

Frekvencijski opsezi 5G sustava

Knapić, Elena

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:200:939496>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-10**

Repository / Repozitorij:

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



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

Stručni studij računarstvo

FREKVENCIJSKI OPSEZI 5G MREŽE

Završni rad

ELENA KNAPIĆ

Osijek, 2023

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1S: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za završni ispit na preddiplomskom stručnom studiju**

Osijek, 20.02.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za završni ispit
na preddiplomskom stručnom studiju**

Ime i prezime Pristupnika:	Elena Knapić
Studij, smjer:	Preddiplomski stručni studij Računarstvo
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	AR4669, 25.07.2018.
OIB Pristupnika:	43259587879
Mentor:	mr. sc. Anđelko Lišnjić
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Krešimir Grgić
Član Povjerenstva 1:	mr. sc. Anđelko Lišnjić
Član Povjerenstva 2:	Denis Vajak, mag. ing. comp.
Naslov završnog rada:	Frekvencijski opsezi 5G sustava
Znanstvena grana završnog rada:	Telekomunikacije i informatika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rada	5G frekvencijski spektar odnosi se na radio frekvencije koje prenose podatke od korisničke opreme preko baznih stanica do krajnje točke. Postojeće mobilne mreže koriste frekvencije u opsegu ispod 6 GHz i koje će ga morati dijeliti 5G prometom. Pored toga, da bi iskoristile novo dostupni spektar, 5G mreže će morati koristiti novu radio tehnologiju koju je standardizirao 3GPP. Zadatak je dati pregled frekvencijskih opsega koji se koriste i koristit će se u 5G sustavima.
Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (završnog rada):	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	20.02.2023.

Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:

Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.

Datum:

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

Osijek, 02.05.2023.

Ime i prezime studenta:

Elena Knapić

Studij:

Preddiplomski stručni studij Računarstvo

Mat. br. studenta, godina upisa:

AR4669, 25.07.2018.

Turnitin podudaranje [%]:

6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Frekvencijski opsezi 5G sustava**

izrađen pod vodstvom mentora mr. sc. Anđelko Lišnjić

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. ANALIZA DOSADAŠNJIH MOBLINIH MREŽA	3
2.1. 1G mobilna mreža	3
2.2. 2G mobilna mreža	4
2.3. 3G mobilna mreža	5
2.4. 4G mobilna mreža	6
3. PETA GENERACIJA MOBILNIH MREŽA	8
3.1. Arhitektura i tehnologija 5G mreže	8
3.1.1. Glavne komponente arhitekture 5G mreže	8
3.1.2. Implementacija 5G mreže.....	12
4. FREKVENCIJSKI SPEKTRI 5G MREŽE	14
4.1. Radiofrekvencijski spektar	14
4.2. Frekvencijski spektri 5G mreže	14
5. RAZVOJ 5G MREŽE U HRVATSKOJ.....	20
5.1. Testiranja 5G mreže u Republici Hrvatskoj	20
6. ZAKLJUČAK	26
LITERATURA.....	27

1. Uvod

Razvojem mobilnih mreža sve od prve generacije pa do četvrte generacije te pojavom nove pete generacije mobilnih mreža zahtjevi za frekvencijske opsege su se mijenjali. Peta generacija mobilnih mreža zahtijeva povećanje broja baznih postaja na urbanim i ruralnim područjima zbog povećanja brzine prijenosa podataka. Dio frekvencijskih spektara koji se koriste za dosadašnje mobilne mreže prenamijenit će se za korištenje u svrhe 5G mobilne mreže.

Tema ovog rada je peta generacija mobilne mreže i frekvencijski spektri. U drugom poglavlju se analiziraju dosadašnje mobilne mreže, od 1G do 4G mreže, treće poglavlje bavi se samom 5G mrežom, njenom arhitekturom, tehnologijom i razvojem. U četvrtom poglavlju dan je pregled radiofrekvencijskih spektara koji se koriste u 5G sustavima. U petom poglavlju opisan je razvoj mreže u Republici Hrvatskoj.

1.1. Zadatak završnog rada

5G frekvencijski spektar odnosi se na radio frekvencije koje prenose podatke od korisničke opreme preko baznih stanica do krajnje točke. Postojeće mobilne mreže koriste frekvencije u opsegu ispod 6 GHz i koje će ga morati dijeliti 5G prometom. Pored toga, da bi iskoristile novo dostupni spektar, 5G mreže će morati koristiti novu radio tehnologiju koju je standardizirao 3GPP. Zadatak je dati pregled frekvencijskih opsega koji se koriste i koristit će se u 5G sustavima.

2. ANALIZA DOSADAŠNJIH MOBLINIH MREŽA

Mobilne mreže, koje se već 40 godina paralelno razvijaju s internetom, doživjele su znatne promjene. Prve dvije generacije mobilnih mreža, 1G i 2G, podržavale su samo prijenos govora, a naknadno i podatkovni promet. Razvoj treće generacije 3G, omogućio je prijelaz na širokopojasnu mrežu te brži prijenos podataka. Današnja četvrta generacija mobilnih mreža 4G, podržava prijenos podataka od nekoliko megabita u sekundi. Prijelazom na petu generaciju postignute su veće brzine prijenosa podataka i pružanje korisnicima veliki spektar usluga.

Unaprjeđenje i razvoj interneta te mobilnih mreža nemoguće je promatrati bez Interneta stvari. Internet stvari (IoT) je tehnologija koja omogućava da se stvari korištene u svakodnevnom životu mogu povezati putem Interneta i unaprijediti svoju funkcionalnost. [1] Dosadašnje mobilne mreže nisu bile razvijene za zahtjeve Interneta stvari, nego samo za širokopojasni internet za mobilne uređaje. Peta generacija se ne koristi samo za spajanje na internet, već za nekolicinu drugih potreba. IoT primjene koje će omogućiti 5G mrežu su:

- poboljšana mobilna širokopojasna veza (eng. *Enhanced Mobile Broadband - eMBB*),
- iznimno pouzdana komunikacija s malim kašnjenjem od približno 1 milisekunde za prijenos podataka (eng. *Ultra-reliable and Low-latency Communications - uRLLC*)
- masovna komunikacija uređaja (eng. *Massive Machine Type Communication - mMTC*).

Pod pojmom malo kašnjenje (eng. *Low Latency*) podrazumijeva se mreža koja može obraditi velike količine podataka s minimalnim kašnjenjem odnosno latencijom.[2]

2.1. 1G mobilna mreža

Prva mobilna mreža razvijena je u Norveškoj 1981. godine. Podržavala je samo prijenos glasovnih podataka i temeljila se na analognoj tehnologiji. Brzina prijenosa bila je 2,4 Kb/s. Prva mobilna mreža imala je mali kapacitet i informacije se nisu prenosile na siguran način s obzirom da su se glasovni podaci reproducirali u baznim stanicama. Kapacitet mreže označava količinu prometa koju mreža može podnijeti u bilo kojem trenutku.[3] Uvođenje SIM kartica počelo je tek s drugom generacijom mreže. U 1G mreži korisnikov broj bio je pridijeljen uređaju. Uvođenjem 1G mobilnih uređaja u 1990. godini, mobilno tržište godišnje je raslo 30 do 50 posto i došlo je do gotovo 20 milijuna pretplatnika. [4] 1G koristi AMPS (eng. *Advanced Mobile Phone System*) u 800 MHz frekvencijskom opsegu. AMPS radi na način da taj frekvencijski opseg dijeli na određeni broj kanala pomoću metode višestrukog pristupa mediju, odnosno FDMA (eng. *Frequency Division Multiple Access*). Svaki kanal je širine od 30 MHz.

2.2. 2G mobilna mreža

Druga generacija bežične mobilne mreže proširuje prijenos podataka na naprednije glasovne usluge. Prenosi podatke faksa i kraće poruke brzinom prijenosa do 9,6 Kb/s. Iako je 2G naprednija mobilna mreža i dalje nije pogodna za multimedijske programe i pretraživanje interneta u realnom vremenu. GSM (eng. *Global Systems for Mobile Communications*) je standard koji opisuje protokole za 2G mobilnu mrežu i koristi digitalnu modulaciju kako bi poboljšao kvalitetu glasovne usluge. GSM tehnologija uključuje i SMS uslugu uz slanje poruke do 160 znakova.

GSM koristi frekvencijski dupleks (eng. *Frequency Division Duplex - FDD*). [6] FDD koristi različite frekvencije za prijem i predaju. GSM je kombinacija FDMA (eng. *Frequency Division Multiple Access*) i TDMA (eng. *Time Division Multiple Access*). [6] FDMA je protokol u kojemu je širina pojasa podijeljena na različite frekvencijske pojaseve, a TDMA je protokol u kojemu je širina pojasa podijeljena ovisno o vremenu.[5] GSM mreže koriste podjelu frekvencijskih kanala prema ARFCN broju (eng. *Absolute Radio Frequency Channel Number*). ARFCN u GSM – u su upareni frekvencijski kanali koji se koriste za silaznu i uzlaznu vezu. [6] Svakom radio kanalu u GSM – u pridružen je jedinstven broj primjerice „ARFCN #1“. ARFCN predstavlja jedan frekvencijski opseg za uzlaznu vezu i jedan za silaznu vezu primjerice 890 – 915 MHz za uzlaznu i 935 – 960 MHz za silaznu vezu. [6] GSM koristi frekvencijske opsege na frekvencijama 900 MHz i 1800 MHz gdje je širina opsega 200 kHz. Frekvencijski opseg GSM 900 prvotno je koristio frekvencijski opseg 890 MHz – 960 MHz i nazivao se P-GSM (eng. *Primary GSM*). P-GSM sadrži 124 kanala prema ARFCN podjeli. Frekvencijski opseg od 890 – 915 MHz bio je uzlazna veza, a opseg od 935–960 MHz silazna veza. Između uzlazne i silazne veze nalazi se rascjep širine 20 MHz frekvencijskog opsega 915–935 MHz. Uzlazna veza predstavlja signal koji se prenosi s mobilnog uređaja do bazne stanice, a silazna veza predstavlja signal koji odašilje bazna stanica i prima mobilni uređaj. Razvijeniji GSM nazvan je E-GSM (eng. *Extended GSM*) frekvencijskog je opsega 880 MHz – 960 MHz. Uzlazna veza frekvencijskog je opsega 880 – 915 MHz, a silazna veza 925–960 MHz. Rascjep je frekvencijskog opsega 915 – 925 MHz. ARFCN-u u E-GSM su dodijeljeni brojevi od 0 do 124 i od 975 do 1023. Frekvencijski opseg 1800 MHz seže od 1710 MHz do 1880 MHz. Uzlazna veza ima frekvencijski opseg 1710 – 1785 MHz, a silazna veza opseg 1805 – 1880 MHz. ARFCN ovog opsega u rasponu je od 512 do 885. U tablici 2.1. je prikaz frekvencijskih opsega GSM 900 uključujući E-GSM i P- GSM te GSM 1800.

Tablica 2.1. Frekvencijski opsezi GSM 900 i GSM 1800 [6]

<i>IME POJASA</i>	<i>P – GSM (GSM 900 PRIMARY)</i>	<i>E – GSM (GSM 900 EXTENDED)</i>	<i>GSM 1800</i>
<i>ARFCN</i>	1 do 124	0 do 124 i 975 do 1023	512 do 885
<i>OPSEG UZLAZNE VEZE (MHz)</i>	890 - 915	880 - 915	1710 - 1785
<i>OPSEG SILAZNE VEZE (MHz)</i>	935 - 960	925 - 960	1805 - 1880

Prije prijelaza na treću generaciju mobilnih mreža postojali su 2,5G i 2,75G privremeni standardi. Ovi standardi pridonijeli su poboljšanju mreže povećanjem podatkovnog prijenosa i osposobili su mrežu za novu generaciju mobilnih mreža. 2,5G standard uveden je 1990-tih godina. Za razliku od 2G koji koristi GSM, 2,5G koristi opću paketnu radio uslugu (eng. *General Packet Radio Service - GPRS*) koja pruža paketsku komutaciju. Paketska komutacija usmjerava informacije do odredišta[7]. Informacije kroz mrežu mogu se prenositi u obliku paketa ili u obliku kanala stoga razlikujemo dva principa komutacije, komutacija paketa (eng. *Packet switching - PS*) i komutacija kanala (eng. *Circuit switching - CS*). [7] S obzirom na razvoj tehnologije i potrebom za povećanjem brzine prijenosa podataka uveden je unapređeni GPRS standard nazvan EDGE (eng. *Enhanced Data GSM Evolution*) odnosno 2,75G EDGE. Način prijenosa podataka u EDGE standardu isti je kao i kod GPRS standarda. Paketska komutacija EDGE omogućava propusnost do 236 kbit/s.

2.3. 3G mobilna mreža

Godine 1998. došlo je do uvođenja treće generacije mobilnih mreža koja danas omogućuje korištenje interneta za korisnike u pokretu, u automobilu ili vlaku do 144 Kb/s, a za pješake do 384 Kb/s. Za korisnike koje nisu u pokretu brzina prijenosa doseže 2 Mb/s, što odgovara 2B+D i 30B+D ISDN (eng. *Integrated Services Digital Network*) standardima. „B“ predstavlja nositelja, a „D“ predstavlja delta kanal, odnosno signalni kanal.

3G mreža omogućena je tehnologijama UMTS (eng. *Universal Mobile Telecommunication System*) i CMDA2000 (eng. *Code Division Multiple Access Year 2000*). UMTS omogućuje migraciju 2G GSM mreže na 3G te može koristiti FDD i TDD. TDD zahtijeva jedan pojas budući da su uzlazna i silazna veza na istoj frekvenciji, ali su vremenski odvojene. Frekvencijski opseg razlikuje se za FDD i TDD te ovisi o lokaciji. Frekvencijski opsezi u kojima UMTS djeluje su 850

MHz, 900 MHz, 1700 MHz i 2100 MHz. Frekvencijski opsezi razlikuju se za različite geografske položaje. U tablici 2.2. prikazan je frekvencijski opseg 3G UMTS mreže ovisno o FDD, TDD i geografskoj regiji.

Tablica 2.2. Frekvencijski opsezi 3G UMTS u Europi, Africi i Americi [8]

<i>GEOGRAFSKA REGIJA</i>	<i>EUROPA</i>	<i>AFRIKA</i>	<i>AMERIKA</i>
<i>Frekvencijski opsezi uzlazne i silazne veze za FDD (MHz)</i>	Uzlazna veza: 1920 - 1980 Silazna veza: 2110 - 2170	Uzlazna veza: 1920 - 1980 Silazna veza: 2110 - 2170	Uzlazna veza: 1850 - 1910 Silazna veza: 1930 - 1900
<i>Frekvencijski opsezi uzlazne i silazne veze za TDD (MHz)</i>	Uzlazna veza: 2010 - 2025 Silazna veza: 1900 - 1920	Uzlazna veza: 2010 - 2025 Silazna veza: 1900 - 1920	Uzlazna veza: 1850 - 1910 i 1910 - 1930 Silazna veza: 1930 - 1900

Frekvencijski opseg u Europi i Africi s FDD-om je 2110 - 2170 MHz za silaznu vezu, a 1920 - 1980 MHz za uzlaznu. Za Ameriku frekvencijski opseg uzlazne veze je 1850-1910 MHz, a silazne 1930 - 1900 MHz. UMTS podržava i najčešće koristi frekvencijsku širinu od 5 MHz, ali podržava i 10 MHz i 20 MHz.

2.4. 4G mobilna mreža

Godine 2008. objavljena je četvrta generacija mobilnih mreža s ciljem poboljšanja korisničkog iskustva i kapaciteta usluga koje se koriste tako da se navedeni ciljevi integriraju u postojeće mobilne tehnologije. Glavni ciljevi 4G mobilnih mreža su sveprisutnost i višestruka platforma. Pod pojmom sveprisutnost smatra se 100 % pokrivenost. Pojam platforma s više usluga označava svojstvo nove mobilne generacije koja je ostvariva s mrežom koja osigurava širinu pojasa od 50 do 100 Mb/s za korisnike u pokretu, te do 1 Gb/s za korisnike u mirovanju. 4G je mrežna tehnologija samo za mobilne podatke, dok su prethodni 2G i 3G služili za prijenos i glasovnih usluga što spada u komutaciju kanala CS, tek kasnije dobili su podršku za mobilne podatke što spada u komutacija paketa PS. 4G koristi IP (eng. *Internet Protocol*) za komunikaciju te zbog toga ne podržava glasovni poziv. Iz toga razloga potrebna je VoLTE (eng. *Voice over LTE*) tehnologija. 4G LTE (eng. *Long Term Evolution*) omogućava rad u mnogim frekvencijskim opsezima te koristi FDD i TDD. Postoje različite dodjele LTE frekvencijskih pojasa ovisno o TDD

i FDD. Različite dodjele LTE frekvencijskih pojaseva su dodijeljeni brojevi. Pojasevi od 1 do 22 koriste FDD. U tablici 2.3. prikaz je dodjela frekvencijskih opsega za FDD LTE.

Tablica 2.3. Dodjela frekvencijskih opsega za FDD LTE [9]

<i>Broj LTE pojasa</i>	<i>Uzlazna veza (MHz)</i>	<i>Silazna veza (MHz)</i>	<i>Širina pojasa (MHz)</i>
01	1920 – 1980	2110 – 2170	60
02	1850 – 1910	1930 – 1990	60
03	1710 – 1785	1805 -1880	75
04	1710 – 1755	2110 - 2115	45
05	824 – 849	869 – 894	25
06	830 – 840	875 – 885	10
07	2500 – 2570	2620 - 2690	70
08	880 – 915	925 – 960	35
09	1749.9 – 1784.9	1844.9 – 1879.9	35
10	1710 - 1770	2110 - 2170	60
11	1427.9 – 1452.9	1475.9 – 1500.9	20
12	698 – 716	728 – 746	18
13	777 – 787	746 – 756	10
14	788 – 798	758 - 768	10
15	1900 - 1920	2600 - 2620	20
16	2010 – 2025	2585 – 2600	15
17	704 – 716	734 - 746	12
18	815 – 830	860 – 875	15
19	830 – 845	875 – 890	15
20	832 – 862	791 – 821	30
21	1447.9 – 1462.9	1495.5 – 1510.9	15
22	3410 – 3500	3510 – 3600	90
23	2000 – 2020	2180 – 2200	20
24	1625.5 – 1660.5	1525 – 1559	34
25	1850 – 1915	1930 - 19995	65
26	814 – 849	859 – 894	30 ili 40
27	807 – 824	852 – 869	17
28	703 – 748	758 – 803	45
29	Postoji samo silazna veza	717 – 728	11
30	2305 – 2315	2350 – 2360	10
31	452.5 – 457.5	462.5 – 467.5	5

Pojasevi između 33 i 44 pripadaju TDD spektru. U tablici 2.4. prikaz je dodjela frekvencijskih opsega za TDD LTE.

Tablica 2.4. Dodjela frekvencijskih opsega za TDD LTE [10]

<i>Broj LTE pojasa</i>	<i>Dodjela frekvencijskih opsega (MHz)</i>	<i>Širina pojasa (MHz)</i>
33	1900 – 1920	20
34	2010 – 2025	15
35	1850 – 1910	60
36	1930 - 1990	60
37	1910 – 1930	20
38	2570 – 2620	50
39	1880 - 1920	40
40	2300 – 2400	100
41	2496 – 2690	194
42	3400 -3600	200
43	3600- 3800	200
44	703 – 803	100

3. PETA GENERACIJA MOBILNIH MREŽA

Peta generacija mobilnih mreža evolucija je dosadašnjih mobilnih mreža. Razlika između dosadašnjih generacija mobilnih mreža i pete generacije jest u frekvenciji koja se koristi, te u načinu prijenosa podataka. Nova generacija mobilnih mreža osigurava manju latenciju u mreži, omogućava veći broj uređaja koji se mogu povezati i trebala bi prenijeti velike količine podataka. Najvažnije je to što omogućava brži pristup internetu. 5G mobilna mreža osigurava prioritetnu dodjelu prijenosnih resursa važnu za Internet stvari. 5G će pružiti naprednije i poboljšane mogućnosti u odnosu na 4G. Prema IMT – 2020 standardu definiranom od strane ITU–a, peta generacija mobilnih mreža treba ispunjavati specifikacije kao što je stopostotna prekrivenost, usluge koje su do sada bile u domeni fiksne mreže (eng. *Fixed Wireless Access*) i poboljšanje brzine širokopojasne mobilne mreže od najmanje 20 Gbps. Za očekivati je da bi 5G mreža trebala podržavati sve usluge koje nudi IoT tehnologija.

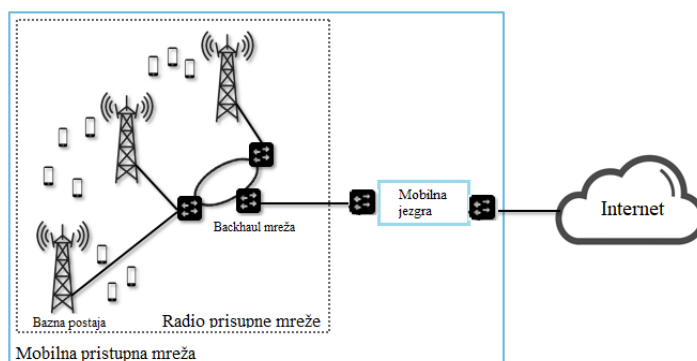
3.1. Arhitektura i tehnologija 5G mreže

Peta generacija mobilnih mreža radi slično kao i dosadašnje mobilne mreže i u neprekidnom je razvoju. Peta generacija mobilnih mreža koristi iste elemente kao i dosadašnje generacije mobilnih mreža. Koristi korisničku opremu (eng. *User Equipment - UE*), radio pristupnu mrežu (eng. *Next Generation Radio Access Network - NG – RAN*) i jezgru mreže (eng. *5G Core - 5GC*).

3.1.1. Glavne komponente arhitekture 5G mreže

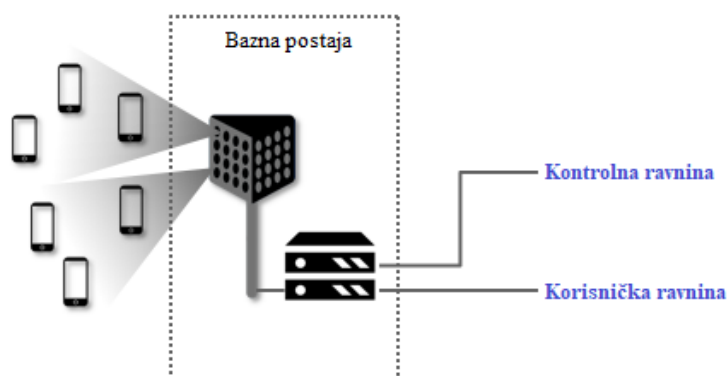
Svaka mobilna mreža pruža bežičnu vezu s uređajima u pokretu. Ovim uređajima smatraju se pametni telefoni, tableti, automobili, roboti, kućanski uređaji i industrijski strojevi.

Mobilne mreže mogu se podijeliti na dva podsustava, radio pristupne mreže (eng. *Radio Access Network - RAN*) i mobilne jezgre (eng. *Mobile Core*). [11] Radio pristupna mreža služi za upravljanje radijskim spektrom u svrhu učinkovitosti korištenja i ispunjenja zahtijeva korisnika. Funkcija mobilne jezgre je povezati korisnike s internetom. Omogućava nadgledanje korisnikovog kretanja kako bi se osigurala kontinuirana usluga, omogućuje internetsku vezu za glasovne i podatkovne usluge i jamči internetsku povezanost koja ispunjava kvalitetu usluge. Na slici 3.1. prikazana su dva podsustava mobilnih mreža.



Sl. 3.1. Podsustavi mobilnih mreža [11]

Radio pristupna mreža prenosi podatke između korisnika i jezgre mreže. Svaka mobilna jezgra podijeljena je na kontrolnu ravninu (eng. *Control Plane*) i korisničku ravninu (eng. *User Plane*). Na slici 3.2. prikazana je podjela mobilne jezgre.



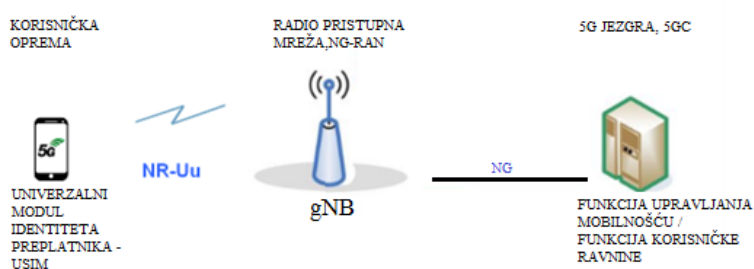
Sl. 3.2. Podjela mobilne jezgre [11]

Projekt partnerstva treće generacije obuhvaća telekomunikacijske tehnologije, uključujući radio pristupne mreže, ključne prometne mreže i uslužne mogućnosti. 3GPP pružio je sveobuhvatne mrežne specifikacije za 5G mrežnu arhitekturu više okrenutu prema uslugama od prethodnih generacija mobilnih mreža. [11] Usluge se pružaju putem zajedničkog

okvira mrežnim funkcijama kojima je dopušteno korištenje tih usluga. Modularnost, ponovna upotrebljivost i samoodrživost mrežnih funkcija dodatna su razmatranja dizajna za 5G mrežnu arhitekturu opisanu u 3GPP specifikacijama. [11]

Peta generacija mobilnih mreža koristi iste elemente kao i dosadašnje generacije mobilnih mreža. Koristi korisničku opremu (eng. *User Equipment - UE*), radio pristupnu mrežu (eng. *Next Generation Radio Access Network - NG – RAN*) i jezgru mreže (eng. *5G Core - 5GC*). Korisnička oprema sastoji se od univerzalnog modula identiteta pretplatnika (eng. *The universal subscriber identity module - USIM*) i mobilne stanice.

U 4G mreži radio pristupne mreže nazvane su eNodeB ili eNB što je skraćeno od evoluiranog čvora B, a u 5G mreži nazvane su gNB pri čemu „g“ označava „sljedeću generaciju“ (eng. *Next generation*), a „NB“ označava čvor B (eng. *Node B*). Radio sučelje nazvano je „NR –Uu“. Oznaka „NR“ (eng. *New Radio*) naznačuje 5G, a „Uu“ jedinstvene korisnike (eng. *Unique users*). Na slici 3.3. prikazana je shema 5G sustava.



Sl. 3.3. 5G sustav [12]

Peta generacija mobilnih mreža na slici 3.3. opisana je i funkcijom upravljanja mobilnošću (eng. *Mobility management Function – AMF*) i funkcijom korisničke ravnine (eng. *User Plane Function -UPF*). AMF pristupa korisničkoj opremi i radio pristupnoj mreži, dok UPF upravlja korisničkim podacima. Također, na slici „NG“ označava referentnu točku između radio pristupne mreže i jezgre mreže.

Kao što je već spomenuto, 5G se sastoji od mobilne jezgre. U 4G naziva se razvijena paketna jezgra (eng. *Evolved Packet Core - EPC*), a u 5G jezgra sljedeće generacije (eng. *Next Generation Core - NG-Core*). Arhitektura jezgre 5G mreže u središtu je 5G specifikacija i omogućuje povećanu potražnju protoka kojeg 5G mora podržati. Jezgra definirana od strane 3GPP, koristi arhitekturu zasnovanu na uslugama (eng. *Service-Based Architecture - SBA*)

usklađenu s oblakom koja se proteže kroz sve 5G funkcije i interakcije, uključujući provjeru autentičnosti, sigurnost, upravljanje sesijama i agregiranje prometa s krajnjih uređaja. [11]

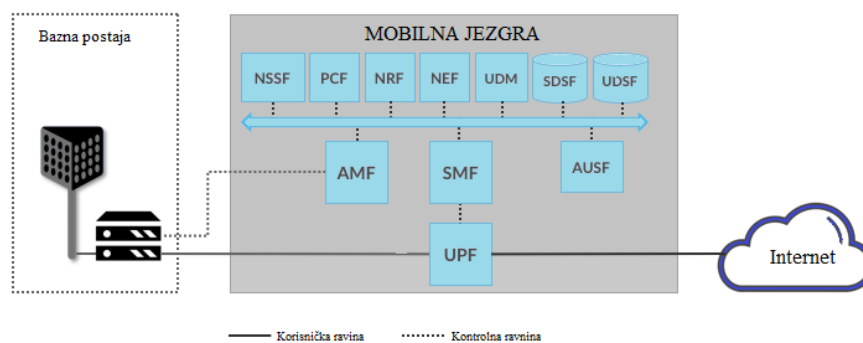
5G mobilna jezgra može se podijeliti na tri grupe. Prva skupina djeluje u kontrolnoj ravnini i dijelom u 4G razvijenoj jezgri paketa. U prvu skupinu pripada:

1. funkcija za pristup i upravljanje jezgrom (eng. *Core Access and Mobility Management Function - AMF*), [11]
2. funkcija za upravljanje sesijama (eng. *Session Management Function - SMF*), funkcija kontrole politike (eng. *Policy Control Function - PCF*), [11]
3. objedinjeno upravljanje podacima (eng. *Unified Data Management - UDM*) [11]
4. funkcija poslužitelja za provjeru autentičnosti (eng. *Authentication Server Function - AUSF*). [11]

Druga skupina također djeluje u kontrolnoj ravnini, međutim ne djeluje u razvijenoj jezgri paketa. U drugu skupinu pripada:

1. mrežna funkcija strukturirane pohrane podataka (eng. *Structured Data Storage Network Function - SDSF*), [11]
2. mrežna funkcija nestrukturirane pohrane podataka (eng. *Unstructured Data Storage Network Function - UDSF*), [11]
3. funkcija mrežne izloženosti (eng. *Network Exposure Function - NEF*), [11]
4. funkcija virtualnih mrežnih repozitorija (eng. *Network Function Repository Function - NRF*) [11]
5. funkcija virtualnih mrežnih repozitorija (eng. *Network Function Repository Function - NRF*) [11]

Zadnja se izvršava u korisničkoj ravnini, a sastoji se od funkcije korisničke ravnine (eng. *User Plane Function - UPF*). [11] Na slici 3.4. prikazana je 5G mobilna jezgra s prikazanim skupinama.



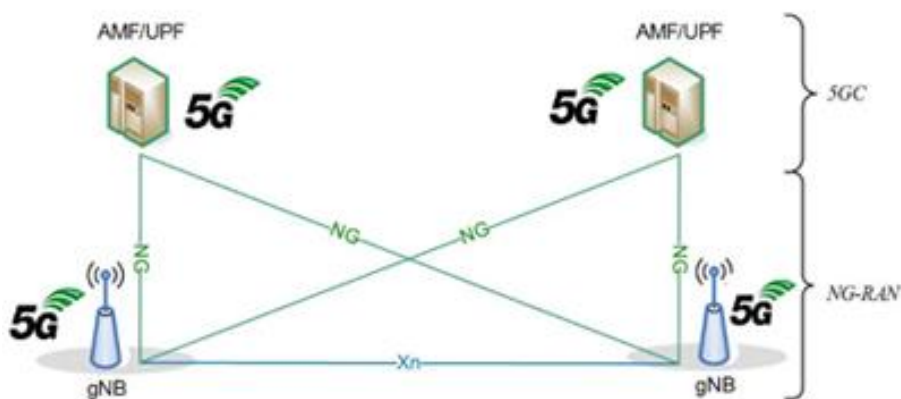
Sl. 3.4. 5G mobilna jezgra [11]

Arhitektura 5G mreža zasniva se na SBA – u. Ovdje su arhitekturni elementi definirani kao mrežne funkcije (eng. *Network Functions - NF*). Mrežne funkcije pomoću zajedničkog sučelja može ponuditi svoje usluge ostalim ovlaštenim mrežnim funkcijama ili bilo kome tko ima dopušteno koristiti pružene usluge. Ovakav SBA pristup je skalabilan i moguće ga je ponovno upotrijebiti. Na gornjoj kontrolnoj ravnini su sve nužne mrežne funkcije, dok su na donjoj korisničkoj ravnini mrežne funkcije i elementi koji sudjeluju u prijenosu korisničkih podataka. 5G arhitektura opisuje se kao arhitektura temeljena na uslugama.

3.1.2. Implementacija 5G mreže

Pomoću 5G moguće je integrirati elemente različitih generacija u različite konfiguracije, samostalno (eng. „*Stand - Alone*“ *architecture - SA*) pomoću samo jedne radio pristupne tehnologije i nesamostalno (eng. „*Non - Stand Alone*“ *architecture - NSA*) kombinirajući više radio pristupnih tehnologija.

U prvom slučaju 5G „Novi Radio“ (eng. *5G „New Radio“*), nazvan od strane 3GPP-a, razvijene LTE radio stanice i jezgra operiraju sami što znači da se koriste u korisničkoj i kontrolnoj razini. Postoje tri scenarija samostalne konfiguracije pomoću samo jedne radio pristupne tehnologije koje je definirao 3GPP. Za samostalnu (SA) arhitekturu nije potreban niti jedan dio 4G mreže kako bi djelovala. Može se reći kako je SA potpuna implementacija 5G – a. Samostalna arhitektura koristi razvijenu jezgru paketa (EPC) i koristi razvijeni LTE pristup čvoru B (eng. *Evolved Node B*). SA predstavlja brojne nove tehnologije kao što su virtualizacija mrežnih funkcija (eng. *Network Function Virtualization*), EDGE računalstvo (eng. *EDGE computing*) i mrežno rezanje (eng. *Network Slicing*). Na slici 3.5. prikaz je samostalne 5G arhitekture.

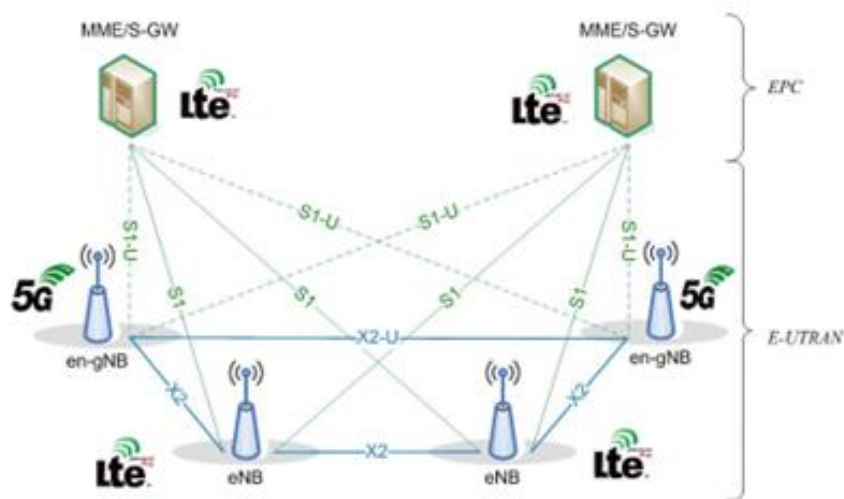


Sl. 3.5. Samostalna 5G arhitektura [12]

3GPP definirao je tri slučaja samostalne konfiguracije:

1. EPC (eng. *Evolved Packet Core*) i LTE (eng. *Long Term Evolution*) eNB (eng. *Evolved NodeB*) pristup
2. 5GC (eng. *5G Core*) i NR (eng. *New Radio*) gNB (eng. *gNodeB*) pristup
3. 5GC i LTE ng – eNB (eng. *Enhanced LTE eNB*) pristup .

U drugom slučaju je nesamostalna konfiguracija kombiniraju se više radio pristupnih tehnologija. Koristi 5G jezgru i pristup čvoru pete generacije B (eng. *Fifth Generation NodeB*). Može se reći kako je NSA korak prema potpunoj implementaciji 5G – a. Na slici 3.6. prikaz je nesamostalne 5G arhitekture.



Sl. 3.6. Nesamostalna 5G arhitektura [12]

Kombinirane su „New radio“ radio stanice s LTE radio stanicama pomoću dvostruke povezanosti za pružanje radio pristupa. Ovakva konfiguracija prigodna je za operatere koji žele iskoristiti postojeće 4G implementacije kombinirajući LTE i NR radio resurse s postojećim EPC - om kako bi dostavili novu 5G mrežu. Također, 3GPP definirao je tri slučaja nesamostalne konfiguracije kombinirajući više radio pristupnih tehnologija:

1. EPC i LTE eNB se koriste kao glavna opcija, a NR en – Gnb kao sekundarna
2. 5GC i NR gNB kao glavna opcija, a LTE ng – eNB kao sekundarna
3. 5GC i LTE ng – eNB kao glavna opcija, a NR gNB kao sekundarna.

4. FREKVENCIJSKI SPEKTRI 5G MREŽE

4.1. Radiofrekvencijski spektar

Radiofrekvencijski spektar (RF spektar) prirodno je ograničeno opće dobro čija je djelotvorna uporaba od nacionalnog interesa Republike Hrvatske.[13] RF 5G spektar dio je elektromagnetskog spektra povezan s distribucijom radiovalova kojemu pripadaju i gama zračenje, rendgensko zračenje, ultraljubičasto zračenje, optički spektar, infracrveno zračenje, terahertz zračenje te mikrovalno zračenje. [14] RF spektar predstavlja velik dio elektromagnetskog spektra koji omogućuje bežično odašiljanje i primanje poruka na većim ili manjim udaljenostima.[14] Radiofrekvencijski spektar ograničeno je opće dobro zbog toga da bi se spriječile smetnje između različitih korisnika, generiranje i prijenos opsega radio frekvencija. Opseg radio frekvencija je mali granični dio frekvencija radio spektra gdje se kanali ili koriste ili odvajaju za upotrebu. Međunarodna telekomunikacijska unija koordinira radiofrekvencijski spektar te je dodijelila različite dijelove radio spektra za različite tehnologije. Međunarodna telekomunikacijska unija raspodijelila je radiofrekvencijski spektar na 12 opsega. Svaki spektar počinje na valnoj duljini snage deset na n-tu metara s odgovarajućom frekvencijom od $3 \times 10^8 - n$ herca. Spektri se protežu od vrlo malih frekvencija od 3 do 30 Hz pa sve do iznimno visokih frekvencija od 300 do 3000 Hz.

IEEE je frekvencijske spektre u mikrovalnom području označila slovima te je klasifikacija postala široko korišten standard za radarske opsege.

4.2. Frekvencijski spektri 5G mreže

Kako bi se ispunili najmanji tehnički zahtjevi IMT – 2020, Međunarodna telekomunikacijska unija određuje minimalnu granicu od 100 MHz propusnosti po operateru kako bi se ispunile najveće brzine. Najmanje 100 MHz nije dovoljnog kapaciteta kako bi operateri držali korak s potražnjom i povećanjem korisnika 5G mreže. Iz tog razloga potrebni su frekvencijski spektri niskog, srednjeg i visokog pojasa. Dio frekvencijskih spektara koji se koriste za dosadašnje mobilne mreže prenamijenit će se za korištenje u svrhe 5G mobilne mreže. Povećanjem brzine prijenosa podataka te velikim kapacitetom pete generacija bit će potrebno povećati broj baznih postaja. Također, bit će potrebno povećati broj novopostavljenih postaja koje će pokrivati lokacije na kojima nije do sada bilo baznih postaja.

Zbog navedenih razloga bazne postaje morat će se povezati agregacijskim mrežama velikih kapaciteta i niskih brzina prijenosa podataka. Ovi zahtjevi mogu se ostvariti izgradnjom svjetlovodne mreže.

Do sada je srednjopojasni spektar bio glavni pokretač 5G mreže, a do 2030. godine prosječno će biti potrebno 5 GHz visokopojasnog spektra. Visokopojasni spektar nadopunjuje implementaciju niskog i srednjeg pojasa u gustim urbanim naseljima. Također, pruža povezivanje putem fiksnog bežičnog pristupa, nisku latenciju na područjima visoke gustoće i pouzdanu mrežu. S druge strane, niskopojasni spektar ključan je za ruralna područja kako bi postojao pristup uslugama dostupnima u urbanim područjima iako je kapacitet niskopojasnog spektra manji nego što je potrebno 5G mreži.

Peta generacija mobilnih mreža ima tri glavne upotrebe. Ubrajamo poboljšani širokopojasni mobilni pristup (eng. *enhanced Mobile Broadband - eMBB*), masivni IoT (mIoT) i izuzetno pouzdanu nisku latenciju komunikacije (eng. *Ultra - reliable low latency - URLLC*). Dostup širokom rasponu spektra ključan je za razvoj navedenih upotreba. Primjerice pametna brojila zahtijevat će samo povremeni prijenos relativno malog prometa dok poboljšana širokopojasna mreža za mobilne uređaje zahtijevat će brz i kontinuirani prijenos prometa velike veličine.

Kao što je već spomenuto, frekvencijski opsezi namijenjeni za implementaciju 5G mreže mogu se podijeliti u tri kategorije. Podjela se vrši na visoki, srednji i niski pojas. Svaki od pojaseva nudi niz različitih značajki u smislu kapaciteta i pokrivenosti. Na slici 4.1. prikaz je usporedbe veličine pokrivenosti svakog od pojaseva.



Sl. 4.1. Pokrivenost pojaseva[15]

Pristup svim pojasevima u spektru zadovoljava unutarnju i vanjsku pokrivenost kako bi 5G usluge bile dostupne. Spektar, treba biti dostupan kako bi se mogao koristiti na najefikasniji način dodjele spektra i tehničkih uvjeta bez ograničenja usluga na mjestima gdje su potrebne. Niskopojasni spektar, koji je ispod 1GHz, važan je za proširenje 5G NR pokrivenosti u svim ruralnim, urbanim i prigradskim područjima. Opsezi ispod 1 GHz prikladni su za podršku Interneta Stvari.

Niskopojasni spektar osigurava uslugu bez obzira na zemljopisno područje, poboljšava kvalitetu usluge i uključuje veliku pokrivenost u zatvorenim prostorima. Ovo je moguće jer na niskim frekvencijama postoji mogućnost širenja signala na vrlo velikim područjima i unutar zgrada. Kako bi se stvorila manja razlika između povezanosti urbanog i ruralnog područja te kako bi se smanjio digitalni jaz potreban je povećani niskopojasni kapacitet, veći od 1 GHz. Povećanje kapaciteta spektra ispod 1 GHz utječe na isplativost 5G mreže. Povećanim niskopojasnim kapacitetom povećat će se signal unutar zgrade i podrška rasta Interneta Stvari. Također, u porastu je podrška za još niže frekvencije kao što je 600 MHz. Proširenjem niskopojasnog opsega brzine preuzimanja u ruralnim područjima povećat će se za 30 do 50 %. 5G usluge mogu se postaviti u istim frekvencijskim spektrima kao i LTE. Povlačenjem 2G i 3G mreža iz uporabe i oslobađivanjem spektra, sve više će operatera implementirati 5G na nižim frekvencijama kako bi iskoristili pokrivenost koju ove frekvencije nude.

Srednjopojasni spektar do sada je glavni pokretač 5G mreže u rasponu od 3.3 GHz do 3.8 GHz. Ovaj spektar nudi ravnotežu između pokrivenosti područja i kapaciteta ispunjavajući IMT - 2020 zahtjeve. Srednji pojasevi nadopunjuju niže, pogodni su za pružanje 5G fiksnog bežičnog pristupa stanovništvu u manjim urbanim sredinama i gradovima. Trebalo bi se nastojati dodijeliti što više kontinuiranog spektra od 3,5 GHz. Srednji pojas najisplativiji je od svih ostalih pojaseva. Ako se ograniči na današnje razine, ekonomska vrijednost smanjiti će se za 40% do 2030. godine.

Visokopojasni spektar, iznad 6 GHz pruža značajni kapacitet zahvaljujući vrlo velikoj propusnosti koja se može dodijeliti mobilnim komunikacijama i na taj način omogućiti poboljšani mobilni širokopojasni pristup. Loša strana korištenja visokog opsega spektra znatno je smanjena pokrivenost svake stanice i njegova osjetljivost na blokiranje. Visokopojasni spektar omogućava velike brzine 5G mreže, prikladan je za pokrivenost lokalnog područja i podržava aplikacije na mjestima gdje je potrebna visoka propusnost podataka. Također, ovaj spektar pogodan je za pokrivenost u zgradama i nadopunjavanje Wi - Fi mreže. Nadopunjuje niskopojasni i srednjopojasni spektar te pruža vlaknasto povezivanje putem fiksnog bežičnog pristupa u urbanim gusto naseljenim područjima. Visokopojasni opsezi potrebni su za usluge kao što je ultra – brz mobilni širokopojasni pristup, međutim 5G ne može isporučiti ove brzine bez milimetarskog vala (eng. *mmWave*). Milimetarski val je onaj val kojemu je valna duljina manja od 1 cm ili kojemu je frekvencija veća od 30 GHz. [16] Bežične komunikacije realiziraju se elektromagnetskim valovima opisanih frekvencijom ili valnom duljinom. Milimetarski val nudi sigurne mreže s niskom latencijom, kapacitet, brzinu i neusporedivu propusnost, no ima određene mane. Nedostaci su ograničena sposobnost pokrivanja, smanjena sposobnost prodiranja kroz materijale kao što su drvo, staklo i beton.

Na mnoge slučajeve uporabe 5G mreže utjecat će mmWave za uspješnu implementaciju. Primjeri takve uporabe 5G mreže su:

1. poboljšani širokopojasni mobilni pristup u gustim urbanim područjima,
2. fiksni bežični pristup u urbanim i ruralnim područjima,
3. 5G poslovne mreže.

Prosječno će biti potrebno 5 GHz milimetarskog vala visokopojasnog spektra na tržištu do 2030. godine. Trenutačni kapacitet 5G mreže niskog i srednjeg pojasa nije dovoljan za potražnju usluge do 2030. godine. Prosječno 4,5 GHz milimetarskog valnog spektra povrh niskog i srednjeg pojasa bit će potrebno kako bi se ostvario poboljšani širokopojasni mobilni pristup. Kako bi fiksni bežični pristup djelovao u urbanim i ruralnim područjima bit će potrebno od 350 MHz do 1.2 GHz valnog spektra. Također, poslovne mreže zahtijevat će 150 MHz valnog spektra. Očekuje se nastavak potražnje 5G usluga u narednim godinama.

U Europskoj uniji za 5G koriste se tri pojasa, 700 MHz, od 3,4 do 3,8 GHz i 26GHz. [17] U tablici 4.1. prikazana je dodjela 5G opsega po pojedinim državama u Europskoj uniji.

Tablica 4.1. Dodjela 5G opsega po pojedinim državama u Europskoj uniji [17]

<i>Država</i>	<i>Niskopojasni spektar</i>	<i>Viosokopojasni spektar</i>
<i>Finska</i>	3.4 - 3.8 GHz	26.5 - 27.5 GHz
<i>Francuska</i>	3.46 - 3.8 GHz	26 GHz
<i>Njemačka</i>	3.4 - 3.8 GHz	26 - 27.5 GHz
<i>Irska</i>	3.4 - 3.8 GHz	26 GHz
<i>Italija</i>	3.4 - 3.8 GHz	26.5 - 27.5 GHz
<i>Rusija</i>	3.4 - 3.8 GHz	26 GHz
<i>Španjolska</i>	3.4 - 3.8 GHz	26.5 - 27.5 GHz
<i>Ujedinjeno Kraljevstvo</i>	3.4 - 3.6 GHz, 3.6 do 3.8 GHz u 2019. godini	26.5 - 27.5 GHz

Opseg od 3,4 do 3,8 GHz dodijeljen je u dvadeset i dvije države Europske unije, a opseg od 700 MHz pripao je dvadeset i jednoj državi. Opseg od 26 GHz dodijeljen je samo u sedam država. Šest država, u koje pripada i Republika Hrvatska, prihvatilo je sva tri pojasa 5G spektra.

Kako bi se prilagodila mreža velikom broju uređaja za tehnologije kao što je IoT, potrebni su neiskorišteni frekvencijski pojasevi u rasponu ispod 6 GHz. 5G NR (eng. *5G New Radio*) podržava dva frekvencijska pojasa nazvana FR1 (eng. *Frequency range 1*) i FR2 (eng. *Frequency range*

2).[18] FR1, naziva se i „Sub-6“, sastoji se od frekvencijskih pojaseva ispod 7125 MHz, odnosno frekvencijski opseg je 410 MHz – 7125 MHz. FR2 sastoji se od dva frekvencijska pojasa nazvana FR2 – 1 i FR2 – 2. Frekvencijski opseg FR2 – 1 je u pojasu 24250 MHz – 52600 MHz, a FR2 – 2 u pojasu 52600 MHz – 71000 MHz. FR1 preklapa se s frekvencijama LTE mobilne mreže. U tablici 4.2. prikaz je frekvencijskih opsega FR1 i frekvencijskih opsega LTE mreže s kojima se poklapa.

Tablica 4.2. Frekvencijski opsezi FR1 i LTE [18]

<i>Broj pojasa</i>	<i>Uzlazna veza (MHz)</i>	<i>Silazna veza (MHz)</i>	<i>Ukupna širina pojasa (MHz)</i>
01	1920 – 1980	2110 – 2170	250
02	1850 – 1910	1930 – 1990	140
03	1710 – 1785	1805 -1880	170
04	1710 – 1755	2110 - 2115	445
05	824 – 849	869 – 894	70
07	2500 – 2570	2620 - 2690	190
08	880 – 915	925 – 960	80
09	1749.9 – 1784.9	1844.9 – 1879.9	130
10	1710 - 1770	2110 - 2170	460
11	1427.9 – 1452.9	1475.9 – 1500.9	68
12	698 – 716	728 – 746	47
13	777 – 787	746 – 756	41
14	788 – 798	758 - 768	40
17	704 – 716	734 - 746	42
18	815 – 830	860 – 875	60
19	830 – 845	875 – 890	60
20	832 – 862	791 – 821	71
21	1447.9 – 1462.9	1495.5 – 1510.9	63
22	3410 – 3500	3510 – 3600	180
24	1625.5 – 1660.5	1525 – 1559	135.5
25	1850 – 1915	1930 - 1995	145
26	814 – 849	859 – 894	80
27	807 – 824	852 – 869	62
28	703 – 748	758 – 803	100
29	Postoji samo silazna veza	717 – 728	11
30	2305 – 2315	2350 – 2360	55
31	452.5 – 457.5	462.5 – 467.5	15
32	Postoji samo silazna veza	1452 – 1496	44
33	1900 – 1920	1900 – 1920	20
34	2010 – 2025	2010 – 2025	15
35	1850 – 1910	1850 – 1910	60
36	1930 – 1990	1930 – 1990	60
37	1910 – 1930	1910 – 1930	20
38	2570 – 2620	2570 – 2620	50
39	1880 – 1920	1880 – 1920	40
40	2300 – 2400	2300 – 2400	100
41	2496 - 2690	2496 - 2690	194
42	3400 – 3600	3400 – 3600	200
43	3600 – 3800	3600 – 3800	200
44	703 – 803	703 – 803	100
45	1447 – 1467	1447 – 1467	20
46	5150 – 5925	5150 – 5925	775
47	5855 – 5925	5855 – 5925	70

48	3550 – 3700	3550 – 3700	150
49	3550 – 3700	3550 – 3700	150
50	1432 - 1517	1432 - 1517	85
51	1427 - 1432	1427 - 1432	5
52	3300 - 3400	3300 - 3400	100
53	2483.5 - 2495	2483.5 - 2495	11.5
65	1920 – 2010	2110 – 2200	280
66	1710 – 1780	2110 – 2200	490
67	Postoji samo silazna veza	2570 – 2620	20
68	698 – 728	753 – 783	85
69	Postoji samo silazna veza	2570 – 2620	50
70	1695 – 1710	1995 – 2020	325
71	663 – 698	617 – 652	81
72	451 – 456	461 – 466	15
73	450 – 455	460 – 465	15
74	1427 – 1470	1475 – 1518	91
75	Postoji samo silazna veza	1432 – 1517	85
76	Postoji samo silazna veza	1427 – 1432	5
n77	3300 – 4200	3300 – 4200	900
n78	3300 – 3800	3300 – 3800	500
n79	4400 – 5000	4400 – 5000	600
n80	1710 – 1785	Postoji samo uzlazna veza	75
n81	880 – 915	Postoji samo uzlazna veza	35
n82	832 – 862	Postoji samo uzlazna veza	30
n83	703 – 748	Postoji samo uzlazna veza	45
n84	1920 – 1980	Postoji samo uzlazna veza	60
85	698 – 716	728 – 746	48
n86	1710 – 1780	Postoji samo uzlazna veza	70
87	410 – 415	420 – 425	15
88	412 – 417	422 – 427	15
n89	824 – 849	Postoji samo uzlazna veza	25
n90	2496 – 2690	2496 – 2690	194
n91	832 – 862	1427 – 1432	600
n92	832 – 862	1432 – 1517	685
n93	880 – 915	1427 – 1432	552
n94	880 – 915	1432 – 1517	637
n95	2010 – 2025	Postoji samo uzlazna veza	15

Frekvencijski opsezi u Tablici 4.2. koji počinju sa nxx pripadaju samo 5G NR gdje „xx“ predstavlja broj pojasa. Ostali su samo LTE frekvencijski opsezi ili su podijeljeni između LTE i 5G. Kod FR1 koristi se FDD i TDD.

U tablici 4.3. prikazani su frekvencijski opsezi FR2 raspona.

Tablica 4.3. Dodjela frekvencijskih opsega za FR2 [19]

<i>Broj pojasa</i>	<i>Dodjela frekvencijskih opsega (MHz)</i>	<i>Širina pojasa (MHz)</i>
<i>n257</i>	26.50 – 29.50	50, 100, 200, 400
<i>n258</i>	24.25 – 27.50	50, 100, 200, 400
<i>n259</i>	39.50 – 43.50	50, 100, 200, 400
<i>n260</i>	37.00 – 40.00	50, 100, 200, 400
<i>n264</i>	27.50 – 28.35	50, 100, 200, 400

Kod FR2 koristi se samo TDD pojase širine od 50 MHz do 400 MHz.

5. RAZVOJ 5G MREŽE U HRVATSKOJ

5.1. Testiranja 5G mreže u Republici Hrvatskoj

Razvojem 5G mreže u Republici Hrvatskoj želi se motivirati razvoj države u gospodarskom smislu. Peta generacija mobilnih mreža omogućit će stanovnicima u udaljenim ruralnim područjima pristup internetu te tako osigurati kvalitetniji život.

HAKOM je 25. siječnja 2019. objavio javni poziv za dodjelu spektra 2.5 - 2.69 GHz za razdoblje od svibnja 2019. do listopada 2024. godine. Ove frekvencije pogodne su za 5G mrežu. Trenutno frekvencijski opseg 3600 MHz nije dostupan u dvije županije, a nakon studenog 2023. godine cijeli spektar bit će dostupan u Republici Hrvatskoj. Vlada RH 23. siječnja 2020. odabrala je grad Osijek kao prvi hrvatski grad u potpunosti pokriven 5G signalom.

U Republici Hrvatskoj frekvencijski pojasevi koji će se upotrebljavati su 700 MHz i 3,6 GHz. Frekvencijski opseg od 700 MHz prvobitno je korišten za digitalnu zemaljsku televiziju u DVB-T/MPEG2 formatu, ali je krajem 2020. godine obavljen prijelaz na DVB-T2/HEVC način emitiranja čime se je taj opseg oslobodio. Oslobođen frekvencijski opseg je iskorišten za 5G koji koristi FDD. Frekvencijski pojas 3,6 – 3,8 GHz koristi se kao vremenski dupleks. Vremenski dupleks koristi se samo jednom frekvencijom za uzlaznu i silaznu vezu te je prikladan za veći kapacitet. Područje od 3,6 GHz korišteno je za testiranje mreže. Područje od 26 GHz također se koristi kao vremenski dupleks.

Trenutno mrežni operateri Republike Hrvatske primjenjuju 5G mrežu upotrebom dinamičkog dijeljenja spektra (eng. *Dynamic Spectrum Sharing - DSS*)[20]. Pomoću toga osigurana je uporaba istog RF spektra za pružanje 4G i 5G usluga. S obzirom da DSS dopušta korištenje istog frekvencijskog spektra nije potrebno ulagati u novu infrastrukturu što omogućuje brzo razvijanje 5G mreže. Dosadašnje bazne postaje potrebno je softverski poboljšati kako bi se mogla implementirati 5G funkcionalnost.

U Republici Hrvatskoj tokom 2020. godine tri operatera provela su testiranja 5G mreže velikim dijelom na 3,6 GHz. Testiranja su prvo bila tehnički odrađena, a kasnije su se odvijala na određenom broju krajnjih korisnika. Prema podacima HAKOM - a na području Grada Zagreba, Grada Osijeka, Grada Rijeke, Splita, Grada Samobora, Grada Svete Nedjelje, otoka Krka, Grada Dubrovnika, Grada Hvara, Grada Novalje, Grada Raba, Grada Bjelovara, Grada Jastrebarsko, Grada Varaždina i Grada Novske izdane su dozvole za korištenje radiofrekvencijskog spektra u pojasu 3,6 GHz. Za ispitivanje u frekvencijskom pojasu od 700 MHz HAKOM je izdao dozvole za područje Grada Zagreba i Općine Bistra. [21]

Obzirom da je Grad Osijek izabran kao prvi hrvatski 5G grad obavljene su instalacije baznih postaje na lokacijama Vijenac Gorana Zobundžije 8, Vijenac Ivana Meštrovića 102, Kapucinska 37, Stjepana Radića 19A, Trg Svetog Trojstva 3, Kardinala Alojzija Stepinca 17A, Šamačka 2 i Županijska 21 koja ima dvije bazne postaje, što je prikazano na slici 5.1. [22]



Sl. 5.1. Bazne postaje i mjerne točke provedenog testiranja u gradu Osijeku [22]

Također, obavljena su kontrolna mjerenja u okolici baznih postaja u Osijeku kako bi se utvrdila razina elektromagnetskog polja. Rezultat mjerenja nije dao vrijednosti elektromagnetskog polja veće od propisane granične vrijednosti. Trenutna izloženost 5G mobilne mreže oko 3,6 GHz slična je izloženosti frekvencijama baznih postaja mobilnih telefonija. Prema Svjetskoj zdravstvenoj organizaciji trenutno nijedan štetan učinak na ljudsko tijelo nije povezan s bežičnim tehnologijama. Interakcijom radiofrekvencija i ljudskog tijela dolazi do zagrijavanja tkiva. Razine zagrijavanja tkiva izloženog radiofrekvencija trenutnih tehnologija su zanemarive.

Testiranja u frekvencijskom opsegu od 3,6 GHz obavljena su od 8.6.2020. do 19.6.2020. od 8:00 h do 17:00 h prema podacima HAKOM-a. Testiranja su napravljena tako da nije bilo prometa od strane korisnika, bazne postaje su bile u testnom načinu rada te su se mjerenja odvijala prije i nakon pokretanja prijenosa podataka. Mjerenja su se odvijala prije i nakon pokretanja prijenosa podataka zbog toga što su izmjerene vrlo niske razine elektromagnetskih polja prije pokretanja

prijenosa podataka. Zbog navedenog razloga kompatibilnost dozvoljenih elektromagnetskih polja provjeravala se poslije pokrenutog prijena podataka.

Testiranja su izvršena 1,5 m iznad tla, te je na svako od mjerenja pridružena proširena mjerna nesigurnost od 2,5 dB. Granična razina jakosti električnog polja E u frekvencijskom pojasu 3,6 GHz iznosi 24,4 V/m na području povećane osjetljivosti odnosno 58 V/m na javnim područjima. U tablici 5.1. pregled je rezultata mjernih točaka u gradu Osijeku koji su objavljeni od strane HAKOM - a.[22]

Tablica 5.1. Rezultati mjernih točaka u gradu Osijeku [22]

<i>Mjerna točka</i>	<i>Lokacija mjerne točke</i>	<i>Prosječna vrijednost E (V/m)</i>	<i>Vršna vrijednost E (V/m)</i>	<i>Granična vrijednost</i>	<i>Udaljenost od bazne postaje (m)</i>	<i>Razina mjerenja iznad tla (m)</i>
<i>Mjerna točka 01</i>	Ulica Ivana Gundulića 5B	5,787	6,465	24,4	50	18
<i>Mjerna točka 02</i>	Ulica Ivana Gundulića 5A (dvorište OŠ)	0,477	0,562	24,4	54	1,5
<i>Mjerna točka 03</i>	Ulica Ivana Gundulića 5A (krov OŠ)	0,781	1,310	24,4	66	13,5
<i>Mjerna točka 04</i>	Vijenac Gorana Zobundžije 10	1,378	1,996	24,4	45	16
<i>Mjerna točka 05</i>	Vijenac Gorana Zobundžije 2	1,692	3,123	24,4	48	16
<i>Mjerna točka 06</i>	Svetog Roka 34	2,377	3,436	24,4	80	1,5
<i>Mjerna točka 07</i>	Vijenac Gorana Zobundžije 8	1,078	1,634	24,4	36	1,5
<i>Mjerna točka 08</i>	Kapucinska 36	2,023	3,075	24,4	38	12,5
<i>Mjerna točka 09</i>	Prolaz Matice Hrvatske 4	10,827	14,164	24,4	74	20
<i>Mjerna točka 10</i>	Trg Ante Starčevića 4	2,038	2,644	58	182	1,5

<i>Mjerna točka 11</i>	Šetnica lijeve obale rijeke Drave	1,881	2,447	58	313	1,5
<i>Mjerna točka 12</i>	Šetalište k. F. Šepera 8	2,691	4,917	58	250	1,5
<i>Mjerna točka 13</i>	Gornjodra- vska obala 78	1,601	2,742	58	277	1,5
<i>Mjerna točka 14</i>	Kralja Zvonimira 11	0,883	1,222	58	143	1,5
<i>Mjerna točka 15</i>	Vijenac I. Mažuranića 2	0,462	0,685	58	164	1,5
<i>Mjerna točka 16</i>	K. A. Stepinca 8B (prolaz prema tržnici)	0,443	0,593	58	71	1,5
<i>Mjerna točka 17</i>	Trg Vatroslava Lisinskog	0,228	0,258	58	100	1,5
<i>Mjerna točka 18</i>	Trg Svetog Trojstva 5	1,209	1,504	58	70	1,5
<i>Mjerna točka 19</i>	Trg Svetog Trojstva 1	0,710	1,312	58	92	1,5
<i>Mjerna točka 20</i>	Ulica cara Hadrijana 5	1,107	1,597	58	143	1,5
<i>Mjerna točka 21</i>	Ulica kralja Petra Svačića 4	3,058	4,661	58	355	1,5
<i>Mjerna točka 22</i>	Ulica cara Hadrijana 4	3,475	4,600	24,4	282	1,5
<i>Mjerna točka 23</i>	Hrvatske Republike 41	1,636	2,567	58	94	1,5
<i>Mjerna točka 24</i>	Ivana Gundulića 56 (dvorište zgrade)	2,780	4,911	58	129	1,5
<i>Mjerna točka 25</i>	Ružina 24	1,495	2,595	58	233	1,5

Kompatibilnost dopuštenih elektromagnetskih polja i baznih postaja provjerena je gledajući granične vrijednosti elektromagnetskog polja propisane Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja Ministarstva zdravstva. [22]

U kasnijoj fazi, 12. kolovoza 2021. godine HAKOM je nakon javne dražbe objavio raspodjelu za opsege 700 MHz, 3600 MHz i 26 GHz na nacionalnoj razini te 3600 MHz na županijskoj razini.[13] Frekvencijski pojas od 700 MHz nakon javne dražbe dobiva tri uparena frekvencijska bloka širine 10 MHz na nacionalnoj razini što je ukupno 20 MHz širine. [23] Na slici 5.2. prikaz je raspodjele 700MHz frekvencijskog opsega.

694-703	703-713	713-723	723-733	733-758	758-768	768-778	778-788	788-791
Zaštitni pojas	Uzlazna veza			Rascjep	Silazna veza			Zaštitni pojas
9 MHz	30 MHz (3 x 10 MHz)			25 MHz	30 MHz (3 x 10 MHz)			3 MHz

Sl. 5.2. Raspodjela frekvencijskog opsega od 700 MHz [23]

Frekvencijski opseg je 694 MHz – 791 MHz. Prvi zaštitni pojas širine 9 MHz frekvencijskog je opsega 694 MHz – 703 MHz. Blok uzlazne veze ima frekvencijske opsege 703 MHz – 713 MHz, 713 MHz – 723 MHz, 723 MHz – 733 MHz, blok je ukupne širine 30 MHz. Između blokova se nalazi rascjep širine 25 MHz frekvencijskog opsega 733 MHz – 758 MHz.

Frekvencijski opsezi trećeg bloka silazne veze su 758 MHz – 768 MHz, 768 MHz – 778 MHz, 778 MHz – 788 MHz, blok je širine 30 MHz. Zaštitni pojas širine 3 MHz frekvencijskog je opsega 788 MHz - 791 MHz. Frekvencijski pojas 700 MHz pripada u skupinu niskopojasnih opsega što znači da omogućuje veliku pokrivenost bez obzira na zemljopisno područje, veliku pokrivenost u zatvorenim prostorima i propusnost mreže. Za frekvencijski pojas od 3600 MHz HAKOM je proveo posebno licitiranje na županijskoj razini za sedam frekvencijskih blokova i na nacionalnoj razini za trideset i dva bloka. Na slici 5.3. prikaz je raspodjele 3,6 GHz frekvencijskog opsega.

Regionalna (županijska) razina							Nacionalna razina																							
3400-3410	3410-3420	3420-3430	3430-3440	3440-3450	3450-3460	3460-3470	3480-3490	3490-3500	3500-3510	3510-3520	3520-3530	...	3750-3760	3760-3770	3770-3780	3780-3790	3790-3800													
80 MHz (8 x 10 MHz)							320 MHz (32 x 10 MHz)																							
3400 MHz							3480 MHz												3800 MHz											

Sl. 5.3. Raspodjela frekvencijskog opsega od 3600 MHz [23]

Na regionalnoj razini dodjela se vrši u frekvencijskom opsegu 3400 MHz – 3480 MHz, blok opsega 3400 MHz – 3410 MHz dodijeljen je kupcu opsega 3410 MHz – 3420 MHz. Širina ovih sedam blokova je 10 MHz. Nacionalna razina dodjeljuje se u frekvencijskom opsegu od 3480 MHz – 3800 MHz za 32 frekvencijska bloka širine 10 MHz. Frekvencijski blok 3600 MHz koristi TDD.

Frekvencijski pojas od 3,6 GHz ima nepogodne karakteristike za hrvatske operatere koji se koriste frekvencijskim spektrom 800 MHz - 2,6 GHz, ali omogućuje dostatan RF spektar omogućujući dovoljnu propusnost i kapacitet što je karakteristika srednjopojasnog opsega. Zahvaljujući svojim karakteristikama pojas od 3,6 GHz omogućuje najkvalitetniju i najbržu provedbu 5G mreže u Hrvatskoj.

Iako frekvencijski pojas od 3,6 GHz omogućuje veliki kapacitet usluge, pojas od 26 GHz omogućuje puno veći kapacitet i manje kašnjenje odnosno manju latenciju od svih frekvencijski pojaseva ispod 6000 MHz . Frekvencijski pojas od 26 GHz pripada u visokopojasni spektar stoga su ograničene sposobnosti pokrivanja i smanjena je sposobnost prodiranja kroz materijale kao što su drvo, staklo i beton. Iz toga razloga mreža treba biti izgrađena od baznih stanica kratkog doseg postavljenih na zgrade. Raspodjela frekvencijskog pojasa od 26 GHz provedeno je za pet blokova širine 200 MHz što je prikazano na slici 5.4.

26500-26700	26700-26900	26900-27100	27100-27300	27300-27500
1000 MHz (5 x 200 MHz)				
26500 MHz		27500 MHz		

Sl. 5.4. Raspodjela frekvencijskog opsega od 26 GHz [23]

Dodjela se vrši u frekvencijskom opsegu 26500 MHz – 27500 MHz. Frekvencijski opsezi blokova su 26500 MHz – 26700 MHz, 26700 MHz – 26900 MHz, 26900 MHz - 27100 MHz, 27100 MHz – 27300 MHz i 27300 MHz – 27500 MHz. U frekvencijskom pojasu 26 GHz koristi se TDD.

6. ZAKLJUČAK

Peta generacija mobilnih mreža nastala je evolucijom dosadašnjih mobilnih mreža. Jedna od razlika između dosadašnjih generacija mobilnih mreža i pete generacije jest u korištenim frekvencijskim opsezima i načinu prijenosa podataka. Arhitektura 5G mreža znatno se ne razlikuje od prethodnih, a njen rad se temelji i na uporabi postojećih baznih postaja, uz njihove dodatne modifikacije.

Dio frekvencijskih spektara koji se koriste za dosadašnje mobilne mreže prenamijenit će se za korištenje u svrhe 5G mobilne mreže. Broj novopostavljenih postaja koje pokrivaju lokacije na kojima do sada nije bilo prijema 5G signala se iz dana u dan povećava. Zbog navedenih razloga bazne postaje morat će se povezati agregacijskim mrežama velikih kapaciteta zbog sve većeg zahtjeva na brzinu prijenosa podataka. Ove zahtjeve moguće je ostvariti izgradnjom svjetlovodne mreže. Peta generacija mobilnih mreža omogućit će stanovnicima u udaljenim ruralnim područjima brži pristup internetu te tako osigurati kvalitetniji život. U Republici Hrvatskoj grad Osijek je odabran kao prvi hrvatski grad u potpunosti pokriven 5G signalom. Trenutno mrežni operateri Republike Hrvatske primjenjuju 5G mrežu uporabom dinamičkog dijeljenja spektra pomoću čega je osigurano korištenje frekvencijskog spektra koji se koristi u 4G mobilnoj mreži. Zbog svega navedenog i evolucijskog pristupa izgradnji 5G mreže ona može, pored novo dodijeljenih frekvencijskih opsega, koristiti i frekvencijske opsege postojećih mobilnih mreža.

LITERATURA

- [1] I. Livaja and Z. Klarin, *Utjecaj 5G mreže na internet stvari*, vol. 14., 1–2 vols. Šibenik: Zbornik radova Veleučilišta u Šibeniku, 2020.
- [2] “Low Latency: What It Is, Meaning & Definition | Informatica.”
<https://www.informatica.com/services-and-training/glossary-of-terms/low-latency-definition.html> [14.02.2023.]
- [3] “Network capacity - definition - GSMarena.com.”
<https://www.gsmarena.com/glossary.php3?term=network-capacity>[12.02.2023.].
- [4] s. B. Murugan, “Comparative Study of 1G, 2G, 3G and 4G,” *JECAS Ap 2013 - FEM*, Travanj 2013,
- [5] “Difference between FDMA and TDMA,” *GeeksforGeeks*, Jul. 23, 2020.
<https://www.geeksforgeeks.org/difference-between-fdma-and-tdma/> [20.2.2023.].
- [6] Ghayas A. ,“GSM frequency bands: What frequencies do GSM networks use?” *Commsbrief*, Studeni 2019., <https://commsbrief.com/gsm-frequency-bands-what-frequencies-do-gsm-networks-use/> [13.02.2023.].
- [7] Visković I., “Komutacija i upravljanje u telekomunikacijskoj mreži ”, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni studijski centar za stručne studije, Split, travanj 2011.
- [8] A. Ghayas, “3G UMTS Networks: What Is UMTS And Why Does It Use WCDMA?,” *COMMSBRIEF*, 28.06.2021. 2021. , <https://commsbrief.com/3g-umts-networks-what-is-umts-and-why-does-it-use-wcdma/> [13.02.2023.]
- [9] “LTE Frequency Bands & Spectrum Allocations,” *CableFree.*, <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/lte-frequency-bands-spectrum-allocations/> [13.02.2023.]
- [10]“TDD,” *4G LTE Networks* , <https://www.4g-lte.net/about/lte-frequency-bands/tdd/>
[13.02.2023.]
- [11] 1. L.Peterson, O.Sunay, *5G Mobile Networks: A Systems Approach*, Open Networking Foundation, Ožujak 2020.
- [12]A. Sultan, “5G System Overview,” Aug. 08, 2022. <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview> [23.01.2022.].
- [13] HAKOM, RF Spektar, HAKOM, Zagreb, Hrvatska, <https://www.hakom.hr/hr/rf-spektar/56>
[25.01.2023.]

- [14] B. Vetma Brivtić and M. Turudić, *Radiofrekvencijski spektar kao dobro od javnog interesa.*, Split: Zbornik radova Pravnog fakulteta u Splitu, 2018.
- [15] V. Nguyen, “5G Can Help the United States Recover, But Needs Mid-Band Spectrum,” *5G Americas*, 13.05.2020., <https://www.5gamericas.org/5g-can-help-the-united-states-recover-but-needs-mid-band-spectrum/> [27.01.2023.]
- [16] “MILIMETARSKI VAL”, 5G.hr, <https://www.5g.hr/pojam/milimetarski-val/> [14.02.2023.].
- [17] “5G Frequency Bands in Europe”, everythingRF, 17.02.2018., <https://www.everythingrf.com/community/5g-frequency-bands-in-europe> [25.01.2023.]
- [18] Sub-6 Cellular LTE/5G NR Frequency Band Guide, Linx Technologies, <https://linxtechnologies.com/wp/wp-content/uploads/sub-6-cellular-lte-5g-nr-frequency-band-guide.pdf>, [20.02.2023.]
- [19] “5G NR frequency bands,” *5G Radio*. <https://www.5gradio.com/5g-technology/5g-nr-frequency-bands/>, [13.02.2023.]
- [20] HAKOM, 5G mreža, HAKOM, Zagreb, Hrvatska, <https://www.hakom.hr/hr/5g-mreza-u-hrvatskoj/392> [25.01.2023.]
- [21] HAKOM, “Testiranja u RH.”, HAKOM, Zagreb, Hrvatska, <https://www.hakom.hr/hr/testiranja-u-rh/394> [28.01.2023.]
- [22] HRVATSKA REGULATORNA AGENCIJA ZA MREŽNE DJELATNOST, Mjerenja veličina elektromagnetskog polja u gradu Osijeku, Zagreb, Hrvatska
- [23] HAKOM, Javna dražba za dodjelu prava uporabe radiofrekvencijskog spektra u frekvencijskim pojasevima 700 MHz, 3600 MHz i 26 GHz Dražbovna dokumentacija, HAKOM, Zagreb, Hrvatska, https://www.hakom.hr/UserDocsImages/2021/odluke_rjesenja_presude/Izmijenjena%205G%20Dra%C5%BEbovna%20dokumentacija_20210607.pdf?vel=3657521 [07.02.2023.]
- [24] GSMA, “Road to 5G Introduction and Migration”, GSMA, London, Travanj 2018.
- [25] GSMA, “5G Low Band Spectrum” GSMA, London, Lipanj 2022.
- [26] GSMA, “The Maths of Mid-Band Spectrum,” GSMA, London, 20. Lipanj 2022.
- [28] Afrić W., “MOBILNI KOMUNIKACIJSKI SUSTAVI 4G I 5G, UTJECAJ ELEKTROMAGNETSKIH VALOVA NA LJUDSKO ZDRAVLJE I MOBILNA FORENZIKA”, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Split, 2022.

SAŽETAK

U radu je dan pregled mobilnih mreža i njihovih frekvencijskih opsega. Definirana je 1G, 2G, 3G, 4G i 5G mobilna mreža. Opisana je arhitektura i implementacija 5G mobilne mreže, jezgra mreže i radio pristupna mreža. Opisano je koji frekvencijski spektri se koriste za dosadašnje mobilne mreže i koji će se prenamijeniti za svrhu 5G mobilne mreže. Definirani su pojmovi niskopojasnog, srednjopojasnog i visokopojasnog spektra, raspodjela frekvencijskih opsega 5G mreže, frekvencijski i vremenski dupleks te uzlazna i silazna veza.

Ključne riječi: frekvencijski dupleks, niskopojasni spektar, srednjopojasni spektar, visokopojasni spektar, vremenski dupleks

ABSTRACT

The paper provides an overview of mobile networks and their frequency ranges. 1G, 2G, 3G, 4G and 5G mobile networks are defined. A description is given about the architecture and implementation of the 5G mobile network, core network and radio access network. The concepts of low-band, mid-band and high-band spectrum, distribution of frequency bands of the 5G network, frequency and time duplex and uplink and downlink are defined.

Keywords: frequency duplex, low-band spectrum, mid-band spectrum, high-band spectrum, time duplex

ŽIVOTOPIS

Elena Knapić je rođena 27.08.1999. godine i dolazi iz mjesta Zvonimirovac u blizini Slatine. Pohađala je opću gimnaziju nakon čega upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijek, smjer računarstvo. Od 2023. godine radi kao programski inženjer.