskih sustava (4G). Ključni napredci koji razlikuju 4G sustave naspram 3G sustava su:

- učinkovitije korištenje raspoloživog frekvencijskog spektra
- visoka kvaliteta zvuka
- jednostavan pristup internetu i prijenos multimedije
- niska latencija (vrijeme čekanja)
- jednostavna arhitektura protokola
- podržava učinkovit multicast/broadcast (emitiranje). [4]

Početkom 2010. godine 4G sustavi bili su u procesu implementacije. Međunarodna telekomunikacijska unija (ITU) izvorno je definirala 4G mrežu kao osposobljenu za isporuku preko 100 Mbit/s. Dvije godine kasnije postavili su novu ljestvicu na gigabitne brzine kada uređaji miruju i 100 Mbit/s za mobilne korisnike u pokretu. [1]

OFDMA (engl. Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) je tehnologija koja se koristi kako bi se omogućilo da više korisnika dijeli isti frekvencijski pojas. To se postiže dijeljenjem dostupnog frekvencijskog spektra na nekoliko uskopojasnih nositelja, od kojih je svaki ortogonalan jedan na drugi. Time se omogućuje istovremeni prijenos podataka, čime se osiguravaju visoke brzine prijenosa podataka i učinkovito korištenje spektra. Korištenje OFDMA omogućuje učinkovito pružanje multicast/broadcast usluga. Takvo pružanje usluga u komunikacijskom sustavu podrazumijeva da su iste informacije istovremeno dostupne na više terminala. [12]

Dva vodeća standarda četvrte generacije su LTE (engl. *Long Term Evolution*) i WiMAX (engl. *Worldwide Interoperability for Microwave Access*). LTE se smatra evolucijom univerzalnog mobilnog telefonskog sustava (UMTS). Osnovna arhitektura LTE-a sadrži zaseban sloj IP povezivosti za sve IP bazirane usluge i EPS (engl. *Evolved Packet System*) koji rukuje cjelokupnim postupkom komunikacije. LTE koristi OFDMA za pružanje visokih brzina prijenosa podataka. Može osigurati brzine preuzimanja do 100 Mbit/s i brzine prijenosa do 50 Mbit/s. [4] Za povećanje kapaciteta i poboljšanje pouzdanosti prijenosa podataka LTE podržava MIMO (engl. *Multiple-Input Multiple-Output*) tehnologiju. MIMO koristi više antena i na odašiljačkom i na prijemnom kraju komunikacijske veze i tako stvara višestruke putove za

prijenos podataka. Korištenje više putova za prijenos podataka može povećati pouzdanost prijenosa podataka čak i u područjima s puno smetnji. [12] LTE mreža potpuno je temeljena na IP-u (engl. *Internet Protocol*). To znači da koristi internetski protokol za prijenos i usmjeravanje paketa podataka. LTE je dizajnirana da podržava IPv6 (engl. *Internet Protocol Version 6*) kao temeljni mrežni protokol. [13]

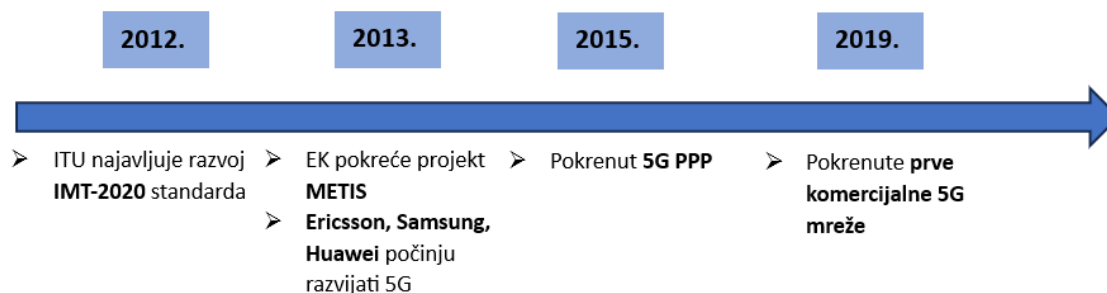
3. PETA GENERACIJA MOBILNIH KOMUNIKACIJSKIH SUSTAVA

Peta generacija komunikacijskih sustava temelji se na prijašnjim generacijama, ponajviše 4G LTE. Ova najnovija tehnologija podigla je standarde dosad neviđenom brzinom, kapacitetom i latencijom. S maksimalnom brzinom preuzimanja do 10 Gbit/s, 5G je izrazito brži od prijašnje generacije. To omogućava korisnicima da preuzmu velike datoteke za svega nekoliko sekundi, uživaju u neometanom video streamu visoke razlučivosti itd. Njegova nevjerojatna sposobnost upravljanja velikim brojem uređaja istovremeno ga čini katalizatorom za IoT (engl. *Internet of Things*). Uz znatno smanjenu latenciju u usporedbi sa svojim prethodnicima, 5G omogućuje odziv u stvarnom vremenu. Ovo je ključna karakteristika za aplikacije poput autonomnih vozila. Uz ova temeljna poboljšanja, 5G nudi brojne dodatne funkcije. Podržava više frekvencijskih pojaseva, optimizirajući pokrivenost i performanse u različitim okruženjima. Napredne sigurnosne mjere čine ga otpornijim na cyber prijetnje i štite integritet podataka u sve povezanijem svijetu. Također, 5G mreža podržava nove tehnologije kao što su telemedicina, autonomni automobili, proširena i virtualna stvarnost, otvarajući put novoj eri digitalnih inovacija.

3.1. Počeci i razvoj 5G sustava

Istraživanje pete generacije mobilnih komunikacijskih mreža počelo je 2012. godine kada je Međunarodna telekomunikacijska unija (ITU) započela program za razvoj IMT-2020 standarda. Europska komisija (EK) iste godine započela je istraživanje 5G tehnologije kroz financiranje istraživačkog projekta METIS (Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society). METIS je činio konzorcij od 29 partnera, uključujući proizvođače, operatere, automobilsku industriju i akademsku zajednicu. Partneri su bili iz različitih zemalja Europe, kao i iz Japana i Južne Koreje. Projekt je imao velik utjecaj na razvoj 5G mobilnih i bežičnih komunikacijskih sustava u Europi i svijetu. [17]

Kompanije kao što su Ericsson, Huawei i Samsung započinju istraživanje i razvoj 5G u 2013. godini. Ove tvrtke danas su vodeći dobavljači 5G opreme i tehnologije. 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) zajednički je projekt privatnog sektora i Europske komisije čiji je cilj bio ubrzati razvoj i implementaciju 5G mreža u Europi. 5G PPP najavljen je u prosincu 2013. godine, a službeno je pokrenut 2015. godine. Ovaj istraživački projekt pomogao je da Europa postane lider u razvoju 5G tehnologije. [17] Slika 3.1. prikazuje vremenski slijed ključnih događaja u razvitku 5G mreža.



Slika 3.1. Vremenski slijed događaja u razvitku 5G mreža [17]

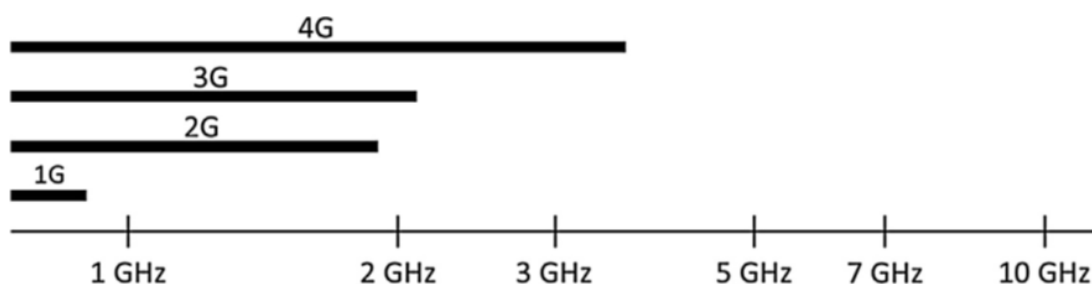
Peta generacija mobilnih komunikacijskih mreža prvi put je javnosti predstavljena početkom 2019. godine. Obećavala je isporučenje većih brzina prijenosa podataka, nižu latenciju, bolju pouzdanost i veću dostupnost od prethodnih generacija mobilnih mreža. 5G tehnologija koristi drugačiji skup radijskih frekvencija u odnosu na prethodne generacije, što je omogućilo ostvarenje tih obećanja. Također je dizajniran za podršku puno većeg broja povezanih uređaja, što je važno za aplikacije poput Interneta stvari (IoT). [14]

Prema izvješću Ericssona, otprilike 30% svih korisnika pametnih telefona će u 2023. godini prijeći na 5G pretplatu. To bi značilo da će do kraja 2023. godine broj korisnika u svijetu dosegnuti 1,67 milijardi. [15] Iako je i dalje 4G/LTE vodeća tehnologija mobilne mreže, očekuje se da će ga 5G prestići do 2027. godine.

Sami početci 5G bili su obilježeni velikom količinom uzbuđenja i optimizma, ali već sada je jasno da je to uistinu moćna tehnologija koja će promijeniti način na koji živimo i radimo. Još uvijek je u fazi razvoja, ali već ima značajan utjecaj. Kako tehnologija nastavlja sazrijevati, može se očekivati još više nevjerojatnih stvari koje će 5G omogućiti. [14]

3.2. Tehničke karakteristike 5G sustava

Jedan od ključnih čimbenika u osiguravanju optimalnog djelovanja mreže je učinkovito korištenje frekvencijskog spektra. Za razliku od prijašnjih generacija, 5G radi unutar šireg raspona spektra, koristeći raznolik skup frekvencija s različitim karakteristikama. Slika 3.2. prikazuje kako su 1G sustavi bili ograničeni na ispod 1 GHz, 2G do 1.9 GHz, 3G do 2.1 GHz i 4G do 3.5 GHz.[17]



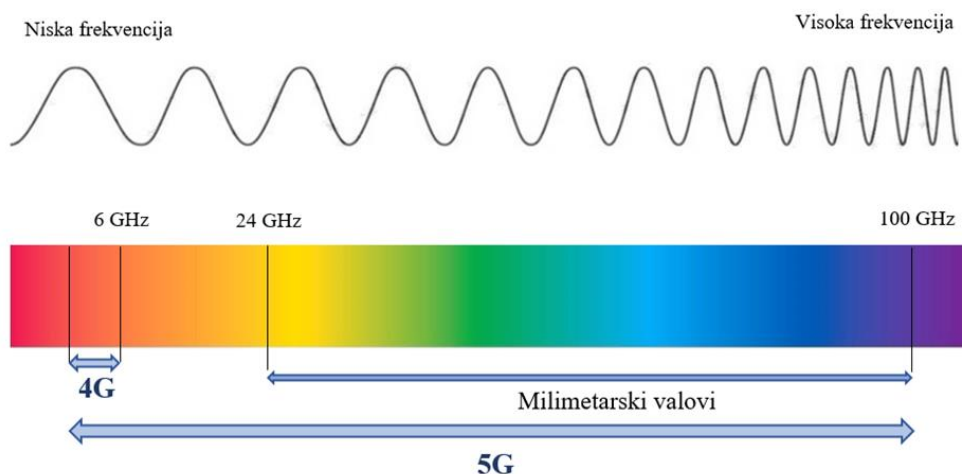
Slika 3.2. Spektralni rasponi generacija od 1G do 4G [17]

Frekvencijski pojasevi mogu se kategorizirati u niskofrekvencijske, srednjefrekvencijske i visokofrekvencijske pojaseve. Svaki frekvencijski pojas ima jedinstvene prednosti i različite svrhe. Odabir određenog frekvencijskog pojasa u 5G mrežama temelji se na pronalasku ravnoteže između potrebne pokrivenosti, kapaciteta, isplativosti i mogućnosti podnošenja većeg prometa.

Niskofrekvencijski pojasevi obuhvaćaju frekvencijski opseg ispod 1GHz. Ovi pojasevi nude široku pokrivenost te bolje prodiranje signala kroz prepreke kao što su zidovi, drveće, ograde i drugi objekti. Omogućuju manje brze prijenosa nego visokofrekvencijski pojasevi. [18]

Srednjefrekvencijski pojasevi obuhvaćaju frekvencijski opseg između 1GHz i 6 GHz. Ovi pojasevi postižu dobar odnos pokrivenosti i brzine prijenosa te se najčešće koriste u urbanim područjima. Njihova sposobnost prodora kroz prepreke i manja osjetljivost na smetnje od visokofrekvencijskih omogućava održavanje stabilnih veza. [17]

Visokofrekvencijski pojasevi obuhvaćaju frekvencijski opseg veći od 6 GHz. Visokofrekvencijski pojasevi smatrali su se neprikladnim zbog ograničenog dometa i slabijeg prodiranja kroz prepreke. Međutim, napredak u antenskoj tehnologiji i tehnikama prostornog filtriranja (engl. *beamforming*) omogućili su učinkovitije iskorištavanje ovih visokih frekvencija. Tehnika prostornog filtriranja omogućuje usmjeravanje signala prema određenim smjerovima kako bi se povećala efikasnost. Ovo povećava propusnost i omogućuje brži prijenos podataka, ali zahtjeva gusto postavljanje baznih stanica. [17] Prva faza 5G već je pokazala sposobnost rada unutar milimetarskog valnog raspona (mmWave), ukazujući na značajan napredak od prošle generacije. Na slici 2.3. prikazano je kako je prethodna generacija bila ograničena na niže frekvencije do 6 GHz, dok je 5G dramatično proširio spektralni raspon. [18]



Slika 3.3. 5G frekvencijski spektar u usporedbi s 4G [18]

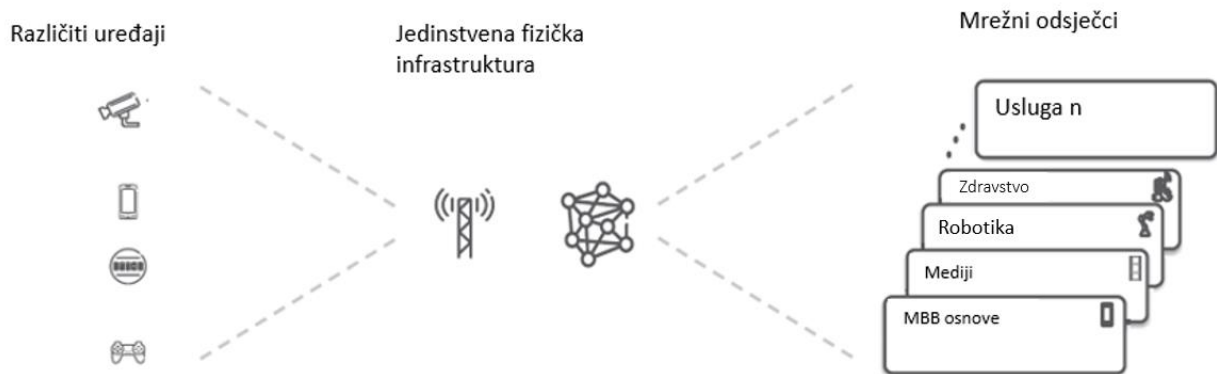
Uz korištenje širih frekvencijskih pojaseva značajan utjecaj na brzinu prijenosa i sveukupnu izvedbu imaju napredne sheme modulacije. Kao i kod 4G, ortogonalno frekvencijsko multipleksiranje (OFDM) glavna je napredna modulacijska shema za 5G. OFDM postiže visoku spektralnu učinkovitost i otpornost na smetnje, što je ključno za visoke brzine prijenosa podataka i nisku latenciju. [17]

MIMO tehnologija uznapredovala je u Massive MIMO drastičnim povećanjem broja antena. Većim brojem antena na baznoj stanici povećava se i prostorna svijest o okruženju bazne stanice. Ova svijest omogućava sustavu stvaranje preciznih i usmjerenih signalnih zraka prema pojedinačnim korisničkim uređajima. Opisana tehnologija učinkovito eliminira veliki dio smetnji gusto naseljenih područja, povećava pouzdanost i brzinu prijenosa podataka. Međutim, implementacija Massive MIMO-a dovodi i do povećanja složenosti, troškova i energije. [17] Oblikovanje dijagrama zračenja (engl. *Beamforming*) i masovni MIMO u budućnosti će doseći svoj pun potencijal kada u potpunosti iskoriste kratke valne duljine koje dolaze sa visokofrekvencijskim pojasevima. [19]

5G može postići latenciju do 1ms, što je 10 puta manje od 4G. Niska latencija je jedan od ključnih ciljeva razvoja 5G sustava, jer omogućava razvoj mnogim novim aplikacijama kao što su robotske operacije, autonomna vozila i virtualna stvarnost. Dijeljenje mreže (engl. *network slicing*) i rubno računalstvo (engl. *edge computing*) neke su od ključnih tehnologija koje su omogućile postizanje ultraniske latencije.

Network slicing omogućava stvaranje više virtualnih mreža koristeći jednu fizičku infrastrukturu. To znači da različite aplikacije mogu imati vlastitu namjensku mrežu sa specifičnim resursima i zahtjevima za performansama prilagođenima njihovim potrebama.

Rezultat je da se postiže pametnija raspodjela resursa i veće sposobnosti prilagodbe pružanja usluga. Na taj način se omogućuje različitim aplikacijama i korisničkim grupama da učinkovito dijele istu mrežnu infrastrukturu na način koji je učinkovit i prilagođen njihovim specifičnim potrebama. [17]



Slika 3.4. *Network slicing: postizanje prilagođenih usluga kroz dijeljenje infrastrukture [17]*

Slika 3.4. prikazuje načina na koji funkcionira network slicing u kontekstu mobilne mreže. Bazna stanica djeluje kao čvorište za komunikaciju, povezujući različite uređaje unutar svog područja pokrivenosti. To može uključivati niz uređaja poput pametnih telefona, kamera, autonomnih vozila itd. Na desnoj strani slike prikazani su mrežni odsječci (engl. network slices). Ovi mrežni dijelovi predstavljaju virtualne mreže koje su izdvojene iz ukupne mrežne infrastrukture. Svaki mrežni odsječak je prilagođen da služi specifičnim potrebama određene vrste uređaja ili aplikacije.

Rubno računalstvo (engl. edge computing) je distribucijski pristup koji se bavi izazovima stalno rastućih količina podataka koje generiraju uređaji Interneta stvari (IoT). Internet stvari je mreža uređaja koji su povezani s internetom i mogu prikupljati i razmjenjivati podatke o svom okruženju. Ovi uređaji generiraju značajnu količinu podataka, od kojih je velik dio potrebno obraditi i analizirati. Računalstvo u oblaku ovdje ima značajna ograničenja. Zato se pojavilo rubno računalstvo koje pohranu podataka približava krajnjem korisniku. To znači da se podaci ne moraju slati u udaljeni oblak za obradu, već se mogu obrađivati lokalno, na rubu mreže. To smanjuje vrijeme povratnog putovanja podataka, što rezultira nižom latencijom za kritične aplikacije. Tipično, "rub" na kojem se pružaju izvršni resursi je unutar ili na granici pristupne mreže. Međutim, oni se također mogu postaviti na mobilnim tornjevima, poduzećima, domovima, automobilima. Rubno računalstvo ima nekoliko prednosti, uključujući poboljšane performanse zbog smanjenja kašnjenja obrade podataka, poboljšanu sigurnost zbog blizine

izvoru i smanjene troškove. Slika 3.5. ilustrira arhitekturu rubnog računalstva te prikazuje odnos između oblaka, podatkovnog centra i ruba u rubnom računalstvu. [20]



Slika 3.5. Rubno računalstvo [20]

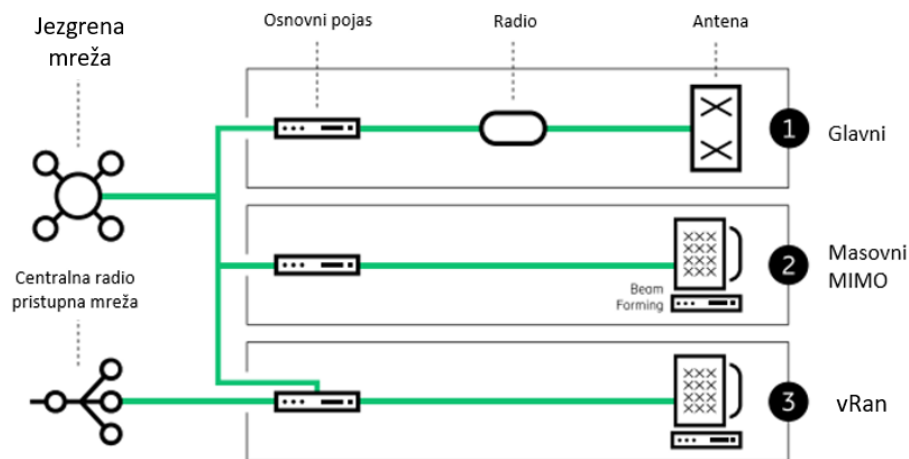
3.3. Arhitektura 5G sustava

Arhitektura 5G mreža pažljivo je dizajnirana kako bi dovela do značajnih poboljšanja u pogledu učinkovitosti i prilagodljivosti u usporedbi s prethodnim generacijama. 5G arhitektura sastoji se od četiri glavne domene:

1. Korisnička oprema ili UE (engl. *User Equipment*) su uređaji s kojima se korisnici povezuju s mrežom, poput pametnog telefona, tableta i laptopa.
2. Radio pristupna mreža ili RAN (engl. *Radio Access Network*), koja koristi radio frekvencije za uspostavljanje bežične veze s gore navedenim uređajima.
3. Jezgrena mreža ili CN (engl. *Core Network*), koja usmjerava promet preko različitih komponenti pristupne mreže, dok istovremeno osigurava povezanost s internetom.
4. Transportna mreža ili TN (engl. *Transport Network*), koja uspostavlja vezu između RAN-a i CN-a, uspostavljajući gladak prijenos informacija. [21]

RAN se sastoji od tri glavne fizičke komponente: osnovnog pojasa (engl. *baseband*), radija i antene. Osnovni pojas je dio RAN-a koji obrađuje podatke koji odašilju i primaju antene. Koristi posebno izrađenu elektroniku dizajniranu za pružanje velikih brzina obrade podataka te sadrži napredan softver s milijunima linija koda za pružanje učinkovite i sigurne bežične komunikacije. Radio je odgovoran za pretvaranje digitalnih informacija u signale kako bi se

mogli bežično prenositi te osigurava da se ti signali pridržavaju odgovarajućih frekvencijskih pojaseva. Antene su dijelovi koji se obično nalaze na baznim stanicama te one pretvaraju električne signale u radiovalove. Ove tri fizičke komponente radeći u harmoniji stvaraju visoko sofisticiran komunikacijski sustav i prikazane su na slici 3.6. [21]



Slika 3.6. *Komponente mobilne mreže [21]*

5G antene integrirane s radijima mogu učinkovito izvesti masivni MIMO i beam forming za razliku od tradicionalnih pasivnih antena. Neke integrirane 5G antene imaju veliku računalnu sposobnost i sadrže milijarde tranzistora. 5G RAN se razlikuje od prethodnih generacija po tome što je više oslonjen na softver. Ovo donosi mnogo prednosti kao što su ažuriranje na daljinu što omogućuje da se nove funkcionalnosti i sigurnosne nadogradnje implementiraju brzo i jednostavno. [21]

Jezgrena mreža ključni je dio svake mobilne mreže. Odgovorna je za usmjeravanje prometa korisničkih podataka, povezivanje s internetom, autentifikaciju i autorizaciju korisnika, te upravljanje mobilnom mrežom. EPC (engl. *Evolved Packet Core*) je posebna vrsta jezgrene mreže koja se koristi za LTE mreže, dok se u 5G mrežama koristi 5GC (engl. *5th Generation Core Network*). U 5GC mreži funkcije su podijeljene u dvije ravnine: kontrolnu (engl. *control plane*) i korisničku (engl. *user plane*). Kontrolna ravnina upravlja cjelokupnom mrežom i osigurava optimalnu izvedbu. Uključuje funkcije kao što su: [22]

- Network Slice Selection Function (NSSF) bira odgovarajuću mrežnu postavku za uređaj.
- Network Exposure Function (NEF) sigurno omogućava dijeljenje sposobnosti i ažuriranja između dijelova mreže.

- Network Repository Function (NRF) pronalazi usluge, pohranjujući njihove detalje za pristup drugima.
- Policy Control Function (PCF) upravlja pravilima mreže, provodi ih i obrađuje informacije o korisnicima.
- Unified Data Management (UDM) upravlja korisničkim vezama, dozvolama i uslugama poput slanja poruka.
- Application Function (AF) surađuje s mrežom, utječe na rute prometa i dozvole.
- Authentication Server Function (AUSF) potvrđuje pristup za poznate i nove uređaje.
- Access and Mobility Management Function (AMF) skrbi o vezama, pokretljivosti i upozorenjima uređaja.
- Session Management Function (SMF) upravlja sesijama, dodjeljuje IP adrese, prati upotrebu podataka i usmjerava tok prometa. [22]

Korisnička ravnina omogućuje izravnu komunikaciju između korisničkog uređaja i internetskog sadržaja. UPF (engl. *User Plane Function*) je glavna funkcija korisničke ravnine koja usmjerava i preusmjerava podatke te osigurava kvalitetu usluge. [22]

Kada se korisnički uređaj (UE) poveže na 5G mrežu, prolazi kroz početni registracijski postupak. To podrazumijeva odabir mreže, provjeru autentičnosti, autorizaciju i zakonito presretanje. Nakon registracije, uređaj se stavlja pod kontrolu funkcije upravljanja pristupom i mobilnošću (AMF). Sljedeća generacija RAN-a (NG-RAN) sastoji se od čvorova sljedeće generacije (gNodeB ili gNB) koji su povezani s jezgrom mreže (5GC) putem NG sučelja. Ovi čvorovi (gNB-ovi) mogu međusobno komunicirati preko Xn sučelja. AMF obavještava druge mrežne funkcije (NF) kao što su SMF, PCF ili NEF o mobilnosti i kretanju UE unutar mreže. Kako bi se razmijenili podaci s mrežom podataka (DN), koristi se postupak uspostave sesije Protocol Data Unit (PDU). UE šalje zahtjev za uspostavu PDU sesije AMF-u, koji zatim odabire odgovarajuću mrežnu funkciju sesije (SMF) i funkciju za upravljanje korisničkim podacima (UPF). Sučelje Xn između čvorova sljedeće generacije (gNB-ova) olakšava razmjenu signala i upravljanje mobilnošću, uključujući postupke poput primopredaje. [22]

Network Functions Virtualization (NFV) i Software-Defined Networking (SDN) predstavljaju ključne koncepte koji otvaraju nove mogućnosti u načinu na koji se mreže konstruiraju i upravljaju. NFV uvodi revolucionarnu promjenu virtualizacijom mrežnih funkcija

koje su prethodno bile vezane uz hardver. To rezultira virtualiziranim mrežnim funkcijama (VNF) koje se mogu učinkovito implementirati na standardnim poslužiteljima, povećavajući isplativost. S druge strane, SDN razdvaja kontrolnu i korisničku ravninu, osnažujući centralizirano upravljanje i programibilnost. To može dovesti do novih pristupa upravljanju resursima, kao što je dinamičko upravljanje kapacitetom mreže. Na primjer, SDN se može koristiti za automatsko dodavanje kapaciteta mreži kako se promet povećava. NFV i SDN donose značajne prednosti poput učinkovitost, pojednostavljeno upravljanje infrastrukturom i skalabilnost. Integracija NFV-a i SDN-a može dovesti do jedinstvene kontrolne i podatkovne ravnine, povezujući distribuirane elemente 5G mreže kroz infrastrukturu oblaka. To može pomoći 5G mrežama da se prilagode novim zahtjevima. [23]

U kontekstu bežične komunikacije, sigurnost igra ključnu ulogu kako bi se osigurala zaštita osnovnih elemenata komunikacijske infrastrukture. Tri osnovna aspekta sigurnosti koja su od izuzetne važnosti su:

1. Povjerljivost osigurava da samo ovlaštene sudionici mogu pročitati komunikaciju. Kako bi se to postiglo, komunikacija se šifrira. RAN i CN imaju pristup nešifriranim informacijama, ali samo za potrebe upravljanja mrežom.
2. Integritet osigurava da nitko neovlašten ne može modificirati komunikaciju. Mehanizmi za provjeru integriteta koriste se za provjeru da informacije nisu izmijenjene, kako na RAN tako i na CN razini.
3. Dostupnost osigurava da korisnici mogu pristupiti komunikacijskim uslugama bez prekida. RAN i CN podjednako su važni jer pružaju kritične usluge koje su potrebne za nesmetanu komunikaciju. [21]

3.4. Ključna područja usluge

ITU-R klasificira tri servisa koje podržava 5G bežična mreža. To su eMBB (engl. *enhanced mobile broadband*), mMTC (engl. *massive machine-type communications*) i URLLC (engl. *ultra-reliable and low latency communications*). eMBB se koristi kako bi se uspostavile stabilne veze sa vrlo visokim maksimalnim brzinama prijenosa podataka koje dolaze u kratkim navratima i umjerenim brzinama za korisnike na rubu ćelije. mMTC podržava veliki broj uređaja Interneta stvari (IoT) koji su sporadično aktivni i šalju manje podatkovne pakete. URLLC omogućuje prijenos malih paketa podataka s malom latencijom i vrlo visokom pouzdanošću s ograničenog skupa terminala. [24]

3.4.1. eMMB

eMMB se često smatra proširenjem 4G širokopojasnog servisa. Karakterizira se kao mogućnost podnošenja velikih opterećenja i uzorak aktivacije uređaja koji ostaje stabilan tokom dužeg vremena. Ovo omogućuje mreži da razvrstava bežične resurse uređajima tako da dva uređaja ne pristupaju istom resursu istovremeno. Cilj ove usluge je maksimizacija brzine prijenosa podataka uz održavanje umjerene pouzdanosti s greškom paketa na razini 10^{-3} . [24] To može biti korisno u smislu poslovnih aplikacija, olakšavajući prijenos podataka velikom brzinom u raznim okruženjima.

3.4.2. mMTC

Kao što je prije navedeno, mMTC omogućuje spajanje velikog broja mMTC uređaja. mMTC uređaji su povremeno aktivni i koriste malu fiksnu brzinu prijenosa u uplinku. Na jednu baznu stanicu (BS) može biti povezan veliki broj mMTC uređaja. U određenom trenutku samo slučajni podskup povezanih uređaja postaje aktivan i pokušava slati podatke. Ova nasumičnost kao i veliki potencijalan broj aktivnih mMTC uređaja kao rezultat nosi nemogućnost alokacije resursa uređajima unaprijed, umjesto toga potrebno je osigurati resurse koji se dijele putem slučajnog pristupa. Cilj ove usluge je maksimizirati stopu dolaska koja je podržana danim radio resursom. Greška paketa pojedinačnih mMTC transmisija je na razini 10^{-1} . mMTC stvara priliku za skalabilnost IoT-a za potrošače, poslovne i javne organizacije. [24]

3.4.3. URLLC

URLLC mreže podržavaju povremene transmisije, ali skup potencijalnih URLLC predajnik je znatno manji nego za mMTC. Kako bi URLLC prijenosi bili uspješni, zahtijevaju planiranje kako bi se osigurala određena razina predvidljivosti dostupnih resursa i s tim podržala visoka pouzdanost. Uz to potreban je i slučajni pristup kako bi se izbjegla situacije gdje velika količina resursa bude neaktivna zbog povremenog prometa. URLLC prijenos treba biti lokaliziran u vremenu radi niske latencije. Kako bi se postigla raznolikost koja je nužna za ostvarivanje visoke pouzdanosti koristi se više frekvencijskih ili prostornih resursa. Cilj URLLC mreže je osigurati veliku razinu pouzdanosti s greškom paketa na razini 10^{-5} , s druge strane brzina prijenosa je relativno niska [24]. Neki primjeri primjena ove tehnologije osjetljivih na latenciju i pouzdanost uključuju automatizaciju tvornica, autonomnu vožnju, daleku kirurgiju i prijenos novca.

3.4.4. OMA i NOMA

U heterogenom sustavu moguće je imati više usluga unutar iste mrežne arhitekture, ovo se omogućava pomoću network slicinga. Network slicing dodjeljuje računalne, memorijske i komunikacijske resurse mreže različitim uslugama koje su u određenom trenutku aktivne s ciljem osiguravanja njihove izolacije i prihvatljive razine performansi. U heterogenom sustavu, radio resursi se mogu dodijeliti na dva načina: ortogonalni višestruki pristup (OMA) i neortogonalni višestruki pristup (NOMA). OMA je klasičniji pristup koji dodjeljuje različite radio resurse različitim korisnicima. To osigurava da svaki korisnik ima ekskluzivnu upotrebu radio resursa, što može poboljšati performanse i kvalitetu usluge. Međutim, OMA može biti neučinkovita s velikim brojem korisnika. NOMA je noviji pristup koji omogućuje multipleksiranje više korisnika u istom radio kanalu. To se postiže tako da se korisnicima dodjeljuju različiti kodovi koji omogućuju da se njihovi signali razlikuju. NOMA može poboljšati spektralnu učinkovitost mreže i omogućiti istovremeno posluživanje korisnika s različitim zahtjevima za resurse. U heterogenom sustavu, OMA i NOMA mogu se kombinirati kako bi se zadovoljili različiti zahtjevi za usluge. Na primjer, OMA se može koristiti za eMBB usluge koje zahtijevaju visoke propusnosti, dok se NOMA može koristiti za URLLC usluge koje zahtijevaju pouzdanost i nisku latenciju. [24]

4. MJERENJA 5G SUSTAVA

U okruženju brzo razvijajućih telekomunikacija, razvoj i optimizacija 5G mreža su ključni. Kako se povećava potražnja za većim brzinama podataka i manjom latencijom precizna mjerenja igraju ključnu ulogu u procjeni performansi ovih mreža. Mjerenja pružaju dragocjene uvide u ponašanje 5G mreža u stvarnom svijetu, što omogućava operaterima da optimiziraju mrežne parametre i pruže najoptimalnije korisničko iskustvo. Mjerenje 5G sustava ključno je za osiguravanje da sustav zadovoljava potrebe korisnika. [25]

Postoje razni izazovi s kojima se 5G sustavi susreću i zahtijevaju okvir procjene kako bi se osigurao njihov učinkovit rad. Jedan od ključnih izazova je eksponencijalni rast količine mobilnih podataka. Ovo stvara potrebu za bržim prijenosom podataka uz održavanje pouzdanosti i minimalne latencije. Mjerenje brzine prijenosa podataka je metrika koja kvantificira koliko učinkovito 5G sustavi razmjenjuju podatke između uređaja i mreža. Rezultati tih mjerenja su važni ne samo zbog prikaza mogućnosti sustava, već i određuju njegovu kompatibilnost s određenim aplikacijama. Kod kritičnih aplikacija, kao što su autonomna vozila i udaljene operacije, čak i mala kašnjenja mogu dovesti do ozbiljnih posljedica. Stoga je mjerenje i procjena latencije ključno za određivanje praktične održivosti takvih sustava. 5G ne samo da poboljšava brzinu i latenciju, već i omogućuje povezivanje ogromnog broja uređaja, uključujući uređaje Interneta stvari (IoT). S predviđenom potrebom za 100 do 1000 puta većim kapacitetom trenutne mrežne veze, procjena metrike poput gustoće veze i gustoće podatkovnog prometa postaju važne. Udaljena područja i problematičan signal zahtijevaju preciznu opremu za povezivanje, dok rastuća potražnja za podacima zahtijeva učinkovitu upotrebu spektra. Procjena pokrivenosti 5G sustava, posebno u izazovnim okruženjima, određuje otpornost i korisnost, dok mjerenje i evaluacija učinkovitosti spektra igraju ključnu ulogu u optimizaciji resursa. Nadalje, zaštita okoliša i energetska učinkovitost pojavljuju se kao kritična pitanja. Integracija 5G zahtijeva više frekvencijske pojaseve, što dovodi do povećane snage prijenosa signala i postavljanja baznih stanica koje troše više energije. Usklađivanje sve veće potrošnje energije i održivosti postaje izazov i za operatere i za korisnike. Ovdje mjerenje i procjena energetske učinkovitosti igraju važnu ulogu u osiguravanju dugovječnosti tehnologije uz smanjenje njezinog utjecaja na okoliš. [25]

Ključni pokazatelji uspješnosti (KPI) su mjerni parametri koji pružaju uvid u različite aspekte i performanse sustava. Omogućuju razumijevanje kako se sustav ponaša u različitim situacijama. Ovi pokazatelji koriste se za donošenje odluka i optimizaciju sustava. Primjerice,

ako je određeni KPI izvan željenih granica, to ukazuje na potrebu za promjenom ili poboljšanjem određenog dijela sustava. [25]

Analitički hijerarhijski proces (AHP) služi kao metodologija za sveobuhvatnu procjenu performansi 5G sustava. AHP koristi hijerarhijski okvir za strukturiranu procjenu različitih ključnih pokazatelja uspješnosti (KPI). Uspostavljanjem hijerarhijske strukture AHP pruža uvid u složene relacije između čimbenika koji utječu na performanse 5G sustava. To je važno jer neki čimbenici mogu biti u suprotnosti jedni s drugima, a hijerarhija omogućuje AHP-u da uravnoteži ove čimbenike i da se lakše donesu odluke optimalne za ukupne performanse sustava. [25]

4.1. Mjerenje i testiranje 5G tehnologije u RH

Tehnologija pete generacije se i dalje smatra relativno novom i još uvijek postoji određena zabrinutost oko sigurnosti elektromagnetskog polja koje ona stvara. Granične vrijednosti ozračenosti ljudi neionizirajućim zračenjem propisane su u Prilogu II. Preporuke Vijeća 1999/519/EC. U Europskoj uniji, granična vrijednost izloženosti elektromagnetskom polju u frekventijskom pojasu od 3,6 GHz je 61 V/m. Ova vrijednost se određuje na temelju procjene rizika od štetnih učinaka neionizirajućeg zračenja na zdravlje. [26] Republika Hrvatska jedna je od zemalja koja je propisala stroža ograničenja utjecaja elektromagnetskih polja od Preporuke Vijeća. Granična razina jakosti električnog polja radijskih postaja u frekventijskom pojasu 3,6 GHz iznosi 24,4 V/m na području povećane osjetljivosti (u blizini bolnica, škola, vrtića) i 58 V/m na javnim područjima. U ostatku svijeta, granične vrijednosti variraju od zemlje do zemlje, ali su u većini slučajeva slične vrijednostima Europske Unije. [27]

Hrvatska regulatorna agencija za mrežne djelatnosti (HAKOM) provodi mjerenja izloženosti 5G polju kako bi osigurao da se poštuju preporučene granične vrijednosti. Mjerenje se provodi na najmanje šest mjernih točaka koje predstavljaju područja s najvećim izloženostima elektromagnetskim poljima. Broj mjernih točaka može biti veći, ovisno o potrebama i specifičnim uvjetima mjerenja. Na odabranoj mjernoj točki provjerava se stanje radiofrekventijskog spektra u rasponu od 0,1 do 2500 MHz. U tom rasponu se nalaze značajni izvori elektromagnetskog polja, poput radijskih postaja. Za provođenje ovih mjerenja koristi se posebna oprema koja uključuje mjerni prijamnik ili analizator spektra te odgovarajuće mjerne antene. Mjerna antena se standardno postavlja na visini od 1,5 metara iznad tla. Mjerenje se provodi za svaku od tri osi polarizacije elektromagnetskog vala. Kako bi se osiguralo što preciznije mjerenje, preporučuje se udaljšavanje osoba od mjernih antena na određenu udaljšenost

koja ovisi o frekvencijskom području. Važno je održavati stabilnu temperaturu okoline tijekom mjerenja kako bi se smanjila nesigurnost u mjerenjima. [27]

Testiranje koje je proveo HAKOM u lipnju 2020. godine, pružilo je neke dokaze o sigurnosti 5G tehnologije. U ovoj studiji, provedena su precizna mjerenja elektromagnetskog polja u frekvencijskom pojasu od 3,6 GHz u gradu Osijeku, koji je bio odabran kao prvi hrvatski 5G grad. Rezultati su pokazali da su razine elektromagnetskog polja znatno ispod propisanih graničnih vrijednosti te sigurni za ljudsko zdravlje, čak i u blizini baznih stanica. [28]

Deutsche Telekom i Europska svemirska agencija (ESA) rade na razvoju hibridnih mreža koje će kombinirati zemaljske i nezemaljske mreže. Hibridne mreže mogu pružiti otpornost i sigurnost u slučajevima poremećaja zemaljskih mreža, kao što su prirodne katastrofe. U 2023. godini, Deutsche Telekom je uspješno proveo testiranja hibridne mreže u Hrvatskoj, koristeći Intelsatov satelitski sustav. Testovi su izvedeni u Puli i uključivali su prijenos podataka između standardnog 5G telefona i HAPS (engl. *high altitude platform station*) platforme. Postignute su podatkovne brzine do 200 Mbit/s, što je znatno brže od brzina koje su dostupne na većini zemaljskih mreža. Testovi su pokazali da hibridne mreže mogu pružiti neprekinutu povezanost, čak i u slučaju poremećaja zemaljskih mreža. Hibridne mreže su još uvijek u razvoju, ali imaju potencijal revolucionirati način na koji komuniciramo. Mogle bi pomoći žrtvama katastrofa da ostanu povezane i da dobiju pomoć, a također bi mogle riješiti problem nedostatka internetskog pristupa u ruralnim ili udaljenim područjima. [29]

5. PRIMJENA 5G MREŽE

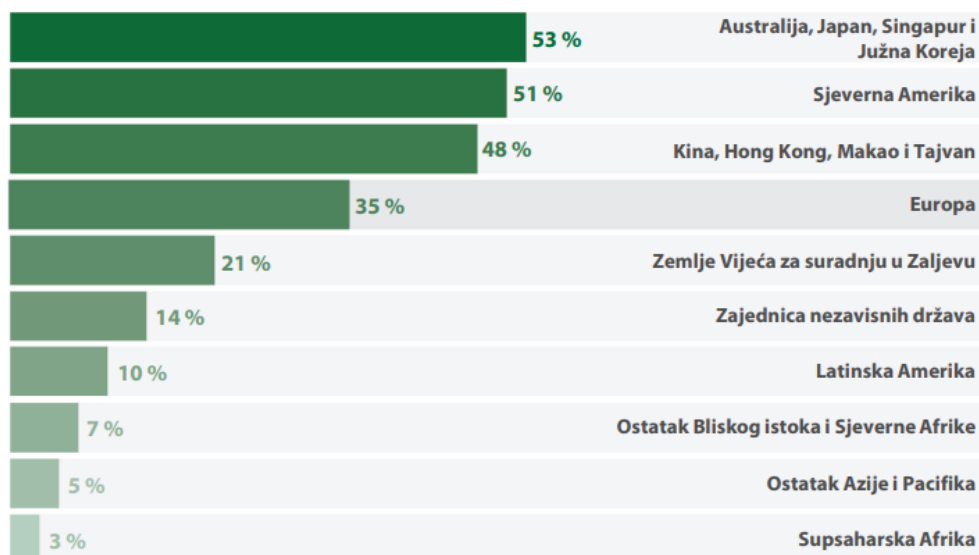
Razlog rapidnog razvoja 5G mreža je potencijal za unaprjeđenje svakodnevnog života ljudi diljem svijeta i velike napretke u drugim dijelovima IT svijeta. 5G usluge su nužne za brojne inovativne aplikacije koje bi mogle revolucionarizirati razne aspekte gospodarstva unutar EU, a i šire. U studiji iz 2017. godine provedenoj unutar EU spekulira se da bi uvođenje 5G tehnologija u sektore automobilske, zdravstvene, prometne i energetske industrije moglo dovesti do porasta profitabilnosti u razini od 113 milijardi eura godišnje. Uz to isti studij govori ga bi ovakvim napretkom moglo doći do otvaranja čak 2,3 milijuna novih radnih mjesta. Nadalje, u studiju iz 2021. godine zaključeno je da bi doprinos 5G mreža BDP-u EU država mogao iznositi 1 milijardu eura te otvoriti ili promijeniti čak 20 milijuna radnih mjesta u svim sektorima gospodarstva. [30]

Napredak u 5G tehnologiji će drastično utjecati na četvrtu industrijsku revoluciju kojoj je cilj modernizirati i digitalizirati načine proizvodnje. Uz to utjecaj će biti očit i na područjima poput virtualne i proširene stvarnosti, dizajnu i stvaranju pametnih gradova, na raznim područjima medicine itd. Na slici 5.1. može se vidjeti kako bi 5G mogao utjecati na sve aspekte života. [30]



Slika 5.1. Područja primjene 5G mreža [30]

Europska unija (EU), kao i ostatak svijeta, intenzivno ulaže u napredak 5G tehnologije. Kada se uzme u obzir pokrivenost 5G mreža u dijelu mobilnih mreža EU zaostaje iza država poput Japana, Južne Koreje, Kine i drugih kao što je prikazano na slici 5.2. [30]



Slika 5.2. Udio 5G mreža naspram ukupnih mobilnih mreža do 2025. [30]

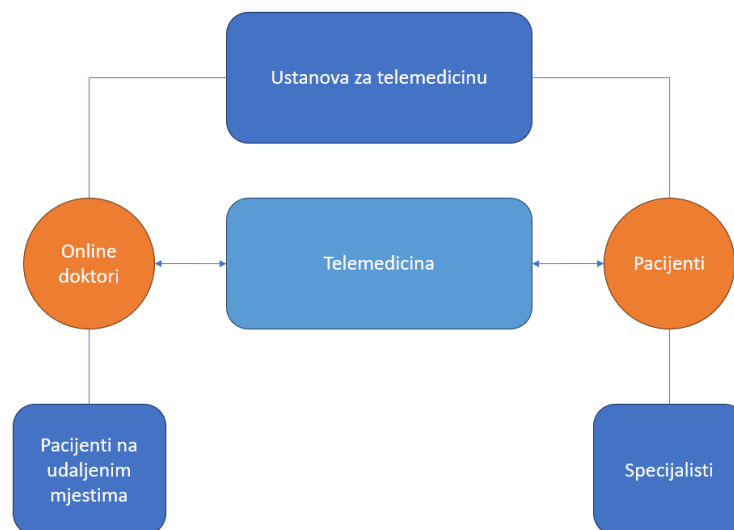
5.1. Industrija 4.0

Četvrta industrijska revolucija je trenutna faza industrijske transformacije i nastala je kao posljedica evolucije u području tehnologije. Predstavlja društvene, tehnološke i ekonomske promjene koje utječu na sve razvijene zemlje. Ova revolucija zasniva se na stvaranju kolaborativnog i integriranog okruženja s ciljem da se dodaju kibernetско-fizički sustavi i da se kupac smatra dijelom procesa proizvodnje. To znači da se testiranje proizvoda provodi prije nego što se proizvod šalje na tržište. Na ovaj način se može predviđati što će se dogoditi i kakva će reakcija biti na proizvod prijevremeno te omogućuje kvalitetnije investiranje na temelju tih podataka. Više nego u prošlim revolucijama, većina tehnološkog napretka koja ja ostvarena dostupna je široj populaciji. Ova industrijska revolucija je usmjerena na automatizaciju i digitalizaciju proizvodnje, te integraciju proizvodnje i IT sustava. Glavne stupove ove revolucije čine kibernetско-fizički sustavi koji će biti autonomni, sposobni donositi vlastite odluke. Uz to, ovi sustavi će prikupljati podatke u stvarnom vremenu i slati ih u cloud. Nakon toga, pomoću principa strojnog učenja, sustavi će učiti od tih podataka. Zbog stalnog skupljanja informacija, ovi stupovi su usko vezani uz Big Data i analitiku podataka. Također, IoT je povezan s stupom kibernetске sigurnosti zbog interakcije između uređaja povezanih na internet koji stalno komuniciraju jedni s drugima, što ih čini izuzetno ranjivim na računalni napad. Brzi prijenos podataka koji je nužan za ove napretke omogućiti će, po nekima, najbitniji aspekt četvrte industrijske revolucije, a to su 5G mreže. Postoje i negativni aspekti ove revolucije, posebno u pogledu utjecaja na ljudski život. Jedan od najvećih izazova je negativan utjecaj na tradicionalni proizvodni model no ne postoji dovoljno svijesti kako bi se negativne posljedice spriječile. Uz to

postoji i problem onečišćenja. Zbog stalnog i brzog napretka dolazi do bacanja velike količine plastike i metala u okoliš. Računala, mobiteli, automobili sve brže postaju zamjenjivi novijim i boljim verzijama. [31]

5.2. Medicina i 5G

Razvoj 5G mreža ima veliki utjecaj na medicinu. Poboljšanja koja donosi 5G rezultiraju će pouzdanijom povezanošću i bržom komunikacijom između uređaja koji se koriste u pametnom zdravstvenom sustavu. Veliki napredak bi dobilo područje telemedicine, ostvarujući radnicima fleksibilniji način rada. Područja gdje nema mnogo liječnika bi mogla biti lakše pokrivena. Umjesto da pacijent dolazi liječniku na pregled, 5G mreža može lagano povezati liječnike i pacijente diljem svijeta putem video konzultacije bez brige o slabijoj konekciji koja otežava rad i povećava frustraciju. Slika 5.3. prikazuje izgled korištenja telemedicine za doktore i pacijente. [32]



Slika 5.3. Telemedicina: Povezivanje doktora i pacijenata [32]

Automatizacija medicinskih procesa poboljšala bi efikasnost cijelog sustava. Napredak u informacijsko-komunikacijskoj tehnologiji ima potencijal donijeti značajnu transformaciju u zdravstvenom sustavu povezivanjem medicinskih uređaja, automatizacijom financijskih transakcija i sprječavanjem pogrešaka kako bi se povećalo povjerenje pacijenata u zdravstveni sustav. [33]

Mnogi oblici slika koje se često koriste u medicini su vrlo velike slike koje zauzimaju dosta memorije, primjerice MRI skeniranja, rendgenska snimanja itd. Ove slike ne može čitati

bilo tko te se moraju slati specijalistu na pregled. Do sada korištene mreže su stvarale probleme poput dugotrajnog ili neuspješnog slanja slike. Ovakvi problemi često rezultiraju dužim vremenima čekanja za pacijente i usporava dobivanje odgovarajućeg tretmana. Dodavanjem 5G mreže sustav bi postao učinkovitiji i brži u aspektu slanja velikih količina datoteka i slika. [32]

Robotska kirurgija postaje izvediva uz uvođenje 5G mreža. Upravljanje operacijom online na siguran način moguće je samo ako su mreža i veza vrlo pouzdani i brzi. Prva telekirurgija već je uspješno odrađena u Kini. [32]

Umjetna inteligencija sve češće postaje alat za određivanje dijagnoze i odabira najboljeg plana liječenja za pacijenta. 5G mreže bi omogućile korištenje alata umjetne inteligencije tako što omogućuju prijenos velike količina podataka koje se koriste u strojnom učenju u stvarnom vremenu. [30] Predviđa se da bi uvođenjem ovakvog oblika dijagnostike u medicinski sustav SAD-a donijelo uštedu od 150 milijardi dolara godišnje. [33]

Uvođenje 5G će pomoći i farmaceutskoj industriji. Klinička ispitivanja u velikoj mjeri ovise o konstantnom toku podataka koji detaljno opisuju odgovore pacijenata na terapije koje se testiraju. Nekada sudionici u ispitivanju sami mjere svoje vitalne znakove svaki dan i šalju ih online. 5G infrastruktura daje mogućnost i poticaj farmaceutskim proizvođačima da tijekom ispitivanja u domove ispitanika postave IoT uređaje za promatranje stanja pacijenta u sustavu sličnom onom prikazanom na slici 5.4. [34]

Rezultat ovoga bi bio smanjenje administrativnog posla, manji troškovi obrade što bi dovelo do mogućnosti većeg broja ispitanih ljudi. Dostupnost podataka u stvarnom vremenu mogla bi skratiti ciklus ispitivanja. To bi moglo značiti da tvrtke mogu brže staviti lijekove na tržište ili brže zaustaviti ispitivanja koja ne daju dobre rezultate.



Slika 5.4. Medicinski sustav koji koristi IoT [34]

5.3. Pametni gradovi

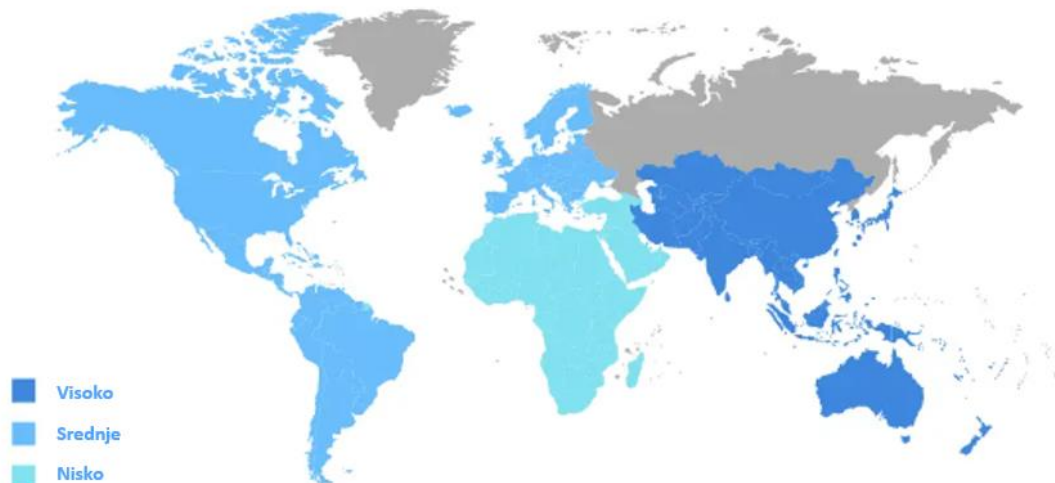
Urbanizacija je jedan od najbitnijih procesa u današnjem svijetu. Preko 50% svjetske populacije živi u gradovima. Kako se urbanizacija ubrzava, očekuje se da će preko 70% populacije živjeti u gradovima do 2050. godine. Ovo dovodi do novih problema. Prometne gužve, zagađenje, nestašica resursa, manja kvaliteta života i ostali problemi postaju sve češći te uzrokuju težu održivost gradova. Prvi projekti pametnih gradova datiraju u prošlo stoljeće. Već 1999. godine Singapur je objavio svoj plan za „inteligentni otok“. Ovaj plan je uključivao aspekte poput smanjenja potrošnje energije, smanjenje prometnih gužvi itd. Načini za rješavanje postavljenih problema su napredovali drastično od tada te je tako napredovala i promijenila se ideja pametnog grada. [35]

Ideja pametnoga grada zamišljena je s ciljem da riješi ove probleme pomoću naprednih IT tehnologija koje bi ostvarile održivi razvoj grada. Ključne tehnologije u ovom razvoju su 5G mreže, IoT, analiza velikih količina podataka, geoinformacijski sustavi itd. [35] Koristeći ove tehnologije pametni gradovi žele pokriti 6 glavnih aspekata:

- Pametno gospodarstvo (e-trgovine, pametan prijevoz, pametna proizvodnja)
- Pametna mobilnost (autonomna vozila, pametni semafori)
- Pametno okruženje (obnovljivi izvori energije, čišćenje onečišćenja, čuvanje vode)
- Pametne osobe (online platforme za učenje, telemedicina)
- Pametan život (pametni domovi, javni Wi-Fi)

- Pametno upravljanje (portali za podatke, usluge e-uprave) [36]

Ideja pametnih gradova nije lokalizirana na jedan prostor, to je ideja koja se proširila po cijelom svijetu. Slika 5.5. prikazuje zastupljenost interesa za pametne gradove u svijetu.



Slika 5.5. *Interes za pametne gradove diljem svijeta [37]*

Koliko značajnu ulogu 5G mreže imaju u razvoju pametnih gradove može se prikazati nekim mogućnostima koje one donose kao što su daljinsko upravljanje vozilima, autonomna vožnja, upravljanje prometom, mobilno policijsko patroliranje s proširenom stvarnošću, telemedicina, epidemiološka prevencija i kontrola itd. [35]

5.4. Virtualna i proširena stvarnost

Proširena stvarnost (AR) obuhvaća tehnologiju koja omogućuje obogaćivanje okruženja oko osobe dodatnim informacijama. Virtualna stvarnost (VR) omogućuje potpunu zamjenu stvarnog svijeta virtualnim. AR i VR mogu pružiti korisnicima nevjerojatno iskustvo koje mijenja stvarnost oko njih, ali ova tehnologija je izrazito zahtjevna. Mora postojati infrastruktura koja može pružiti čvrste garancije za visokokvalitetne videozapise od 360°, dvosmjernu interakciju s niskom latencijom manjom od 20 milisekundi, preciznu lokalizaciju te orijentaciju korisnika. Koristeći 5G, ova iskustva se mogu ponuditi ljudima na osobnim uređajima, na daljinu ili u pokretu čime se otvara mogućnost za mnoge primjene ove tehnologije. [38] S razvojem ove tehnologije, virtualna stvarnost (VR) i proširena stvarnost (AR) će se vjerojatno ujediniti u jednu kategoriju proširene stvarnosti (XR). [39]

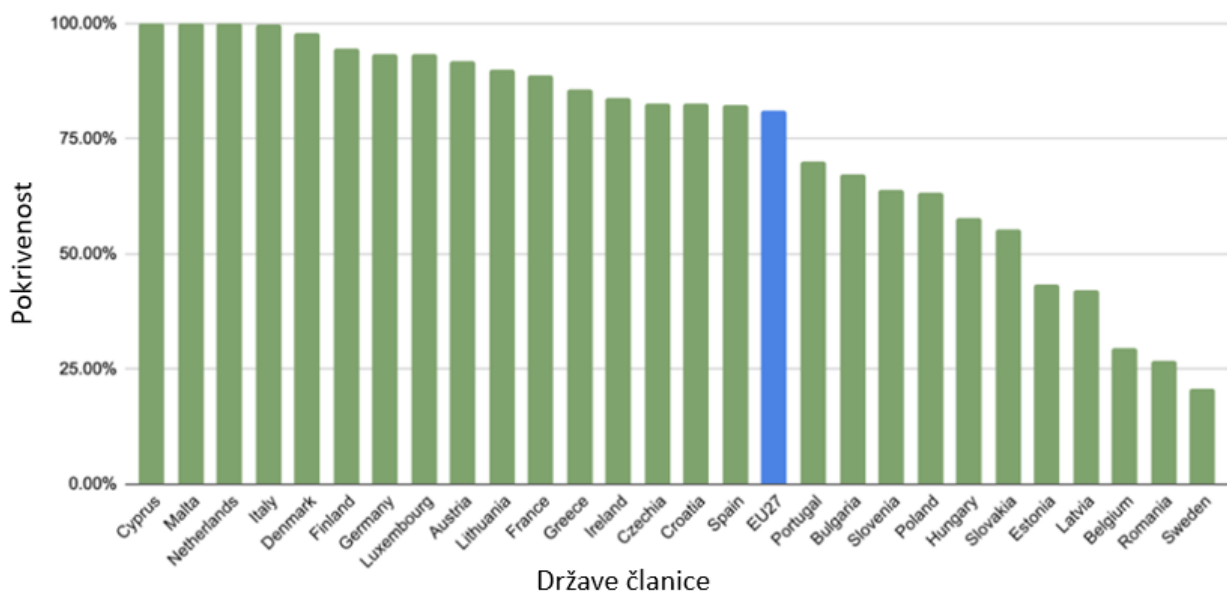
Nakon desetljeća razvijanja, proba i poboljšanja softvera i hardvera, ovaj oblik tehnologije se sve više implementira u obrazovanje, igre, multimediju, navigaciju, komunikaciju

itd. Ovo razvijanje je dovelo do toga da XR tehnologije ne moraju biti ograničene na jedan nosiv uređaj, iako i to je mogućnost, već postoje puna virtualna okruženja koja uključuju interaktivne heads-up zaslone. Najčešći tip hardvera kojem potrošači imaju pristup je nosiva kaciga s prikazom (HMD). Uz to postoje mogućnosti korištenja XR sa mobilnim telefonima, igraćim konzolama i drugim uređajima no HMD-ovi nude najbolje iskustvo. [39]

Područje koje će izrazito napredovati zbog uvođenja proširene i virtualne stvarnosti pomoću 5G je područje obrazovanja. Proširena stvarnost će se koristiti kao podrška u dijeljenju znanja kroz obilježja okruženja te će pružiti pomoć učenicima s posebnim potrebama. Na ovaj način oni mogu efikasnije učiti kroz odgovarajuće vizualne, slušne i taktilne komponente sučelja koje nude razni pristupi ovoj tehnologiji. S druge strane virtualna realnost je korisna za laboratorijske aktivnosti u kojima se treba manipulirati objektima na realističan način kako bi se simulirale posljedice takvih kretnji, korisno za interaktivni prikaz zakona fizike i sl. [38]

6. 5G U HRVATSKOJ I SVIJETU

Diljem svijeta 5G mreže su sve učestalije i među glavnim pokretačima implementacije ove nove tehnologije nalazi se Europska Unija. Prema novim istraživanjima iz 2023. godine saznaje se da sve države članice Europske Unije imaju dostupnu 5G mrežu koja se koristi za komercijalne svrhe u barem jednom dijelu države. Uz to, unutar granica EU-a nalazi se ukupno 310 000 baznih stanica za 5G mreže. Zahvaljujući tome, EU se može pohvaliti da je 81% populacije pokriveno 5G sustavom. Najmanja pokrivenost je u državama poput Švedske, Rumunjske i drugih, što je prikazano na slici 6.1. [40]



Slika 6.1. Postotak prekrivenosti naseljenih dijelova država članica EU 5G mrežom (2023.) [40]

Najveću konkurenciju EU predstavljaju Kina, SAD, Japan i Južna Koreja. EU se od njih razlikuje svojom pozicijom kao unija više suverenih država koje svaka ima određenu dozu autonomije. Zbog ovoga konkurencija ima ujednačen pristup usvajanju ove tehnologije dok EU ima više različitih pristupa kod raznih država članica. Unatoč tome što EU ima određene postavljene standarde nisu sve države u istom stadiju uspostavljanja tih standarda. U Europskoj uniji frekvencijski pojasevi koji će se koristiti za 5G mreže su 700 MHz, 3.6 GHz te 26 GHz, no nisu sve države članice usvojile ove frekvencijske pojaseve. Frekvencijski pojas od 26 GHz još uvijek se relativno malo koristi, jer ga je dosad samo 10 država članica uvelo. [40]

Više ujednačen pristup razvoju ove tehnologije je urodio plodom u državama kao što su Kina i Južna Koreja koje su daleko ispred EU, SAD-a i Japana što se tiče implementacije 5G

mreža. Slika 6.2. prikazuje usporedbu broja baznih stanica i 5G pretplatnika na međunarodnim tržištima. Južna Koreja ima najviše 5G baznih stanica po sto tisuća stanovnika, a slijede je Kina, EU, Japan pa SAD. Ovo sugerira da je Južna Koreja predvodnik u implementaciji 5G te je u dobroj poziciji da ima koristi od ekonomskih i društvenih prednosti 5G tehnologije. [40]

	Kina 	Južna Koreja 	Japan 	SAD 	EU 
Broj 5G baznih stanica	2,290,000	215,000	50,000	100,000	309,342
Populacija države	1,402,000,000	51,780,000	125,800,000	329,500,000	447,706,000
Broj 5G baznih stanica po 100000 stanovnika	163	415	40	30	69
Broj 5G pretplatnika	357,000,000	25,000,000	14,190,000	79,000,000	31,000,000
Broj 5G pretplatnika po 100000 stanovnika	25,464	48,281	11,280	23,976	6,924

Slika 6.2. Usporedba uvođenja 5G na međunarodnim tržištima (2023.) [40]

Države su u žurbi kako bi što prije uvele kompetentne i robusne 5G mreže zbog izrazitih ekonomskih beneficija koje bi slijedile. Po istraživanju provedenom 2021. predviđa se kako bi BDP SAD-a narastao za 484 milijarde dolara, Kine za 220 milijardi dolara, Japana za 76 milijardi dolara te Južne Koreje za 30 milijardi dolara ukoliko se 5G implementira učinkovito i pouzdano. [41]

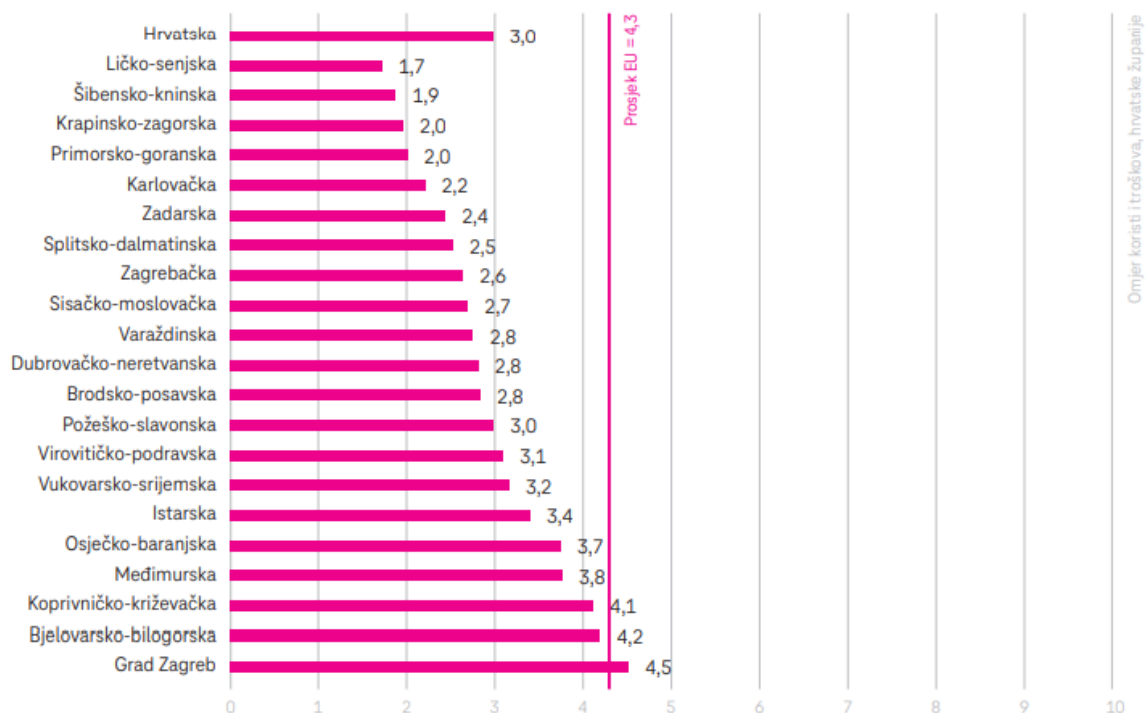
6.1. Ekonomski učinci 5G u Republici Hrvatskoj

5G mreža u Hrvatskoj koristi različite frekvencijske pojaseve poput 700 MHz, 3,6 GHz i 26 GHz kako bi omogućila brzu i pouzdanu mobilnu komunikaciju. Postojeći spektar koji se koristi za prethodne generacije mobilnih mreža prilagođava se za istovremenu upotrebu 5G tehnologije putem dinamičkog dijeljenja spektra (DSS). U 2020. godini, Hrvatski Telekom je prvi uveo komercijalnu 5G mrežu putem DSS-a, a i drugi operateri slijede isti put nakon dobivanja odgovarajućih dozvola od regulatornog tijela HAKOM-a. [42]

Daljnji razvoj 5G infrastrukture planira se kroz javne dražbe za dodjelu prava korištenja frekvencijskih pojaseva poput 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz i 2600 MHz, ovisno o

potrebama i tehnološkom napretku. HAKOM će i dalje podržavati razvoj 5G tehnologije u Hrvatskoj kako bi se iskoristili njezini potencijali u gospodarstvu i društvu. [42]

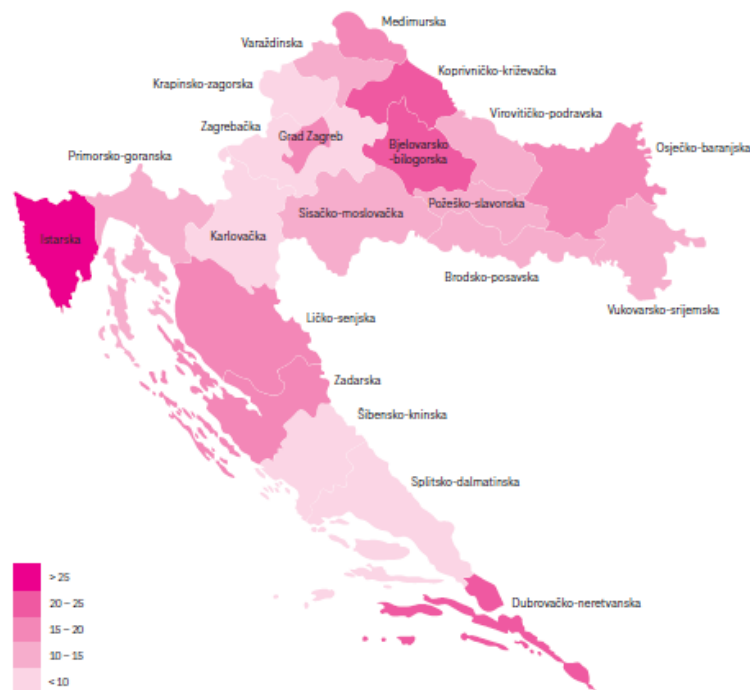
Uvođenje 5G infrastrukture u Hrvatskoj ima značajne potencijalne ekonomske koristi koje su istražene za četiri ekonomska klastera: Pametna proizvodnja, Pametno selo, Pametan grad i Pametna javna uprava. Analiza ukazuje na izvanredan omjer koristi i troškova, s ukupnim koristima od 1,33 milijarde eura, što je trostruko veće od predviđenih ulaganja od 445 milijuna eura. Hrvatska se s omjerom od 3,0 smješta na 19. mjesto u Europi, što upućuje na isplativost 5G infrastrukture. Godišnja neto korist po stanovniku iznosi 14,5 eura, dok je neto korist u odnosu na bruto domaći proizvod 1,72 posto. Najveće koristi očekuju se u klasteru Pametno selo, gdje svaki uloženi euro može generirati 4,3 puta više koristi. Klaster Pametna proizvodnja i logistika također donosi značajne koristi od 507 milijuna eura uz ulaganje od 228 milijuna eura. Na slici 6.3. prikazani su omjeri koristi i troškova po hrvatskim županijama. [42]



Slika 6.3 Omjer koristi i troškova po županijama [42]

Uvođenje 5G mreže ima potencijalni utjecaj na različite sektore, poboljšavajući konkurentnost i potičući gospodarski rast. U prerađivačkoj industriji, 5G može dovesti do povećanja proizvodnje i učinkovitosti kroz automatizaciju i Internet stvari. Javne usluge mogu poboljšati kvalitetu života građana kroz bolje upravljanje gradskim resursima i modernizaciju e-uprave. Trgovina na veliko i malo može se promijeniti s bržim rastom online trgovine i personaliziranim ponudama za kupce. Financijski sektor može imati koristi od bržih i sigurnijih

financijskih transakcija te analizu velikih količina financijskih podataka uz primjenu umjetne inteligencije. Dodatno, uvođenje 5G mreže potencijalno će imati značajan utjecaj na poslovanje poduzetnika. To uključuje povećanje izvozne sofisticiranosti, smanjenje troškova poslovanja i povećanje prihoda od prodaje. Također, otvorio bi se potencijal za trostruko veći udio novih poduzeća u ukupnoj broju poslovnih subjekata, što bi značajno doprinijelo većoj dinamici na tržištu hrvatskog gospodarstva. Sve ove promjene zajedno doprinose iskorištavanju prednosti 5G mreže za razvoj gospodarstva i društva. Na slici 6.4. prikazana je neto korist po stanovniku u eurima. [42]



Slika 6.4. *Neto korist po stanovniku (EUR) [42]*

Grad Dubrovnik, poznat po svojoj bogatoj povijesti i prekrasnom prirodnom okruženju, među prvima je u Hrvatskoj koji je implementirao 5G tehnologiju. Dubrovnik je prepoznao vrijednost novih tehnologija i implementirao brojne projekte pametnog grada, uključujući najveći projekt pametnog parkinga na NB IoT mreži u svijetu, koji obuhvaća više od 1.900 parkirnih senzora pokrivajući cijeli gradski prostor za parkiranje. Grad je također opremio luku, škole i vrtiće sensorima za praćenje kvalitete zraka i okolišnih uvjeta. No najvažniji korak prema budućnosti Dubrovnika predstavlja primjena 5G mreže. Ova nova generacija mreže omogućit će integraciju Interneta stvari (IoT) u svakodnevni život građana, pružajući brz i pouzdan okvir za daljnji razvoj. Brza latencija i visoka brzina prijenosa podataka omogućit će građanima i gradu

pristup obilju podataka u stvarnom vremenu. 5G mreža igra ključnu ulogu u smanjenju ovisnosti Dubrovnika o turizmu. Postavlja temelje za razvoj održivog turizma i promiče Dubrovnik kao vodeću destinaciju za digitalne nomade u Hrvatskoj. Dubrovnik se ne samo transformira u tehnološki napredan grad već i pruža inspiraciju za ostale gradove u traganju za održivim budućnostima. [42]

U Kutjevu, poznatom po svojoj bogatoj vinskoj tradiciji, 5G tehnologija i dronovi revolucioniziraju vinogradarstvo. Kutjevo d.d., jedan od vodećih hrvatskih proizvođača vina s gotovo 800 godina tradicije, koristi 5G mrežu kako bi unaprijedio kontrolu nad vinogradima. Implementacija dronova i digitalnih tehnologija omogućuje precizno praćenje vinogradarske proizvodnje, pomažući u identifikaciji bolesti i štetnika te omogućujući efikasno upravljanje resursima. Korištenje multi-spektralnih kamera na dronovima omogućuje detaljno praćenje rasta vinove loze tijekom različitih faza vegetacije. Snimci se analiziraju i koriste za izradu mapa vinograda, što pomaže u ciljanom korištenju gnojiva, zaštitnih sredstava i navodnjavanja te selektivnoj berbi grožđa prema kvalitetnim zonama. Ovo sve smanjuje troškove proizvodnje i povećava kvalitetu grožđa. 5G mreža igra ključnu ulogu omogućujući brzi prijenos podataka s dronova i precizno upravljanje njihovim letom. Ovaj projekt predstavlja budućnost modernog vinogradarstva i primjer je kako digitalne tehnologije, uz pomoć 5G mreže, unapređuju poljoprivredu i proizvodnju vrhunskih vina. [42]

7. ZAKLJUČAK

Peta generacija komunikacijskih sustava predstavlja značajno poboljšanje u odnosu na prethodne generacije. Njene iznimno visoke brzine prijenosa podataka, minimalna kašnjenja i znatno veća propusnost omogućuju nove i inovativne primjene u različitim sektorima, kao što su industrija, medicina, zabava i obrazovanje. Tehnološke inovacije kao što su dijeljenje mreže, MIMO tehnologija i rubno računalstvo ključni su čimbenici koji čine 5G tehnologiju svestranom i učinkovitom. Kao ključan faktor optimizacije 5G sustava, uloga mjerenja je neophodna kako bi se osigurala visoka kvaliteta usluge, detektirali potencijalni izazovi te osigurala učinkovita upotreba resursa mreže. Mjerenja pružaju duboki uvid u performanse sustava i omogućuju brzu reakciju na promjene i izazove koji se pojavljuju. Uz tehnološke prednosti, 5G ima izvanredan potencijal za transformaciju poslovnih praksi, povećanje produktivnosti i stvaranje novih zapošljavanja. Ovaj razvoj može znatno obogatiti kvalitetu života pojedinaca pružanjem inovativnih usluga i stvaranja novih oblika povezivanja. Kroz ovu evoluciju, 5G ne samo što mijenja način na koji komuniciramo i poslužemo, već i postavlja temelje za novu obećavajuću eru tehnološkog napretka.

LITERATURA

[1] R.E. Ziemer, W.H. Tranter: Principles of Communications: Systems, Modulation, and Noise, Wiley, 2014.

<https://physicaeducator.files.wordpress.com/2018/03/principles-of-communications-7th-edition-ziemer.pdf>

[2] Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Zavod za komunikacije, Teorija informacije - PR03b: Informacijski izvori i prijenos informacije [Mrežno], https://moodle.srce.hr/2021-2022/pluginfile.php/5303150/mod_resource/content/4/PR03b%20-%20Informacijski%20izvori%20i%20prijenos%20informacije.pdf Pristupljeno [11.6.2023.]

[3] V. Sinković, A. Bažant, M. Kos: Osnovne arhitekture mreža, Zagreb: Element, 2003., <https://element.hr/wp-content/uploads/2020/06/unutra-13601.pdf>

[4] J. Agrawal, R. Patel, Dr. P. Mor, Dr. P. Dubey i Dr. J.M. Keller: Evolution of Mobile Communication Network: from 1G to 4G , International Journal of Multidisciplinary and Current Research, sv. 3, 2015.

<http://ijmcr.com/wp-content/uploads/2015/11/Paper11100-1103.pdf>

[5] A. Kumar, Dr. Y. Liu, Dr. J. Sengupta, Divya: Evolution of Mobile Wireless Communication Networks 1G to 4G, International Journal of Electronics & Communication Technology, br. 1, sv. 1, 2010.

<http://www.iject.org/pdf/amit.pdf>

[6] Network Encyclopedia: Frequency Division Multiple Access,

<https://shorturl.at/elqOX> Pristupljeno [16.6.2023.]

[7] DynaTAC 8000X: For Connecting Phones to People—Not Places (Most Influential Projects: #12), PM Network, str. 31–33, 2019.

<https://shorturl.at/aFRV7> Pristupljeno [16.6.2023.]

[8] T. Farley: Mobile telephone history, Teletronikk, str. 31, 2005.

https://thomasfarleyblog.com/wp-content/uploads/2015/09/telenorpage_022-034.pdf

[9] Tech Differences: Difference Between TDMA and CDMA,

<https://techdifferences.com/difference-between-tdma-and-cdma.html#ComparisonChart>

Pristupljeno [17.6.2023.]

[10] Cattaneo, Giuseppe & Maio, Giancarlo & Petrillo, Umberto: Security Issues and Attacks on the GSM Standard: a Review. JOURNAL OF UNIVERSAL COMPUTER SCIENCE, br. 16, vol. 19, 2013.

<https://lib.jucs.org/article/23929/>

[11] J.A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. Lopez-Salcedo, G. Seco-Granados: Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: from 1G to 5G, IEEE Communications Surveys & Tutorials, br. 2, sv. 20, 2017.

http://spcomnav.uab.es/docs/journals/DelPeral_Survey_preprint_2017.pdf

[12] E. Dahlman, S. Parkvall, J Sköld: 4G LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Elsevier 2011.

https://www.academia.edu/39763875/4G_LTE_LTE_Advanced_for_Mobile_Broadband

[13] P. Sharma: Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network, IJCSMC, br. 8, sv. 2, str 47-53, 2013.

<https://ijcsmc.com/docs/papers/August2013/V2I8201317.pdf>

[14] Esther Shein, A brief history of 5G [Mrežno], Tech Republic, 2023.

<https://www.techrepublic.com/article/brief-history-5g/> Pristupljeno [20.6.2023.]

[15] Ericsson, 5G: The Next Wave [Mrežno], 2023.

<https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/consumerlab/reports/5g-next-wave> Pristupljeno [20.6.2023.]

[16] D. Warren, C. Dewar, Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile, GSMA Intelligence, 2014.

<https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2015/01/2014-12-08-c88a32b3c59a11944a9c4e544fee7770.pdf?fbclid=IwAR3iMMf30TnnqiyKWHMqgePR41XEqpwANj1qDQ1mkP2NdD-ICLEC5HtzgBM>

[17] E. Dahlman, S. Parkvall i J. Sköld: 4G LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, Elsevier, 2016.

<https://www.sciencedirect.com/book/9780128045756/4g-lte-advanced-pro-and-the-road-to-5g>

[18] Navid Fazle Rabbi: Introduction to 5G, 2020.

https://www.academia.edu/42723011/Introduction_to_5G

[19] S. Jain, S. Chavda: 5G –The Next Generation Mobile Radio Communication, IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering, br. 3, sv. 11, 2016.

<https://iosrjournals.org/iosr-jece/papers/Vol.%2011%20Issue%203/Version-1/P1103018085.pdf>

[20] IEEE: Real-Life Use Cases for Edge Computing [Mrežno]

<https://innovationatwork.ieee.org/real-life-edge-computing-use-cases/#comment-108545>

Pristupljeno [14.7.2023.]

[21] Ericsson: 5 keyfacts about 5G radio access networks, 2023.

<https://www.ericsson.com/4ac684/assets/local/policy-makers-and-regulators/5-key-facts-about-5g-radio-access-networks.pdf>

[22] A. Symeri: Application Server Mobility and 5G Core Network, KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE, 2019.

<https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1334568/FULLTEXT01.pdf>

[23] 5G PPP Architecture Working Group: View on 5G Architecture, 2016.

<https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2014/02/5G-PPP-5G-Architecture-WP-July-2016.pdf>

[24] P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, G. Durisi, 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View, IEEE, sv. 6, 2018.

<https://arxiv.org/pdf/1804.05057.pdf>

[25] J. Xiaofeng: Performance Evaluation of Key Performance of 5G Mobile Communication System And Development Countermeasures, Journal of Physics: Conference Series 1518, 2020.

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1518/1/012077/pdf>

[26] Europska komisija, Preporuka Vijeća od 12. srpnja 1999. o ograničavanju izloženosti opće javnosti elektromagnetskim poljima (0 Hz do 300 GHz). Prilog II., Official Journal of the European Communities, 1999.

<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9509b04f-1df0-4221-bfa2-c7af77975556/language-en>

[27] HAKOM: Uputa za mjerenje razine elektromagnetskog polja

https://www.hakom.hr/UserDocsImages/2015/kontrola_spektra/VL-KS-UP-INTS-Uputa%20za%20mjerenje%20EMP%20za%20web-20150310.pdf

- [28] HAKOM: Mjerenja veličina elektromagnetskog polja u gradu Osijeku, 2020.
https://www.hakom.hr/UserDocsImages/2020/radiokomunikacije/Mjerenja_HAKOM_5G_2020_0721_final.pdf?vel=1943134
- [29] C. Fischer: Deutsche Telekom and ESA strive for maximum resilience [Mrežno], Telekom, 2023. Pristupljeno [3.8.2023.]
<https://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/telekom-and-esa-maximizing-network-resilience-1027632>
- [30] Europski revizorski sud: Uvođenje 5G mreža u EU-u, 2022.
https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR22_03/SR_Security-5G-networks_HR.pdf
- [31] J. H. Ortiz: Industry 4.0 – Current Status and Future Trends, IntechOpen, 2020.
<https://shorturl.at/bqT45>
- [32] I. Batool: 5G support in healthcare system, Department of software engineering Bahria university Islamabad, 2022.
https://www.researchgate.net/publication/361679439_5G_support_in_healthcare_system
- [33] S. Latif, J. Qadir, S. Farooq, M. A. Imran, How 5G Wireless (and Concomitant Technologies) Will Revolutionize Healthcare?, Communications and Computing for Sustainable Development Goals, 2017.
<https://www.mdpi.com/1999-5903/9/4/93>
- [34] T. A. Suleiman, A. Adinoyi: Telemedicine and Smart Healthcare— The Role of Artificial Intelligence, 5G, Cloud Services, and Other Enabling Technologies, Int. J. Communications, Network and System Sciences, 2023.
https://www.scirp.org/pdf/ijcns_2023032413443512.pdf
- [35] Deloitte: 5G smart cities whitepaper, 2020.
<https://shorturl.at/elpzQ>
- [36] T. Car, Lj. S. Pilepić, N. Kovačić, The Role of 5G and IoT in Smart Cities, ENTRENOVA - ENTerprise REsearch InNOVAtion, br. 1, sv. 8, 2022.
<https://www.econstor.eu/bitstream/10419/268340/1/32-ENT-2022.pdf>
- [37] Mordor Intelligence, Smart cities market size & share analysis – growth trends & forecast [Mrežno], 2023.
<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/smart-cities-market> Pristupljeno [19.8.2023.]
- [38] A. Baratè, G. Haus, L. A. Ludovico, E. Pagani: 5G technology for augmented and virtual reality in education, International Conference on Education and New Developments, 2019.
https://www.researchgate.net/publication/341790902_5G_TECHNOLOGY_FOR_AUGMENTED_AND_VIRTUAL_REALITY_IN_EDUCATION

[39] J. Jerome, J. Greenberg: AR & VR: Privacy & Autonomy Considerations in Emerging, Immersive Digital Worlds, Future of privacy forums, 2021.

<https://fpf.org/wp-content/uploads/2021/04/FPF-ARVR-Report-4.16.21-Digital.pdf>

[40] 5G Observatory: Biannual Report, 2023.

https://5gobservatory.eu/wp-content/uploads/2023/06/BR-18_draft_11.05.2023_CLEAN_Final-EC.pdf

[41] W. Chow, The Global Economic Impact of 5G: Powering Your Tomorrow, PwC, 2021.

<https://www.pwc.com/gx/en/tmt/5g/global-economic-impact-5g.pdf>

[42] Ekonomski institut, Zagreb (EIZ): Ekonomski učinci razvoja 5G infrastrukture u Republici Hrvatskoj, 2021.

https://www.t.ht.hr/webresources/tht/pdf/HT_5G_atlas.pdf

SAŽETAK

U radu je istražena peta generacija (5G) mobilnih mreža. Rad započinje pregledom evolucije mobilnih komunikacijskih sustava, od prve generacije (1G) do četvrte generacije (4G). Zatim opisuje 5G sustav, uključujući njegove tehničke karakteristike, arhitekturu i ključna područja usluge. Opisane su tehnologije koje koristi, kao što su dijeljenje mreže, MIMO i rubno računalstvo. U nastavku rada opisana je važnost mjerenja 5G sustava i njegova potencijalna primjena u različitim sektorima, kao što su industrija, medicina, pametni gradovi i virtualna i proširena stvarnost.

Ključne riječi: 5G sustav, dijeljene mreže, komunikacijski sustavi, MIMO, rubno računalstvo

ABSTRACT

The paper explores the fifth generation (5G) of mobile networks. It begins with an overview of the evolution of mobile communication systems, from the first generation (1G) to the fourth generation (4G). Then, it describes the 5G system, including its technical characteristics, architecture, and key service areas. The technologies it utilizes, such as network slicing, MIMO, and edge computing, are discussed. The paper goes on to highlight the significance of measuring the 5G system and its potential applications in various sectors, such as industry, medicine, smart cities, and virtual and augmented reality.

Key words: 5G system, communication systems, Edge computing, MIMO, Network slicing