

SVEUČILIŠTE  
U SPLITU  
SVEUČILIŠNI  
ODJEL ZA  
STRUČNE STUDIJE

# MOBILNI KOMUNIKACIJSKI SUSTAVI 4G I 5G, UTJECAJ ELEKTROMAGNETSKIH VALOVA NA LJUDSKO ZDRAVLJE I MOBILNA FORENZIKA

WINTON AFRIĆ

SKRIPTA

ISBN 978-953-7220-73-0

Split, 2022.

## **IZDAVAČ**

Sveučilište u Splitu  
Sveučilišni odjel za stručne studije

## **AUTOR**

dr. sc. Winton Afrić, profesor visoke škole u trajnom zvanju

## **RECENZENTI**

dr. sc. Marko Vukšić, profesor visoke škole trajnom zvanju  
dr. sc. Tonko Kovačević, profesor visoke škole

## **LEKTURA I KOREKTURA**

izv. prof. dr. sc. Jadranka Nemeth-Jajić

**ISBN 978-953-7220-73-0**

Odlukom Povjerenstva za izdavačku djelatnost Sveučilišta u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, Urbroj: 2181-193-111/3-22-93, ovo djelo se objavljuje kao izdanje Sveučilišta u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije.

## Sadržaj

Sadržaj .....	2
Uvod .....	5
2. Razvoj mobilnih komunikacijskih sustava .....	7
2.1. Arhitektura mobilnih mreža i unaprjeđenja.....	12
3. Tehnički nedostaci sustava 3G UMTS koji su doveli do potrebe za daljnjim razvojem i novim generacijama mobilnih komunikacijskih sustava.....	14
3.1. Arhitektura 3G UMTS mreže .....	16
3.2. ATM tehnologija ( <i>Asynchronous Transfer Mode</i> ) .....	17
3.3. CDMA tehnologija .....	24
3.3.1. Ortogonalnost funkcija.....	24
3.3.2. Prijenos signala ortogonalnim funkcijama .....	25
3.3.3. Zatvoreni skup ortogonalnih Walshevih funkcija koje se koriste u sustavima s kodnom podjelom .....	27
4. 4G LTE.....	38
4.1. Značajna unaprjeđenja sustava 4G u odnosu na sustave 3G.....	38
4.2. Arhitektura sustava 4G, frekventni opsezi i način rada sustava 4G.....	39
eNode B .....	39
MME ( <i>Mobile Management Entity</i> ) .....	39
S-GW.....	40
PDN-GW .....	40
HSS.....	41
4.3. OFDMA tehnologija prijenosa .....	41
4.4. Zračno sučelje 4G LTE.....	48
4.4.1. Osnovne osobine LTE zračnog sučelja.....	48
4G LTE kanali .....	52
Fizička razina 4G LTE kanala .....	53
4G LTE transportni kanali .....	53
4G LTE logički kanali .....	54
5. 5G sustavi .....	56
5.1. Arhitektura sustava 5G, frekventni opsezi i načini rada .....	57
5.2. 5G MREŽA U HRVATSKOJ .....	58
Frekvencijski pojas 700 MHz .....	59
Frekvencijski pojas 3600 MHz .....	59

Frekvencijski pojas 26 GHz .....	60
5.3. 5G NR modulacijska shema .....	61
5.4. Usporedba 4G LTE i 5G NR .....	63
6. Utjecaj EMZ-a na ljudsko zdravlje .....	64
6.1. Što su to elektromagnetski valovi .....	64
6.2. Ukupni spektar EMV-a u frekvencijama koje se koriste u radiokomunikacijama .....	70
6.2.1. Čimbenici koji utječu na ljudsko zdravlje pri izloženosti ljudskog tijela EMV zračenju .....	71
6.2.2. Trajanje izloženosti EMV-u.....	73
6.3. Studije koje se provode radi zaštite ljudskog zdravlja od izvora EMV-a.....	73
6.4. Međunarodni propisi i hrvatska regulativa za zaštitu od elektromagnetskih zračenja .....	75
7. Mobilna forenzika .....	78
7.1. Ispisi mobilnog prometa.....	78
7.1.1. Kriteriji ispisa poziva i sintagma ispisa poziva .....	79
7.1.2. Čitanje ispisa poziva i značenje pojedinih stavki.....	81
7.1.2.1. ANumber .....	82
7.1.2.2. IMSI ( <i>A International Mobile Subscriber Identity</i> ) .....	82
7.1.2.3. AIMEI ( <i>A International Mobile Equipment Identity</i> ) .....	83
7.1.2.4. ANetwork .....	84
7.1.2.5. ACellID .....	85
7.1.2.6. Značenje istih podataka na B strani je isto, ali u tom slučaju radi se o pretplatniku koji prima poziv .....	87
7.1.2.7. <i>Start Time</i> i <i>End Time</i> .....	87
7.1.2.8. <i>Duration</i> .....	88
7.1.2.9. <i>Service</i> .....	88
7.2. Mobilni brojevi .....	89
7.2.1. TMSI ( <i>Temporary Mobile Subscriber Identity</i> ) .....	89
7.2.2. IMEISV ( <i>International Mobile Equipemnt Identity and Software Version</i> ) .....	89
7.2.3. MSRN ( <i>Mobile Station Roaming Number</i> ) .....	90
7.2.4. LAI ( <i>Location Area Identity</i> ).....	90
7.2.5. CGI ( <i>Cell Global Identity</i> ) .....	91
7.2.6. BSIC ( <i>Base Station Identity Code</i> ).....	91
7.2.7. LN ( <i>Location Number</i> ) .....	91
7.2.8. RSZI ( <i>Regional Subscription Zone Identity</i> ).....	92
7.3. Zaštita privatnosti komunikacije kod mobilnih komunikacijskih sustava .....	93
7.3.1. Zakonske regulative ovlaštenog prisluškivanja .....	94
7.3.2. Neovlašteno prisluškivanje i sigurnost mobilnih komunikacijskih sustava.....	95

7.3.3. Neovlašteni pristup mobilnoj komunikaciji .....	96
7.4. Mobilna oprema .....	99
7.4.1. Mobilni uređaji .....	100
7.4.2. SIM kartica ( <i>Subscriber Identity Module</i> ) .....	101
7.5. Forenzična analiza mobilnih komunikacija .....	107
7.5.1. Izrada zahtjeva za podacima od mobilnih operatora .....	108
7.5.2. Metodologija analize mobilne opreme .....	110
7.5.3. Metodologija analize ispisa poziva promatrane osobe ili promatranih osoba kako bi se zaključilo o kretanju i komunikaciji s ostalim okrivljenima .....	113
Literatura .....	127

## Uvod

Skripta „Mobilni komunikacijski sustavi 4G i 5G, utjecaj elektromagnetskih valova na ljudsko zdravlje i mobilna forenzika“ nastavni su materijal namijenjen studentima kolegija Mobilne komunikacije (161881) (SEL027). Ova skripta nastavak su tiskanih skripta Veleučilišta u Splitu, čiji je pravni slijednik Odjel za stručne studije Sveučilišta u Splitu, pod nazivom „Mobilni komunikacijski sustavi“. Skripta „Mobilni komunikacijski sustavi“ tiskana su 2002. godine, a detaljno obrađuju mobilne komunikacijske sustave 2G i 3G te bazične principe na kojima se temelji njihov rad.

U proteklim dvama desetljećima došlo je do snažnog daljnjeg razvoja mobilnih komunikacijskih sustava, pojave 4G i 5G. Javila se potreba za tiskanjem nastavnog materijala koji detaljnije objašnjava nove sustave mobilnih komunikacija, posebno one koji se primjenjuju u Europi. Skripta „Mobilni komunikacijski sustavi 4G i 5G, utjecaj elektromagnetskih valova na ljudsko zdravlje i mobilna forenzika“ uz prethodno navedena skripta čini cjelovit nastavni materijal namijenjen studentima dodiplomskog studija.

Nastavni materijal pod nazivom „Mobilni komunikacijski sustavi 4G i 5G, utjecaj elektromagnetskih valova na ljudsko zdravlje i mobilna forenzika“ u uvodnom dijelu objašnjava razloge zbog kojih je došlo do daljnjeg ubrzanog razvoja mobilnih komunikacijskih sustava. Također se navode i obrazlažu nove komunikacijske potrebe te se upozorava na nedostatke sustava 2G i 3G. Daljnji razvoj mobilnih komunikacijskih sustava s jedne strane potaknut je rastućim komunikacijskim potrebama, a s druge strane primjenom novih spoznaja iz telekomunikacijskih (teorije radioprijenosa) i informatičkih znanosti.

Svakih desetak godina dolazilo je do pojave nove generacije mobilnih komunikacijskih sustava, počevši od 1G mobilnih komunikacijskih sustava pa sve do posljednje generacije 5G. Možemo govoriti o kontinuiranom razvoju mobilnih komunikacijskih sustava jer se između pojedinih generacija pojavljuju unaprjeđenja prethodne generacije, pa se tako često navodi 2+ ili 2,5G unaprjeđenje GSM sustava s GPRS-om, zatim 3,5G unaprjeđenje UMTS sustava s HSPDA-om i tako dalje. Neki autori u fragmentaciji unaprjeđenja idu dotle da navode 3,75G. Ova skripta, osim što detaljno objašnjava sustave 4G i 5G, ima za cilj pokazati i razvojnu liniju koja vodi od sustava 1G do današnjih sustava 5G.

U ovom nastavnom materijalu govori se i o štetnom utjecaju elektromagnetskog zračenja na ljude i okoliš, o normama zaštite radnog osoblja i opće populacije, o tome na čemu se te norme temelje, tko ih donosi i na temelju kojih spoznaja. Ovaj dio ima velik značaj za buduće inženjere elektrotehnike, jer će se u svojem budućem profesionalnom radu, ne samo s mobilnim komunikacijskim sustavima nego i sa svim drugim tehničkim sustavima koji se koriste EMV-om, sresti s čitavim nizom pitanja iz domena utjecaja elektromagnetskih valova na ljudsko zdravlje i okoliš. Važno je da budući inženjeri tijekom svojega rada u gospodarstvu znaju odgovoriti na ta pitanja. Prilikom pojave svake nove generacije mobilnih komunikacijskih sustava dolazi do burne reakcije građanstva te iznošenja argumenata za i protiv koji vrlo često nisu utemeljeni na znanstvenim spoznajama.

U posljednjem poglavlju ovog materijala govori se o mobilnoj forenzici, to jest o čitanju podataka iz ispisa prometa operatora i svemu što je moguće zaključiti na osnovi njih. Ovaj materijal od značaja je za buduće inženjere ako se angažiraju kao stalni sudski vještaci za telekomunikacije.

Da bi se mogao čitati i razumjeti ovaj nastavni materijal, nije nužno u detalje poznavati prethodni materijal „Mobilni komunikacijski sustavi“, dakle poznavati 2G i 3G sustave, ali za studente kolegija Mobilne komunikacije (161881) (SEL027) prethodni materijal svakako se preporuča radi boljeg razumijevanja ukupnog razvojnog procesa mobilnih komunikacijskih sustava, kao i određenih specifičnosti vezanih uz planiranje i dizajniranje sustava o kojima u ovom materijalu neće biti govora.



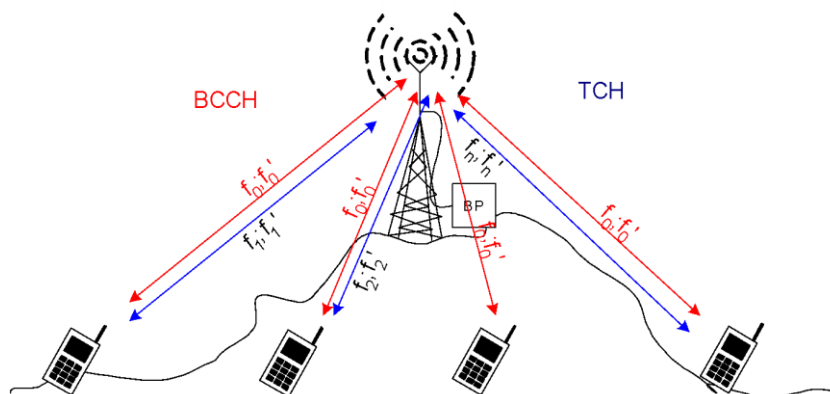
## 2. Razvoj mobilnih komunikacijskih sustava

Sredinom sedamdesetih godina prošlog stoljeća dolazi do prve pojave mobilnih komunikacijskih sustava. Još pedesetih godina postojala je radiotelefoniya u Sjedinjenim Američkim Državama. Radiotelefoniya ne spada u mobilne komunikacijske sustave iako se je koristila unutar automobila, sredstava koja su u pokretu. Kod radiotelefoniye pretplatnik je na trajnu uporabu dobivao dvije radijske frekvencije, jednu za silazni smjer prijenosa i jednu za uzlazni smjer prijenosa. Frekvencije su bile isključivo za njegovo korištenje, ali u okviru grada ili uže regije u kojoj je pretplatnik živio. U nekom drugom gradu te iste frekvencije zakupio bi netko drugi. Kako je radiofrekvencijski spektar ograničen, ovakvih pretplatnika moglo je biti malo čak i na ograničenom području. Radijske frekvencije nisu se koristile optimalno, velik dio vremena bile su neupotrijebljene.

Osnovna značajka mobilne telefonije za razliku od radijske telefonije jest u tome da se isti uređeni par frekvencija (FDD – *Frequent division duplex* – rad s dvije frekvencije, jedna za uzlazni, druga za silazni smjer prijenosa) ili ista frekvencija (TDD – *Time division duplex* – rad na istoj frekvenciji s izmjenama smjera prijenosa) koristi za različite korisnike onda kada je frekvencija slobodna ili dostupna odnosno kada su frekvencije slobodne ili dostupne.

Da bi automatska raspodjela resursa mreže (slobodnih frekvencija unutar jedne ćelije) bila moguća, mora u ćeliji postojati jedan zajednički signalizacijski kanal, takozvani BCCH kanal. Zajednički kanal slušaju svi mobiteli koji su u ćeliji, preko njega primaju ili šalju pozive, preko njega dobivaju naredbu za prelazak na jedan od slobodnih prometnih kanala, TCH kanal.

Da bi ovakav rad bio moguć, kao što je to prikazano na slici 2.1., koristi se protokol zajedničkog dijeljenja resursa radiomreže, takozvani ALOHA protokol, razvijen početkom sedamdesetih godina 20. stoljeća na Sveučilištu na Havajima za korištenje radijske komunikacije s avionima. Temeljem ALOHA protokola kasnije je razvijen Ethernet protokol za lokalne računalne mreže.



Slika 2.1. Zajednički kanal BCCH i ALOHA protokol po kojem radi

Korištenje ALOHA protokola za BCCH kanal jest nešto što je zajedničko za sve generacije mobilnih mreža od prve do posljednje. Fizička realizacija zajedničkog BCCH kanala razlikuje se od generacije do generacije mobilnih sustava, ali uvijek se koristi ALOHA protokol.

ALOHAnet, također poznat kao ALOHA sustav, ili jednostavno ALOHA, bio je pionirski sustav računalnog umrežavanja razvijen na Sveučilištu na Havajima. ALOHAnet je počeo s radom u lipnju 1971. godine, pružajući prvu javnu demonstraciju bežične mreže paketnih podataka. ALOHA je izvorno označavala *Additive Links On-line Hawaii Area*.



ALOHA protokol se 1980 -ih ograničeno koristio u 1G mobilnim sustavima za signalizaciju i kontrolu. Krajem 1980-ih, europska grupa za standardizaciju GSM-a, koja je radila na paneuropskom digitalnom mobilnom komunikacijskom sustavu GSM, uvelike je proširila uporabu ALOHA protokola za pristup radijskim kanalima u mobilnoj telefoniji. Početkom 2000-ih ALOHA protokol se uvodi u 2.5G i 3G, a kasnije u 4G i 5G mobilnim mrežama.

ALOHA protokol je poveznica koja je zajednička za sve mobilne komunikacijske sustave i čini temelj organizacije rada u zajedničkom BCCH kanalu.



Slika 2.2. Povijest razvoja mobilnih komunikacijskih sustava

Osnovne su razlike između pojedinih generacija mobilnih komunikacijskih sustava sljedeće:

- 1G analogni sustavi mobilnih telefona koji **podržavaju povezivanje kanala**.
- 2G sustavi **digitalnih mobilnih telefona** koji također **podržavaju povezivanje kanala** čak i kada je u pitanju **paketni prijenos informacija (GSM 9,6 Kbit/s)**.
- 2+G (2,5) GSM kod kojega je uvedeno **GPRS unaprjeđenje** i 3G **digitalni sustavi mobilnih telefona jednako podržavaju kanalsko i paketno prospajanje**.
- 4G digitalni sustavi mobilnih komunikacija temelje se **isključivo na paketnom prospajanju korisničkih informacija**.
- 5G digitalni sustavi mobilnih telefona teže značajno povećati ukupni kapacitet prijenosa informacija, konsolidirati sve komunikacijske potrebe i općenito podržati IoT (*IoT – Internet of Things*).

**Sustavi 1G** nisu imali odvojen identitet korisnika od identiteta uređaja. Nije postojala SIM kartica, već je pretplatnički broj bio određen uređajem. Sustavi 1G nisu imali provjeru vjerodostojnosti korisnika niti je prijenos informacija u zračnom sučelju bio kriptiran. Jedan radijski kanal bio je i jedan komunikacijski kanal koji je radio primjenjujući frekventnu modulaciju. Razgovor se je mogao prislušivati u zračnom sučelju ugađanjem na radijski kanal korisnika. Sustavi su radili u frekvencijskom dupleksu FDD. Usluga nije bila zamišljena kao masovna, veličina ćelije ovisila je samo o snazi odašiljača i u prosjeku je iznosila oko 60 km. Mobilni telefon je automatski birao onaj signal bazne postaje koji je bio najviše razine (najači).

**Sustavi 2G (GSM) uveli su digitalni prijenos govora, provjeru vjerodostojnosti korisnika i kriptiranje informacije u zračnom sučelju.** Kako je provjera vjerodostojnosti, kao i kriptiranje

informacije, u zračnom sučelju odnos između krajnjeg terminala (mobilnog uređaja) i središnjeg dijela mreže isti postupak je zadržan i kod sljedećih generacija mobilnih komunikacijskih sustava. Navedeno je detaljno opisano u skriptama „Mobilni komunikacijski sustavi“ Veleučilišta u Splitu iz 2002. godine na stranici 95. do 105. Kod 2G mobilnih komunikacijskih sustava identitet korisnika i identitet uređaja odvajaju se uvođenjem SIM kartice, koja se prepoznaje po svojem MSISDN i IMSI broju, od uređaja koji se prepoznaje po svojem IMEI broju. Sustavi 2G podržavaju paketni prijenos, ali preko uspostavljenog kanala korištenjem takozvanog podatkovnog kanala TCH brzine 9,6 Kbit/s. Prva GSM mreža počela je s radom 1991. godine u Parizu i tada je već kapacitet za podatkovni prijenos bio nedovoljan za tadašnje komunikacijske potrebe korisnika.

**Sustavi 2+ ili 2,5G** donose značajan napredak mreže 2G uvođenjem takozvanog GPRS unaprjeđenja, što je već kod ovih sustava dovelo do ravnopravne komutacije kanala i paketa. Ovo unaprjeđenje je napravljeno kako bi se povećao kapacitet podatkovnog prijenosa koji ovim unaprjeđenjem dolazi do 56 Kbit/s. Da bi unaprjeđenje bilo moguće, u središnji dio mreže dodana su dva nova uređaja (entiteta): to su čvor za komutaciju paketa SGSN i čvor za prospajanje prema podatkovnim mrežama GGSN, a u radiomreži izvršene su preinake na područnom kontroleru BSC. Ovo unaprjeđenje je bilo od izuzetnog značenja jer je pripremio središnji dio mobilne mreže za prihvat nove radiomreže 3G.

**Sustavi 3G** mobilnih komunikacija ostvaruju se na način da se na središnji dio mreže kod koje je izvršeno GPRS unaprjeđenje dodaje nova radijska mreža naziva UTRAN mreža. U radijskoj mreži izvršena je promjena u zračnom sučelju te su uvedene bazne postaje naziva Node-B. U radijskoj mreži područni kontroler mijenja se ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) čvorom koji sada nosi oznaku RNC (*Remote Node Controller*). Također, radi lakšeg prospajanja između lokacijskih područja, uvodi se novi signalizacijski link koji povezuje susjedne RNC čvorove. Sve veze od baznih postaja prema područnom kontroleru, među područnim kontrolerima i između područnog kontrolera i središnjeg dijela mreže (dva linka, jedan k MSC, a drugi k SGSN) temelje se na ATM tehnologiji. Sustavi treće generacije predviđeni su da unutar ćelije za sve korisnike osiguravaju ukupni informacijski volumen od 2,048 Mbit/s.

Prve verzije sustava 3G UMTS u Europi (koji su logični nastavak 2G sustava GSM) i CDMA 2000 u Sjevernoj Americi (koji su logični nastavak 2G sustava IS95) pojavile su se u komercijalnoj uporabi 2002. godine (prvi UMTS sustav u Japanu). Već je tada bilo sasvim izvjesno da će tada buduća (sadašnja) širokopolasna globalna mreža biti temeljena na Ethernet prijenosu, a ne na ATM tehnologiji prijenosa. To je trenutak kada se ATM transportna tehnologija napušta kao tehnologija koja bi u budućnosti trebala podržati rad globalne širokopolasne mreže. Dakle, na tržištu su se pojavili 3G sustavi koji u svojoj pozadinskoj mreži imaju ATM tehnologiju, a ta se tehnologija u tom trenutku napušta i prelazi se na Ethernet.

Drugi veliki nedostatak u trenutku kada se 3G mreže pojavljuju na tržištu jest nedovoljan ukupni kapacitet informacijskog volumena od 2,048 Mbit/s. Treba znati da je porast potrebe za informacijskim volumenom neočekivano brzo rastao u devedesetim godinama prošlog stoljeća i prvom desetljeću ovog stoljeća. Tako je na primjer 1996. za ukupno povezivanje grada Splita na širokopolasnu mrežu (dakle za sve korisnike) bilo sasvim dovoljno 2,048 Mbit/s, da bi već početkom ovog stoljeća taj informacijski volumen bio nedovoljan za jednog korisnika. Suvremeni planovi Europske komisije za razvoj širokopolasnog pristupa već su u *agendi* za razdoblje 2010. – 2020. predviđali 100 Mbit/s za svakog korisnika i to 50 % 1 Gbit/s, a današnji planovi Europske komisije predviđaju da se za sve korisnike osigura i do 400 Mbit/s do 2025. godine. Ti planovi nisu ostvareni u cijelosti jer je za njihovu realizaciju potrebno bakrenu pristupnu infrastrukturu zamijeniti svjetlovodnom. Daljnji razvoj mobilnih mreža nastoji slijediti generalne razvojne trendove te kod

sljedećih generacija dolazi do stalnog povećanja informacijskog volumena koji jedna ćelija može pružiti svim svojim korisnicima. Jedan od velikih problema kod 3G sustava nalazio se u relativno velikoj potrošnji baterije. Sustav 3G temeljio se je na kodnoj podjeli među korisnicima (CDMA). Ti sustavi zahtijevaju snažnu i stalnu kontrolu izlazne snage mobilnih uređaja, a porast signalizacije značajno utječe na potrošnju energije. Sve navedeno dovelo je do toga da se je nakon instalacije prvih 3G mreža odmah počelo razmišljati o njihovu unaprjeđenju, prvenstveno u cilju povećavanja informacijskog volumena.

**Sustavi 3,5G** unaprjeđeni su mobilni komunikacijski sustavi treće generacije. Kod sustava UMTS, koji se temelji na WCDMA tehnologiji, jedno od najznačajnijih unaprjeđenja bilo je HSPDA gdje se je povećanje informacijskog volumena temeljilo na korištenju većeg broja kodova, ali većeg stupnja modulacijske složenosti po pojedinom kodu. Upravo zbog korištenja većeg stupnja modulacijske složenosti takve UMTS ćelije mogle su ukupni informacijski volumen povećati na 7,2, a onda na 14 Mbit/s. Obecavala su se unaprjeđenja do 56 Mbit/s, ali to nije nikad ostvareno jer se povećanje modulacijske složenosti ne može vršiti u beskonačnost. Sve složeniji modulacijski postupci za svoju primjenu zahtijevaju bolji odnos signala i šuma, što znači stabilnu radijsku vezu. Relativno mali šum signal velike modulacijske složenosti čini nečitkim. U razmišljanjima o daljnjim unaprjeđenjima kazalo se je kako s time ne treba žuriti pa su ta razmišljanja stavljena pod naziv LTE (*Long Term Evolution*). Kada se čitaju članci o LTE tehnologiji iz 2008. pa sve do 2012. godine o LTE tehnologiji, u njima se ne govori kao o 4G tehnologiji, nego kao o unaprjeđenju 3G tehnologije. Međutim, između 2012. i 2014. godine postupno se je uvidjelo da su izmjene koje je potrebo napraviti radi unaprjeđenja sustava tolike da se više ne može govoriti o unaprjeđenju sustava 3G, nego da se radi o potpuno novom sustavu mobilnih komunikacija koji se od 2014. pa nadalje vodi pod nazivom 4G LTE.

**Sustavi 4G** mobilnih komunikacija poznati su pod nazivom 4G LTE. Uspostavom sustava 4G došlo je do značajnih promjena u odnosu na sustave 3G. Između 4G i 3G najveća je međugeneracijska razlika u mobilnim komunikacijskim sustavima.

Promijenjen je način rada u zračnom sučelju, za raspodjelu signala koristi se umjesto jednog podnositelja skup ortogonalnih podnositelja, takozvana OFDM tehnika prijenosa. Osnovna značajka OFDM prijenosa jest u tome da je otporan na pogreške koje nastaju zbog višestrukog prostiranja, a što su najveći izvori pogrešaka u *broadcast* radijskom prijenosu signala (kasnije u ovim skriptama detaljno se objašnjava OFDM prijenos, n. a.) U pozadinskoj mreži, povezivanju radiomreže na središnji dio sustava, u samoj središnjoj mreži i njezinu povezivanju s drugim mrežama koristi se Ethernet tehnologa prijenosa, što i odgovara transportnoj razini globalne širokopolasne mreže. Zatim su značajne promjene u ukupnoj arhitekturi mobilne mreže, radio dijelu i središnjoj mreži.

U radijskoj mreži kod sustava 4G, a i kod sljedećeg sustava 5G, ne postoji čvor poput područnog kontrolera iz 2G (BSC) i 3G (RNC) tehnologija mreža. Ukidanjem ili izbacivanjem toga čvora iz arhitekture radijske mreže dio funkcija koje je on obavljao prelaze na baznu postaju i ona dobiva oznaku eNode-B, a drugi i veći dio upravljačkih funkcija prelazi na središnji dio mreže i to na dio koji se je prije označavao kao VLR (*Visitor Location Register*), a sada nakon preuzimanja novih funkcija poprima oznaku MME (*Mobility Management Entity*) i postaje najznačajniji čvor za upravljanje prometom u mreži. Izbacivanje čvora iz arhitekture radijske mreže kao što je područni kontroler s jedne strane dovelo je do ubrzavanja protoka paketa kroz mrežu (jedan je čvor manje, a svaki čvor unosi kašnjenje). S druge strane, kod 4G LTE otvorilo je problem brzine prelaska korisnika iz ćelije u ćeliju. Kako bi se taj problem riješio, uvodi se signalizacijski link koji povezuje bazne postaje koje su susjedne jedna drugoj, vrlo često označavan kao X2 link. Unutar arhitekture

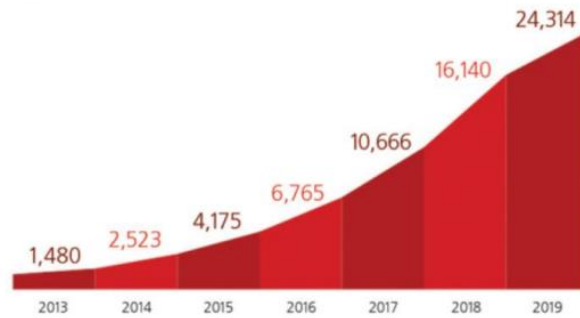
4G mreže čak i entiteti koji ne mijenjaju značajno svoje funkcije dobivaju nove i do sada manje uobičajene nazive. O svim ovim izmjenama, kao i o arhitekturi 4G mreže, kasnije će biti više govora.

Mreže 4G za razliku od 3G mreža imaju značajan porast informacijskog volumena. U silaznom smjeru maksimalno mogući kapacitet kreće se do 175 Mbit/s, a u uzlaznom do 80 Mbit/s. Međutim, to su teoretski limiti koji vrijede u laboratorijskim uvjetima, a u uvjetima stvarne eksploatacije sustava realne vrijednosti u silaznom smjeru nešto su niže.

**Sustavi 5G** dolaze na tržište kao logični nastavak 4G sustava. Osnovna ideja ovih sustava bila je da zadovolje sve komunikacijske potrebe korisnika i široko podrže koncept IoT (*Internet of things*). Između pojave 4G i 5G prošlo je samo nekoliko godina u kojima nije došlo do tako širokih i dubokih tehnoloških inovacija i promjena transmisijskih koncepata kao između 3G i 4G, te su zbog toga i promjene u arhitekturi mreže znatno manje i jednostavnije. Veći broj promjena kod 5G u odnosu na 4G mreže leži u proširenju usluga koje mobilne komunikacije trebaju podržati. U arhitekturi mreže, kako bi se smanjilo kašnjenje (*latency*), servisni uslužni čvor S-GW (ili kako je označavan kod 3G sustava SGSN) i čvor za povezivanje s drugim podatkovnim mrežama PDN GW (ili kako je označavan u 3G mrežama GGSN) objedinjeni su u jedan čvor. Objedovanje tih dvaju prometnih čvorova u jedan dovodi do ubrzanja procesiranja paketa te time i do smanjenja kašnjenja, što je izuzetno važno za usluge u realnom vremenu. Promjena kod 5G u odnosu na 4G jest i u radu zračnog sučelja u kojem je i dalje zadržan OFDM kao način raspodjele signala, ali podnositelji kod 5G mreža nemaju fiksnu širinu kao kod 4G mreža (15 KHz), već ta širina može biti promjenjiva (15, 30, 60, ..... 240 KHz) pa se na taj način 5G sustav može prilagoditi različitim širinama radijskih kanala. Kod 5G sustava javljaju se novine i u korištenju radiofrekvencijskog spektra. U Europi za rad 5G sustava predviđeni su frekventni opsezi: 700 MHz područje (prelaskom emitiranja televizije s DVBT1 na DVBT2 oslobađa se dio spektra od 694 do 791 MHz i prenamjenjuje za 5G sustave), 3,5 GHz područje (od 3,4 do 3,8 GHz) i područje iznad 26 GHz. Do sada se u mobilnim komunikacijama nije koristilo tako visoko područje kao što je područje iznad 26 GHz, te je velik broj pitanja oko korištenja ovog područja. Svi eksperimenti s 5G mrežama koji su u Europi i u Republici Hrvatskoj rađeni tijekom 2020. godine odvijali su se na frekvencijama oko 3,5 GHz (3460 MHz sa širinom opsega 80 MHz), a 2021. godine u većini europskih država završena je tranzicija emitiranja TV programa s DVBT1 na DVBT2 te je započela instalacija 5G sustava u oslobođenom frekvencijskom području 700 MHz. Korištenje visokih frekvencija u mobilnim komunikacijama omogućuje malu ćeliju od samo nekoliko desetaka metara, zahtijeva izravnu optičku vidljivost, ali omogućuje primjenu znatno veće širine radijskog kanala što onda dopušta daleko veće informacijske volumene u prijenosu. O svim tim detaljima u nastavku ovih skripta daju se detaljnija objašnjenja.

Mobilni komunikacijski sustavi razvijaju se u razdoblju nešto malo dužem od četrdesetak godina. U tom relativno kratkom razdoblju ovi su sustavi doživjeli burne tehnološke promjene i unaprjeđenja; u prosjeku svakih deset godina javlja se nova generacija mobilnih komunikacijskih sustava, koja u sebi uključuje sve najnovije tehnološke promjene koje su ostvarene od pojave prošle generacije. Mobilni komunikacijski sustavi su cjeloviti i složeni sustavi te se u njihov rad ugrađuju najnovije spoznaje iz radiomodulacijskih postupaka, kompresije i obrade signala, mrežnog upravljanja prometom itd. U njima se ogleda ukupni napredak telekomunikacijskih i računalnih tehnologija u razdoblju nešto kraćem od posljednjih pola stoljeća, a to je razdoblje ubrzanog i intenzivnog razvoja ICT tehnologija.

(Petabajt/mjesec)



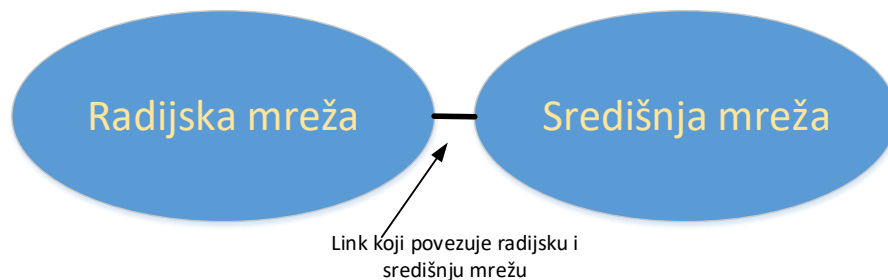
Slika 2.3. Mjerenja prometa mobilnih podataka u svjetskim mobilnim telekomunikacijskim mrežama od 2013. do 2019.

## 2.1. Arhitektura mobilnih mreža i unaprjeđenja

Arhitektura mobilnih mreža svih generacija sastoji se od dvaju osnovnih dijelova, a to su:

- radijska mreža i
- središnja mreža mobilnog sustava.

Kao što to prikazuje slika 2.1.1.



Slika 2.1.1. Osnovna arhitektura mobilne mreže

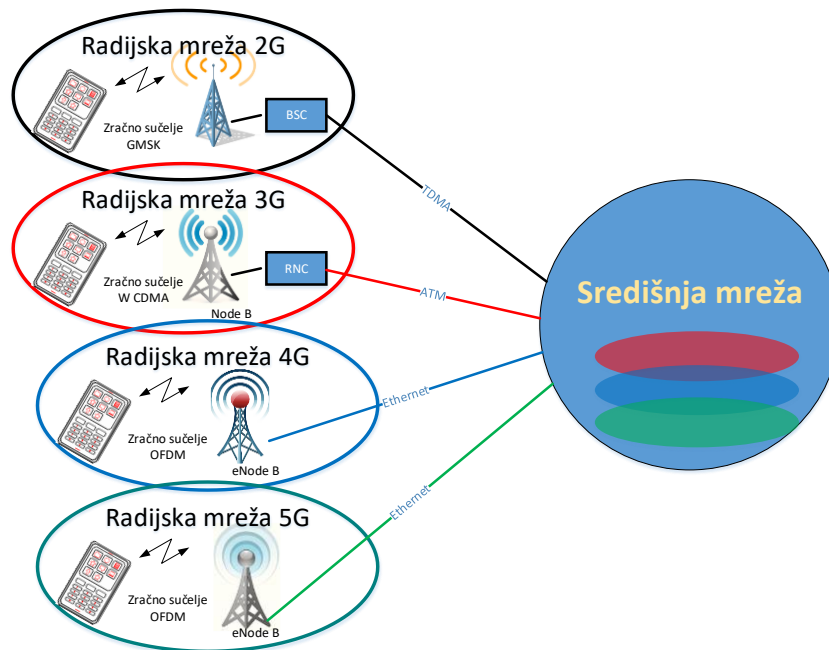
Radijska mreža i središnja mreža povezane su sučeljem koje je bez obzira na generaciju mreže detaljno standardizirano. To načelno omogućuje da se na središnju mrežu jednog proizvođača može priključiti radijska mreža drugog proizvođača ili radijske mreže većeg broja različitih proizvođača.



Slika 2.1.2. Radijska mreža sa svojim osnovnim dijelovima

Mobilni uređaj je sastavni dio radijske mreže, a s višom razinom (baznom postajom) povezan je preko zračnog sučelja. Za svaku generaciju mobilne mreže zračno sučelje uvijek je standardom

detaljno opisano i to omogućuje da mobilni uređaji (mobiteli) različitih proizvođača mogu raditi preko mreže bilo kojeg drugog proizvođača.



*Slika 2.1.3. Arhitektura mobilnih mreža kod kojih uz odgovarajuću nadogradnju u središnjoj mreži ista središnja mreža prihvaća radijsku mrežu nove generacije*

Kada govorimo o različitim generacijama mobilnih komunikacijskih sustava, onda ne govorimo o potpuno odvojenim sustavima. Radi se o jednoj te istoj središnjoj mreži na koju se prihvaćaju različite generacije radijskih mreža. Da bi to bilo moguće, uvijek su potrebna i odgovarajuća unaprjeđenja u središnjoj mreži.

Ovakav način generacijske nadogradnje sustava omogućuje to da korisnik, kada iz pokrivanja 4G prijeđe u pokrivanje 2G, nastavlja razgovor bez prekida samo na tehnologiji koja je dvije generacije niža. Dakle, mijenja radijsku mrežu što znači tehnologiju i frekvenciju rada. Da bi ovakvi glatki prelasci bili mogući, mora u vremenskoj organizaciji svake mreže postojati zajednički vremenski interval koji to omogućuje, a taj interval je 120 ms, te mora postojati vremenska usklađenost između intervala u pojedinim generacijama radijskih mreža.

- Kod mreža 2G TDMA okvir (TDMA okvir ima 8 TS od 577 $\mu$ s) traje 4,615 ms i nakon 26 TDMA okvira imamo vrijeme od 120 ms.
- Kod mreža 3G TDMA okvir (TDMA okvir ima 16 TS od 625 $\mu$ s) traje 10 ms i nakon 12 TDMA okvira imamo vrijeme od 120 ms.
- Kod mreža 4G 5G TDMA okvir (TDMA okvir ima 10 TS od 1ms) traje 10 ms i nakon 12 TDMA okvira imamo vrijeme od 120 ms.

### 3. Tehnički nedostaci sustava 3G UMTS koji su doveli do potrebe za daljnjim razvojem i novim generacijama mobilnih komunikacijskih sustava

U ovom dijelu skripta nećemo ulaziti u detalje 3G sustava jer su oni objašnjeni u skriptama „Mobilni komunikacijski sustavi“ Veleučilišta u Splitu od 2002. godine. Napomenut ćemo samo nekoliko bitnih karakteristika ovih sustava koji su odmah nakon uvođenja doveli do potrebe za izmjenama i unaprjeđenjima.

#### 1. Nedovoljan informacijski volumen

3G sustavi kao što je UMTS i CDMA 2000 razvijani su odmah nakon uvođenja sustava 2G (GSM koji se temelji na FDMA/TDMA/FDD u Europi i IS-95 koji se temelji na FDMA/CDMA/FDD u SAD-u). Taj je razvoj započeo sredinom devedesetih godina prošlog stoljeća i predviđao je ukupni informacijski kapacitet koji će dijeliti svi korisnici u ćeliji veličine 2,048 Mbit/s. U to vrijeme razvoja taj se je informacijski kapacitet smatrao i više nego dovoljnim. Međutim, u trenutku puštanja prvih 3G sustava u rad 2002. godine taj je informacijski volumen za podjelu među svim korisnicima bio nedovoljan.

#### 2. Napuštena tehnologija ATM (*Asynchrony transfer mode*) u pozadinskoj mreži

3G sustavi započeli su s radom 2002. godine kada je bilo sasvim razvidno da ATM tehnologija neće biti tehnologija na kojoj će se temeljiti „core“ širokopolasna mreža budućnosti. Međutim, veze između bazne postaje Node B i područnog kontrolera RNC, veze između različitih područnih kontrolera (lokacijskih područja) i veze između RNC i središnje mreže kod 3G sustava (UMTS) temeljile su se na ATM tehnologiji. U trenutku kada su s radom započele 3G mreže njihov rad se je temeljio na ATM tehnologiji, a sasvim je bilo razvidno da će se budući rad širokopolasne globalne mreže temeljiti na Ethernetu. U trenutku započinjanja svojeg rada 3G mreže kreću s tehnologijom transporta paketa ATM, koja je napuštena.

#### 3. Korištenje kodne podjele među korisnicima koja nije otporna na smetnje nastale zbog višestrukog prostiranja

Tehnologija kodne podjele među korisnicima ili, kako se još naziva, tehnologija proširenog spektra ili/i tehnologija maskiranja šumom razvijena je početkom pedesetih godina prošlog stoljeća od Američke mornarice u nastojanju da se razvije komunikacijska tehnologija koju suprotstavljeni blok neće moći prislušivati. Sedamdeset godina ova je tehnologija komercijalizirana te se pojavljuje u široj uporabi. Sustav koji se koristi u svojem radu ovom tehnologijom jest radiolokacijski GPS sustav, gdje svi sateliti rade na istoj frekvenciji, ali upotrebljavaju različite ortogonalne kodove za slanje navigacijskih poruka. Tehnologija kodne podjele među korisnicima u mobilnim komunikacijama pojavila se je u američkom sustavu druge generacije koji je nosio oznaku IS 95, te su Amerikanci kao logičan nastavak ovog sustava u 3G razvili svoj sustav pod nazivom CDMA 2000. Kodna podjela među korisnicima kao tehnologija prijenosa koja se koristi u mobilnim komunikacijama 3G ima svojih prednosti i svojih mana. Najznačajnija je prednost:

- **Optimalno korištenje radiofrekvencijskog spektra.** Sve ćelije rade na istim frekvencijama (kod UMTS-a koristi se radijski kanal širine 5MHz), sve ćelije koriste se istim setom ortogonalnih kodova (kod UMTS-a to je set od 256 ortogonalnih

kodova), a ćelije se međusobno razlikuju samo po skremlirajućem kodu (kod UMTS-a skremlirajući kod je dužine 1024 bita).

- **Meki prelazak iz ćelije u ćeliju.** Kada mobilni uređaj 3G prelazi iz ćelije u ćeliju, on prijelaz vrši postupno primajući signal iz obiju ćelija sve dok signal iz prethodne ćelije ne postane znatno slabiji od signala iz ćelije u koju ulazi. Nema snažnog skoka u frekvenciji.

Najznačajniji nedostaci su:

- **Neotpornost na pogreške koje nastaju zbog višestrukog prostiranja** signala i koje se manifestiraju u intersimbolarnoj interferenciji. Kod mobilnih 3G sustava koristio se je također uvježbavajući niz u prasku kao i kod sustava 2G. Uvježbavajući niz bita je niz koji emitira jedna strana, a koji je poznat drugoj strani, te se na osnovi primljene slike tog dijela informacije može izmjeriti, a potom i dijelom eliminirati pogreška koja je nastala zbog višestrukog prostiranja. U trenutku kada su sustavi 3G krenuli s radom, već su bile razvijene spoznaje o OFDM prijenosu koji pokazuje visoku otpornost na smetnje koje nastaju zbog višestrukog prostiranja. Dakle, u trenutku kada su mobilni sustavi 3G započeli s radom, već je razvijena metoda prijenosa koja je visoko otporna na glavni izvor smetnja u mobilnim komunikacijama, a to je višestruko prostiranje.
- **Potrebna za stalnom i preciznom kontrolom izlazne snage mobilnih uređaja.** Da bi se iz ukupnog signala koji dolazi na baznu postaju od različitih mobilnih uređaja u ćeliji mogla izdvojiti informacija po pojedinom ortogonalnom kodu, nužno je da signali po svim ortogonalnim kodovima od svih uređaja u ćeliji na baznu postaju stignu s istom razinom snage. Radi toga sustav stalno mora pratiti izlaznu snagu mobilnih uređaja i stalno im davati zapovjedi za podizanje ili spuštanje izlazne snage. Ovaj način rada zahtijeva stalnu signalizacijsku komunikaciju što, među ostalim, ima utjecaj i na potrošnju snage mobilnih uređaja (baterija se brže prazni).
- **Nemogućnost korištenja čitavog raspoloživog seta od 256 ortogonalnih kodova.** Kod sustava s kodnom podjelom nikad se nije moguće koristiti svim ortogonalnim kodovima iz zatvorenog skupa ortogonalnih kodova i to iz razloga što je glavna snaga šuma u prijenosu pojedinog koda, snaga kodova kojom se koriste drugi korisnici. Na primjer, kada imamo set od 256 ortogonalnih kodova, u idealnim uvjetima može se koristiti maksimalno 196 ortogonalnih kodova, da bi se informacija svih korisnika mogla pročitati. Sustav UMTS-a za prijenos usluga koje zahtijevaju veću brzinu koristi se tehnologijom sprežanja ortogonalnih kodova (objedinjavanja) što je s gledišta šuma interferencije, čiji su glavni izvor drugi korisnici u ćeliji, lošija varijanta nego rješenje koje upotrebljava CDMA 2000 gdje se za prijenos usluga koje zahtijevaju veću brzinu koristi veći broj osnovnih kodova.

U trenutku u kojem sustavi 3G kreću s radom već su razvijene spoznaje o OFDM prijenosu koji je otporniji na smetnje nastale zbog višestrukog prostiranja, a to sustavi 3G ne upotrebljavaju. Danas se na OFDM prijenosu temelji većina suvremenih sustava za slanje digitalnih signala, kao što su sustavi *broadcast* emitiranja digitalnih televizijskih programa (DVBT1 i/ili 2), sustavi za fiksni bežični pristup WiMAX (standardi IEEE 802,16.....) i drugi.



#### 4. Nekorištenje kognitivne radijske tehnike

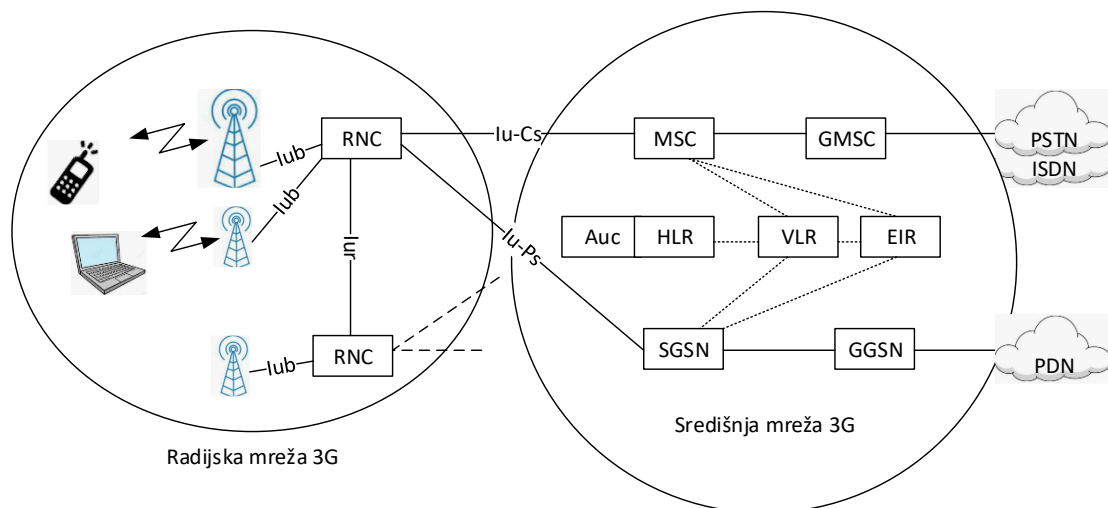
Kognitivna radijska tehnika je radijska tehnika kod koje se modulacijski postupak prilagođava kvaliteti radijskog linka. Takva radijska tehnika široko je u upotrebi već kod sustava za fiksni širokopojasni pristup WiMAX, standarda IEEE 802,16d. Korisnici koji su najbliže baznoj postaji imaju stabilan radijski link i mali utjecaj šuma te mogu primati signale sa složenijim modulacijskim postupcima što dovodi do boljeg iskorištenja radiofrekvencijskog opsega (više bita po Hz). Korisnici koji su dalje imaju nešto manje stabilan radijski link, radijski link koji se odlikuje s nešto većom razinom šuma te se prilagođavaju manje složenom modulacijskom postupku. Korisnici koji su najdalje imaju najnestabilniji radijski link i mogu primati informaciju samo s najjednostavnijim modulacijskim postupkom. Modulacijski postupak se kombinira s većim ili manjim stupnjem zaštitnog kodiranja, pa se kombinacija modulacijskog postupka s odgovarajućim stupnjem zaštitnog kodiranja naziva modom rada. Suvremeni sustavi automatski prilagođavaju mod rada prema svakom korisniku i na taj način može se optimalno iskoristiti raspoloživi informacijski volumen ćelije.

U trenutku kada se je počelo s primjenom sustava 3G, drugi sustavi već su se koristili kognitivnom radijskom tehnikom. Međutim, mobilni komunikacijski sustavi 3G njom se ne koriste pa zbog toga nisu u mogućnosti optimalno iskoristiti raspoloživi frekvencijski opseg (ostvariti u njemu maksimalan informacijski volumen).

U trenutku kada su se uveli, 3G sustavi imali su gore navedene nedostatke te se je odmah počelo razmišljati o njihovim unaprjeđenjima.

#### 3.1. Arhitektura 3G UMTS mreže

Arhitektura 3G UMTS mreže prikazana je na slici 3.1. Kao i kod svih mobilnih mreža, osnovna arhitektura sastoji se od radijske mreže i od središnje mreže. U radijskoj mreži bazna postaja, s oznakom Node B s jedne strane, preko zračnog sučelja koje je standardom detaljno definirano, povezuje na sebe mobilne uređaje različitih proizvođača. S druge strane povezuje se linkom E1 od 2,048 Mbit/s oznake Iub s područnim kontrolerom RNC. Taj link najčešće je ostvaren kao E1 link (preko radija, galvanskog kabela i/ili svjetlovoda) unutar kojeg su upakirane ATM ćelije za prijenos signalnih i/ili korisničkih informacija.



Slika 3.1. Arhitektura 3G mobilne mreže

Područni kontroler RNC povezan je s drugim područnim kontrolerima (susjednima) linkom *Iur* te sa središnjom mrežom linkovima *Iu-Cs* za kanalski promet i *Iu-Ps* za podatkovni promet. Svi su ti linkovi ATM linkovi, a fizički se realiziraju preko jedne ili više E1 grupe PDH hijerarhije, rjeđe kao STM1 linkovi SDH hijerarhije.

U središnjoj mreži mobilna komutacija za promet kanala na svojem ulazu dobiva uređaj koji raspakira i dekompresira kanalsku (govornu) uslugu u klasični PCM B kanal brzine 64 Kbit/s kojim dalje upravlja mobilna komutacija MSC. Link *Iu-Ps* vodi od RNC kontrolera do čvora za podatkovni promet SGSN koji je već bio postavljen u 2+ generaciji zbog održavanja GPRS prometa. Na ulazu u taj čvor vrši se prepakiranje korisničke informacije iz ATM paketa u Ethernet pakete te se paketi proslijeđuju prema povezniku GGSN prema drugim PDM mrežama ili prema drugim RNC-ima do drugih podatkovnih mobilnih korisnika.

Registri HLR s ekstenzijom za provjeru vjerodostojnosti AUC, VLR i EIR (EIR za provjeru ispravnosti mobilne opreme) imaju istu funkciju kao i kod 2G mreža, samo su sada povezani i sa SGSN čvorom kako bi se mogli podržati pretplatnici koji se koriste podatkovnim uslugama.

### 3.2. ATM tehnologija (*Asynchronous Transfer Mode*)

ATM je koncept prijenosa, multipleksiranja i komutacije.

Pri ATM prijenosu kombinira se paketna komutacija i komutacija linija, osiguravajući prijenos svih usluga u jedinstvenom digitalnom obliku korištenjem tehnike **asinkronog multipleksnog prijenosa**. ATM je protokol koji podržava:

- veze sa spajanjem i
- veze bez spajanja te
- usluge s promjenjivom brzinom bita.

ATM je tehnika orijentirana prema povezivanju koja omogućuje fleksibilan prijenos svih vrsta usluga uključujući i one koje se ostvaruju u vezama bez spajanja.

Usluge za prijenos podataka vezama bez spajanja mogu se ostvariti na dva načina:

- neizravno preko W (širokopojasnih)-ISDN usluga orijentiranih na spajanje i
- izravno preko W-ISDN usluga ostvarenih vezama bez spajanja.

U neizravnom načinu, između B-ISDN međuspojeva, uspostavlja se transparentna veza ATM sloja koja može biti stalna, sačuvana ili na zahtjev. Protokoli veza bez spajanja, koji djeluju na adaptacijski sloj ili iznad njega, transparentni su širokopojasnoj ISDN mreži. Izvan W-ISDN mreže implementiraju se funkcije adaptacijskog sloja i usluge veza bez spajanja.

U izravnom načinu, unutar W-ISDN implementiraju se funkcije usluga koje se ostvaruju vezama bez spajanja. Te funkcije usmjeravaju ATM ćelije u skladu s informacijom koja se nalazi u samoj ćeliji (zaglavlju).

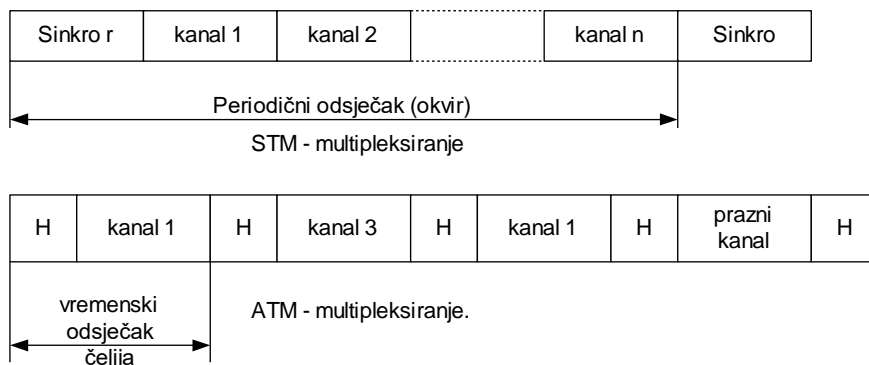
U prvom stupnju razvoja W-ISDN mreže predloženo je nekoliko tehnika za komutaciju i multipleksiranje, što uključuje komutaciju linija temeljenu na sinkronom načinu prijenosa (STM – *Synchronous Transfer Mode*) i komutaciju paketa temeljenu na asinkronu načinu prijenosa (ATM).

Te tehnike se definiraju kao prijenosni modovi (*transfer modes*). Prvotno se smatralo da je STM prikladan način prijenosa za W-ISDN zbog njegove kompatibilnosti s postojećim sustavima. U STM modu širina pojasa je organizirana u periodičkom okviru koji se sastoji od vremenskog odsječka (slika 3.2.a). Prvi odsječak u STM vremenskom okviru (*framing slot*) označava početak svakog okvira (sinkro riječ). Svaki pojedini odsječak STM okvira dodjeljuje se posebnom pozivu koji se identificira položajem odsječka u okviru, baš kao i u tradicionalnoj komutaciji kanala. Dodjeljivanje odsječaka u STM tehnologiji prijenosa temelji se na maksimalnoj brzini potrebnoj za prijenos informacije. STM je prikladan za usluge koje zahtijevaju fiksnu brzinu prijenosa. Kod usluga koje zahtijevaju promjenjivu brzinu prijenosa nedostatke koje je iskazao STM u potpunosti eliminira ATM.

**ATM je informacijski tok organiziran u blokove fiksne veličine koji se nazivaju ćelije.** Fiksna veličina ćelije, a ne varijabilna, odabrana je da bi se eliminirale poteškoće procesiranja protokola i omogućilo komutiranje pomoću sklopovlja. Ćelija je relativno kratka u poredbi s duljinom paketa u postojećim paketnim mrežama, stoga se u prijenosu informacija formira mnogo ćelija iz jednog paketa. Veličina ATM ćelije je mala da bi se smanjio efekt kašnjenja nastao zbog paketiranja informacije na njezinu izvoru. Američki nacionalni institut za standarde (ANSI) predlagao je da ATM ćelija sadrži zaglavlje od pet okteta i informacijsko polje od 64 okteta, a Europski telekomunikacijski institut za standarde (ETSI) predlagao je da zaglavlje ATM ćelije sadrži četiri okteta, a informacijsko polje 32 okteta.

CCITT (UTI) postavio je kompromisno rješenje između tih prijedloga. **ATM ćelija sadrži: zaglavlje od pet okteta i informacijsko polje od 48 okteta.** Svaka se ćelija ATM-a sastoji od zaglavlja i informacijskog polja, kao što je to prikazano na slici 3.3.

Za razliku od STM prijenosa (SDH) ATM se zasniva na paketnoj komutaciji. ATM je specifični paketni način prijenosa u kojem se primjenjuje asinkrono multipleksiranje u vremenskoj domeni (multipleksiranje po vremenu). U zaglavlju ćelije nalazi se polje identifikacije veze, koje sadrži identifikator virtualnog kanala (VCI – *Virtual Channel Identifier*) i identifikator virtualne staze (VPI – *Virtual Path Identifier*), a od značaja je za komutiranje i multipleksiranje. Na danom međuspoju, različite virtualne staze koje su multipleksirane unutar transmisijskog opterećenja (*payload*) identificiraju se pomoću identifikatora virtualnih staza. Različiti virtualni kanali VC, koji su multipleksirani unutar virtualne staze, označeni su identifikatorom virtualnih kanala VCI. Drugim riječima, ćelije se prenose preko virtualnog kanala, a usmjeravanje (rutiranje) obavlja se pomoću identifikatora virtualnog kanala. Ćelije koje pripadaju istom pozivu slijede istu rutu, što minimizira procesiranje informacije u svezi s određivanjem rute ATM ćelije, pa samim tim i varijaciju kašnjenja pojedine ATM ćelije.



Slika 3.2. STM i ATM multipleksiranje

Vrijeme prijenosa jednako je duljini vremenskog odsječka. U ATM-u odsječci se pridružuju pozivu na zahtjev, što znači da se odsječak prethodno ne pridružuje nekom govornom kanalu, nego se pridružuje bilo kojem kanalu na zahtjev. U TDM mreži vremenski odsječak pridružuje se svakom kanalu bez obzira na to je li on zauzet ili nije. U ATM prijenosu zauzima se širina pojasa na zahtjev, to jest pri prijenosu informacije.

Može se zaključiti da su osnovne razlike između ATM-a i STM-a sljedeće:

- u ATM-u pridruživanje vremenskog odsječka nije fiksno kao u STM-u, već se vremenski odsječci pridružuju na asinkroni način, to jest na zahtjev,
- širina pojasa se u ATM-u zaposjeda samo pri stvarnom prijenosu informacija,
- ATM odsječci pridružuju se na zahtjev, stoga se ATM može lako prilagoditi uslugama s različitom ili promjenjivom brzinom bita u prijenosu,
- ATM također podržava CBR (*constant bit rate*) usluge i veze sa spajanjem.

### Struktura ATM ćelije

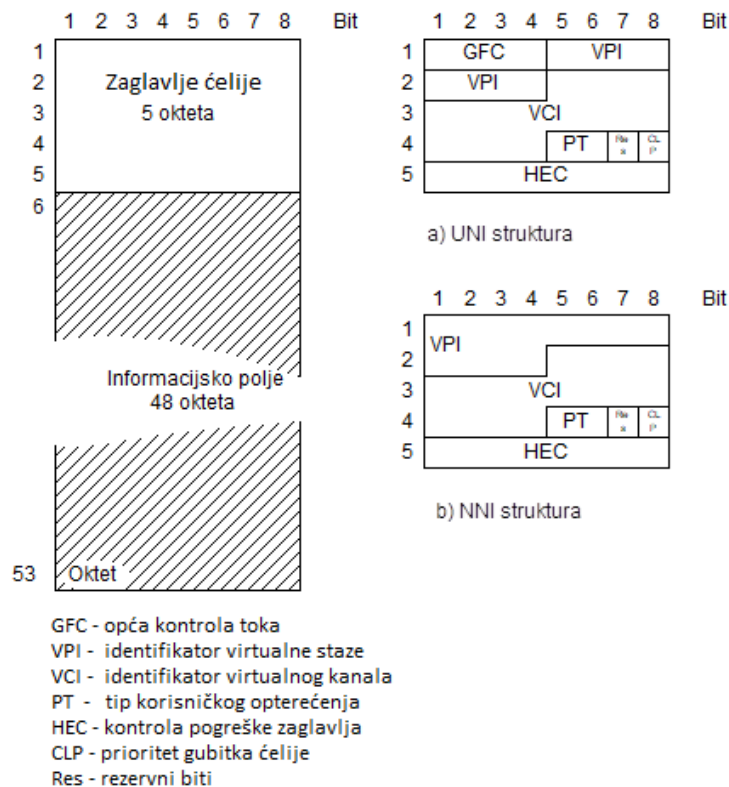
**ATM ćelija sadržava ukupno 53 okteta bitova, pri čemu pet okteta čini zaglavlje, a 48 okteta informacijsko polje ćelije.**

Primarna uloga zaglavlja je identifikacija ćelija koje pripadaju specifičnom kanalu nazvanom virtualni kanal, koji se uspostavlja u vrijeme uspostavljanja poziva i traje za vrijeme trajanja poziva. Ostale funkcije zaglavlja su:

- detekcija i korekcija pogreške u zaglavlju
- identifikacija tipa korisničkog opterećenja i
- kontrola toka na međuspoju korisnik – mreža.

Sadržaj zaglavlja osiguran je osmobicnim kodom za provjeru pogreške (HEC) koji omogućuje korekciju pogreške jednog bita i detekciju više pogrešnih bita.

Korisničko opterećenje ćelije u informacijskom polju može sadržavati korisničke informacije ili informacije potrebne za upravljanje mrežom. Zaglavlje sadržava i oznaku tipa korisničkog opterećenja (PT) kojem je određeno korisno opterećenje ćelije.



Slika 3.3. Struktura ATM ćelije i format zaglavlja

U ćeliji koja sadržava korisničke informacije korisno opterećenje sastoji se od korisničkih informacija i informacija o funkciji primjene usluge. Korisno opterećenje ćelije koje sadržava upravljačke informacije mreže ne čini dio korisničkih informacija.

Polje kontrole toka (GFC) upotrebljava se za kontrolu prijenosa informacija u svrhu ublažavanja posljedica preopterećenja koje se može javiti u kratkim vremenskim periodima.

Polje prioriteta odbacivanja ćelija (CLP) koristi se kada je potrebno odbaciti pojedine ćelije, a da se to ne odrazi na kvalitetu usluge. To je posebno važno kod ćelija koje prenose videosignal. Ove ćelije nije poželjno odbacivati jer se to odražava na kvalitetu signala, pa je bolje odbaciti neke ćelije podataka koje se mogu po potrebi ponovno prenijeti. Upravo tu razliku među pojedinim ćelijama registrira CLP polje.

S obzirom na to da je ATM tehnika orijentirana prema povezivanju, vrijednosti zaglavlja dodjeljuju se svakom dijelu veze kada je to potrebno i otpuštaju se kada za to nema daljnje potrebe. **Informacijsko polje prenosi se transparentno, pri čemu se na njemu ne provodi nikakva obrada (otkrivanje pogrešaka i drugo).**

Veličina zaglavlja i informacijskog polja ostaju nepromijenjeni na svim referentnim točkama uključujući i međuspoj korisnik – mreža (UNI) i međuspoj mreža – čvor (NNI).

## Prijenosna ATM mreža

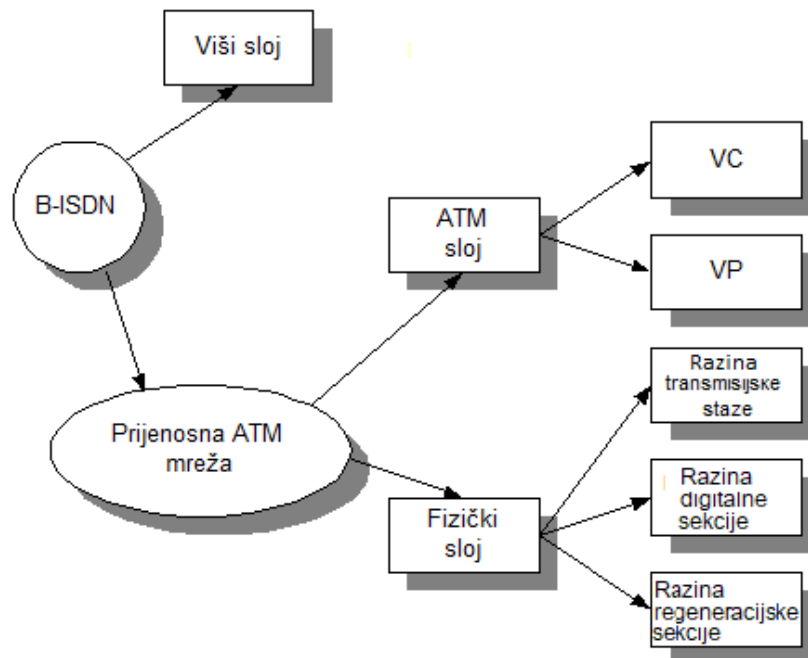
Prijenosna ATM mreža sadržava dva sloja:

- fizički sloj i
- ATM sloj.

Svaki od slojeva sastoji se od nekoliko razina (vidi sliku 3.4.).

Fizički sloj sadrži tri razine:

- razinu transmisijske staze
- razinu digitalne sekcije i
- razinu regeneratorske sekcije.



Slika 3.4. Hijerarhija prijenosne ATM mreže

## ATM sloj

ATM sloj sadrži dvije razine:

- razinu virtualnog kanala i
- razinu virtualne staze.

Svaka ATM ćelija sadrži točno određenu oznaku u svojem zaglavlju koja služi za identifikaciju virtualnog kanala kojem ćelija pripada. Ta se oznaka sastoji od dvaju dijelova:

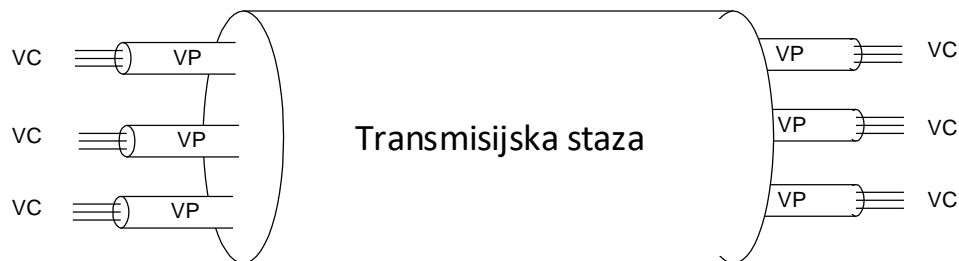
- identifikatora virtualnog kanala VCI i
- identifikatora virtualne staze VPI.

**Virtualni kanal** je komunikacijski kanal predviđen za prijenos ATM ćelije između dviju ili više ATM točaka u jednom smjeru. Linkovi virtualnih kanala ulančani su tako da formiraju vezu virtualnim kanalom (VCC).

Veza virtualnim kanalom postoji između dviju ili više krajnjih točaka (VCC) ovisno o tome je li posrijedi konfiguracija veze od točke do točke ili od točke do više točaka. Krajnja točka virtualnog kanala je ona točka na kojoj se informacijsko polje ćelije izmjenjuje između ATM sloja i korisnika usluge ATM sloja. Na razini virtualnog kanala veze virtualnim kanalom ostvaruju se u svrhu prijenosa informacija između korisnika i korisnika, korisnika i mreže te mreže i mreže. Cjelovitost ćelijske sekvence odražava ATM sloj za ćelije koje pripadaju istom virtualnom kanalu.

Identifikator virtualnog kanala VCI (u zaglavlju ćelije) identificira pojedini virtualni kanal unutar pojedine virtualne staze. S obzirom na to da virtualni kanal može biti stalan ili komutiran, specifična vrijednost identifikatora virtualnog kanala dodjeljuje se svaki put kada je kanal komutiran.

**Virtualna staza** je grupa virtualnih kanala koji na danoj referentnoj točki dijele istu vrijednost identifikatora virtualne staze VPI. Link virtualne staze ima jednosmjerne mogućnosti između dviju ili više krajnjih točaka. Ulančavanjem linkova virtualne staze formira se veza virtualnom stazom. Veza virtualnom stazom postoji između dviju ili više krajnjih točaka ovisno o tome kakva je konfiguracija veze od točke do točke ili od točke do više točaka. Identifikator virtualne staze identificira različite virtualne staze na danoj referentnoj točki. Specifična vrijednost identifikatora virtualne staze dodjeljuje se svaki put kada je virtualna staza komutirana.



*Slika 3.5. Čimbenici ATM veza*

Funkcije upravljanja virtualnim kanalom vrše se na VC komutatoru ili na sklopu za prospajanje. Ovo usmjeravanje uključuje prenošenje vrijednosti VCI ulaznog linka virtualnog kanala u vrijednosti VCI izlaznog linka virtualnog kanala.

Funkcije usmjeravanja za virtualne staze izvode se na VP komutatoru ili sklopu za prospajanje. Ovo usmjeravanje uključuje prenošenje vrijednosti VPI ulaznog linka virtualne staze u vrijednosti VPI izlaznog linka virtualne staze.

Sklop za prospajanje virtualnog kanala je element mreže koji povezuje linkove virtualnih kanala, zaključuje vezu virtualnih staza i prenosi vrijednosti VCI-ja, a upravljan je funkcijom upravljačke ravnine.

Sklop za prospajanje virtualne staze je element mreže koji povezuje linkove virtualnih staza i prenosi vrijednosti VPI-ja, a upravljan je funkcijama upravljačke ravnine.

Komutator virtualnog kanala je element mreže koji povezuje linkove virtualnih kanala, zaključuje veze virtualnih staza i prenosi vrijednosti VCI-ja, a upravljan je funkcijama kontrolne ravni.

Komutator virtualne staze je element mreže koji povezuje linkove virtualnih staza i prenosi vrijednosti VPI-ja, a upravljan je funkcijama kontrolne ravni.

#### Fizički sloj

Transmisijska staza fizičkog sloja postoji između elemenata mreže koji sastavljaju i rastavljaju korisno opterećenje transmisijskog sustava. Na krajnjoj točki svake transmisijske staze obavlja se prezentiranje vrijednosti odgovarajućih polja zaglavlja (primjerice VPI i VCI) i kontrola pogrešaka zaglavlja.

Digitalna sekcija postoji između elemenata mreže koji sastavljaju i rastavljaju kontinuirani tok bita, dok je regeneracijska sekcija dio digitalne sekcije.

Odnos između virtualnog kanala (VC), virtualne staze (VP) i transmisijske staze prikazan je na slici 3.5.

ATM prijenosna mreža je slojevita mreža koja se sastoji od funkcijskih cjelina, a to su:

- krajnja točka veze
- točka veze
- veza i
- link.

Krajnja točka veze smještena je na granici između razina (primjerice između razina virtualnog kanala i virtualne staze). Ona omogućuje funkcije završetka veze.

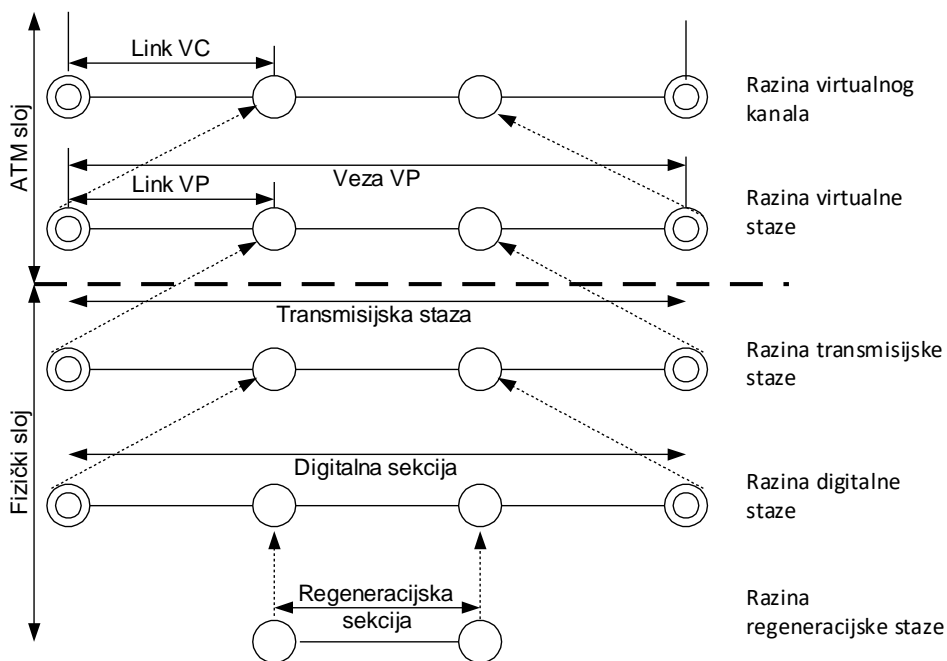
Točka veze nalazi se unutar same veze na mjestu gdje se povezuju dva susjedna linka. Ta točka omogućuje funkcije povezivanja.

Veza pruža mogućnost prijenosa informacija između krajnjih točaka zajedno s bilo kojom dodatnom informacijom koja se odnosi na cjelovitost prijenosa informacija.

Link omogućuje transparentno prenošenje informacija. Ono predstavlja pridruženost između susjednih točaka veze ili između jedne krajnje točke veze i njoj susjednih točaka.

Navedene funkcijske cjeline pojedinih razina prikazane su na slici 3.6.





Slika 3.6. Prikaz hijerarhijskih odnosa razina u ATM prijenosnoj mreži

Osim funkcijskih cjelina postoje i transportne cjeline, a to su staza i sekcija. Kanal se definira kao veza virtualnim kanalom između dviju krajnjih točaka.

### 3.3. CDMA tehnologija

Da bismo razumjeli kodnu podjelu među korisnicima, potrebno je prvo objasniti pojam ortogonalnosti funkcija i njihovo korištenje u prijenosu različitih signala.

#### 3.3.1. Ortogonalnost funkcija

Dvije funkcije (3.1) su ortogonalne u intervalu  $[a;b]$  ako ispunjavaju uvjete iskazane jednadžbom (3.2):

$$F(X) = \{f_1(x); f_2(x)\} \quad (3.1)$$

$$\int_a^b f_1(x) \cdot f_2(x) dx = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ k & i = j \end{cases} \quad (3.2)$$

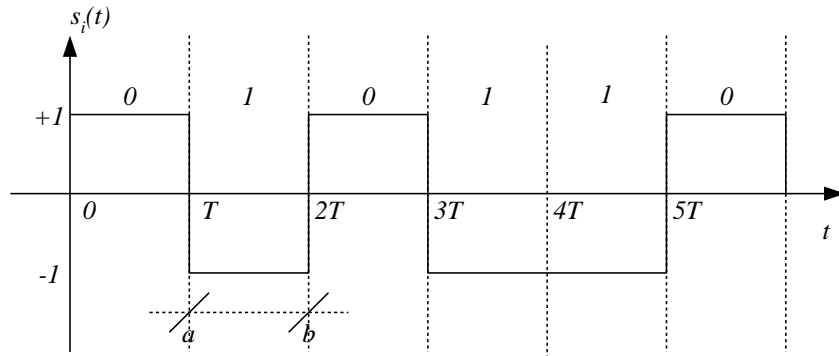
gdje  $i$  i  $j$  sasvim općenito mogu poprimiti vrijednosti 1 i/ili 2.

U komunikacijskim sustavima  $x$  je vremenska varijabla koju bilježimo sa  $t$ , onda je interval u kojem su funkcije ortogonalne  $[a;b]$  vremenski interval.

**Ako ortogonalne funkcije želimo upotrijebiti za prijenos informacija, onda je nužno da sve ortogonalne funkcije budu vremenski periodične u odnosu na zadani vremenski interval ortogonalnosti  $[a;b]$ , te da zadani vremenski interval od  $[a;b]$  odgovara vremenu trajanja jednog bita  $T$ .**

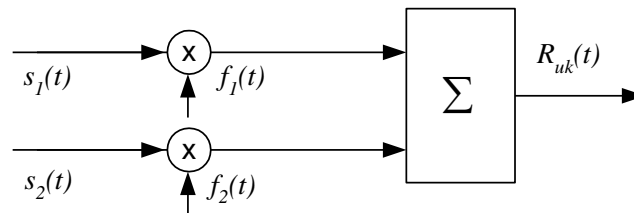
### 3.3.2. Prijenos signala ortogonalnim funkcijama

Korisnički digitalni signal sastoji se od logičkih jedinica (1) i logičkih nula (0), kao što to prikazuje slika 3.7. Logička nula prikazuje se stanjem +1V, a logička jedinica stanjem (-1V). Dakle, signal kod svake promjene bita mijenja stanje iz 1 u -1 ili obrnuto.



Slika 3.7. Signal  $s_i(t)$  (binarni signal) s periodom simbola  $T$  koja odgovara intervalu ortogonalnosti funkcija iz skupa  $F(t)$   $[a;b]$

Skup ortogonalnih funkcija  $F(t)$  možemo upotrijebiti za prijenos skupa signala  $S(t)$  na način koji prikazuje slika 3.8.



Slika 3.8. Multipleksiranje skupa korisničkih signala korištenjem skupa ortogonalnih funkcija

Ukupni signal koji se šalje na prijenosnu liniju može se opisati jednadžbom (3.3).

$$R_{uk}(t) = s_1(t) \cdot f_1(t) + s_2(t) \cdot f_2(t) \quad (3.3)$$

Ako na prijemnoj strani želimo izdvojiti korisnički signal  $s_i(t)$ , potrebno je izvršiti množenje ukupnog signala  $R_{uk}(t)$  s ortogonalnom funkcijom  $f_i(t)$  koja «nosi» korisni signal  $s_i(t)$ . Nakon toga je potrebno izvršiti integraciju u intervalu ortogonalnosti te dijeljenje s veličinom intervala. Sve iskazano opisuje jednadžba (3.4).

$$s_i(t) = \frac{1}{k} \int_0^T R_{uk}(t) \cdot f_i(t) dt \quad (3.4)$$

$$s_i(t) = \frac{1}{k} \int_0^T R_{uk}(t) \cdot f_i(t) \cdot dt$$

$$s_i(t) = \frac{1}{k} \int_0^T [s_1(t) \cdot f_1(t) + s_2(t) \cdot f_2(t)] \cdot f_i(t) \cdot dt$$

$$s_i(t) = \frac{1}{k} \int_0^T [s_1(t) \cdot f_1(t) \cdot f_i(t) + s_2(t) \cdot f_2(t) \cdot f_i(t)] \cdot dt$$

$$s_i(t) = \frac{1}{k} \int_0^T s_1(t) \cdot f_1(t) \cdot f_i(t) \cdot dt + \frac{1}{k} \int_0^T s_2(t) \cdot f_2(t) \cdot f_i(t) \cdot dt$$

Za  $i = 1$  vrijedi:

$$s_1(t) = \frac{1}{k} \int_0^T s_1(t) \cdot f_1(t) \cdot f_1(t) \cdot dt + \frac{1}{k} \int_0^T s_2(t) \cdot f_2(t) \cdot f_1(t) \cdot dt$$

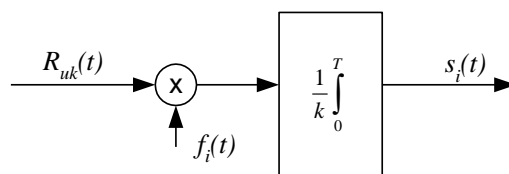
$s_1(t)$  je ovisno o stanju logičke jedinice ili nule  $s_1(t) = \pm 1V$  pa se kao konstanta u vremenu integracije  $[0;T]$  može postaviti ispred integrala.

$$s_1(t) = \frac{1}{k} s_1(t) \underbrace{\int_0^T f_1(t)^2 \cdot dt}_k + \frac{1}{k} s_2(t) \underbrace{\int_0^T f_2(t) \cdot f_1(t) \cdot dt}_0$$

$$s_1(t) = \frac{1}{k} s_1(t) \cdot k + \frac{1}{k} s_2(t) \cdot 0$$

$$s_1(t) = s_1(t) \quad (3.5)$$

Jednadžbom (3.5) dokazali smo ispravnost jednakosti iskazane u jednadžbi (3.4). Respektivno jednadžbi (3.5) izdvajanje bilo koje korisne informacije iz ukupnog skupa može se prikazati kao na slici 3.9.



Slika 3.9. Proces izdvajanja korisnog signala  $s_i(t)$  iz ukupnog signala

Signal pojedinog korisnika možemo izvući matematičkim postupkom iz ukupnog signala  $R_{uk}(t)$ , tako da ukupni signal pomnožimo s ortogonalnom funkcijom s kojom je izvorno pomnožen u oblikovanju za prijenos, te sve propustimo kroz sklop integratora.

Sada se postavlja pitanje koje su to ortogonalne funkcije koje se koriste u pojedinim sustavima? Ortogonalne funkcije kod sustava CDMA nazivamo zatvorenim skupom Walshevih ortogonalnih funkcija.

### 3.3.3. Zatvoreni skup ortogonalnih Walshevih funkcija koje se koriste u sustavima s kodnom podjelom

U članku «*An Overview of CDMA Evolution Toward Wideband CDMA*» Ramjee Prasad, govoreći o raspršenju u *W-CDMA* (UMTS) tehnologiji, kaže: «*The channel separation is performed using variable spreading factor Walsh sequences,...*», odvajanje kanala postignuto je korištenjem Walsheve sekvence promjenjivog faktora raspršenja.

Ortogonalni kodovi u postojećem mobilnom komunikacijskom sustavu druge generacije *IS-95*, koji se osniva na *CDMA* tehnologiji, također se generiraju preko Walshevih funkcija. Na početku dvadesetog stoljeća J. L. Walsh objavio je u američkom časopisu *American J. Mathematics*, Vol. 45, pp 5-24, 1923. rad pod naslovom «*A Closet Set of Normal Orthogonal Functions*» - **Zatvoreni skup normalnih ortogonalnih funkcija**. Tada je to bila samo matematička spekulacija koja je početkom pedesetih godina iskorištena za sustave s proširenim spektrom, sustave maskirane šumom ili sustave s kodnom podjelom.

- Walsh je definirao zatvoreni skup ortogonalnih vremenskih funkcija  $W_j(t)$ . Taj zatvoreni skup vremenskih funkcija  $W_j(t)$  ima svojstva koja zadovoljavaju funkcije iz zatvorenog skupa ortogonalnih funkcija u vremenskom intervalu  $[0, T]$  (opisane u jednadžbi 3.1 i 3.2).
- Funkcije su definirane unutar vremenskog intervala od  $[0, T]$ . Funkcija može biti beskonačno mnogo, a tijekom svojeg generiranja definiraju zatvorene skupove od  $N$  gdje je  $N = 2^V$ . Zato za zatvoreni skup Walshevih funkcija kažemo da je  $V$ -redni i da sadrži  $N$  ortogonalnih funkcija.

#### Definirajmo skup Walshevih funkcija.

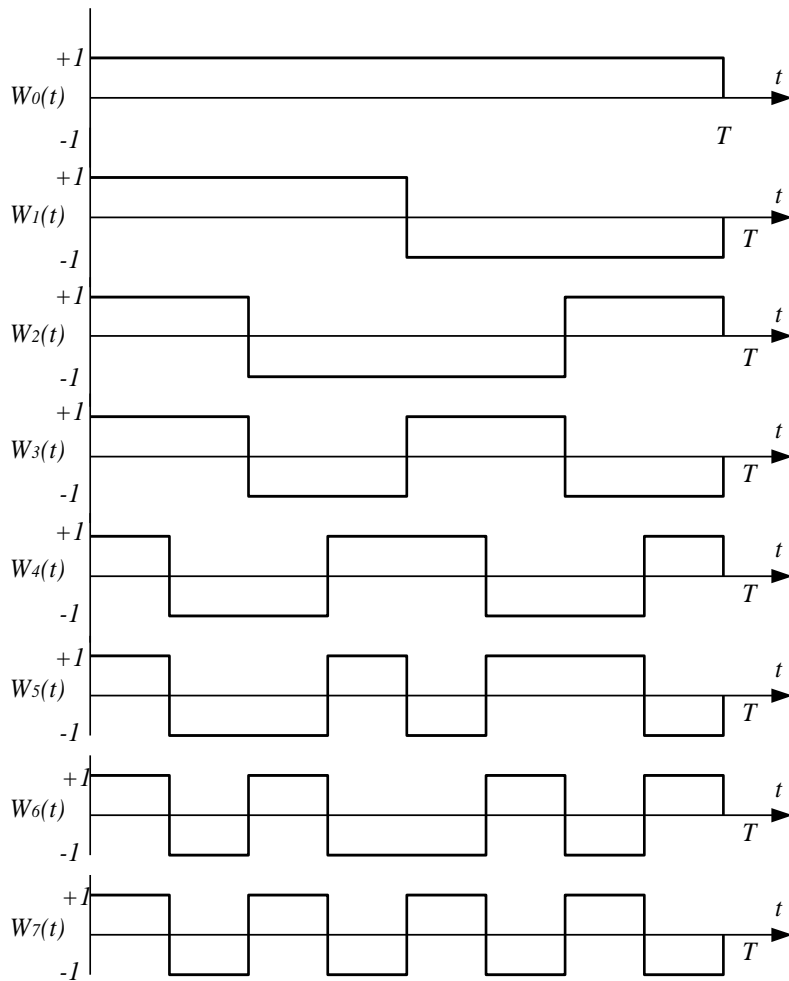
$W_j(t)$  funkcije iz skupa definirane su u okviru istog vremenskog intervala  $[0, T]$  (vrijeme trajanja jednog bita). Ako bilo koju funkciju iz zatvorenog skupa ortogonalnih funkcija označimo s  $W_j(t)$  u intervalu  $[0, T]$ , gdje je  $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$ , onda one moraju zadovoljiti sljedeća svojstva da bi predstavljale zatvoreni skup ortogonalnih Walshevih funkcija:

- $W_j(t)$  poprima vrijednost  $+1$  ili  $-1$  u intervalu  $[0; T]$ , funkcija kroz nulu prolazi samo u skoku kada mijenja vrijednost s  $+1$  na  $-1$  ili obrnuto.
- Sve funkcije iz skupa započinju s vrijednošću  $+1$ .  $W_j(t = 0) = +1$  za sve vrijednosti indeksa  $j$ .
- Funkcija  $W_j(t)$  u vremenskom intervalu  $[0; T]$  prolazi kroz nulu  $j$  puta.
- Funkcije  $W_j(t)$  međusobno su ortogonalne funkcije, dakle vrijedi:  
$$\int_0^T W_i(t) \cdot W_k(t) dt = \begin{cases} 0, & i \neq k \\ T, & i = k \end{cases} \quad (3.6)$$
- Svaka funkcija  $W_j(t)$  je parno ili neparno simetrična u odnosu na srednju točku intervala  $[0; T]$ , gdje je srednja točka polovina zadanog intervala,  $T/2$ .

Skup Walshevih funkcija sastoji se od  $N$ -članova, odnosno funkcija i one su poredane po redoslijedu koji odgovara broju prolaza funkcije kroz vrijednost nula u intervalu definicije  $[0, T]$ . Za Walsheve funkcije kažemo da su označene brojem promjena u intervalu.

Zatvoreni skup Walshevih funkcija izgleda kao u jednadžbi (3.7).

$$[W_0(t), W_1(t), W_2(t), W_3(t), \dots \dots \dots W_{N-2}(t), W_{N-1}(t), ] \quad (3.7)$$



Slika 3.10. Skup Walshevih funkcija trećeg reda

**Važno je imati na umu da je vrijeme od 0 do T vrijeme trajanja jednog bita informacije.** S osam Walshevih funkcija možemo prenijeti osam različitih tokova bita brzine  $R = (1/T)$  bita u sekundi.

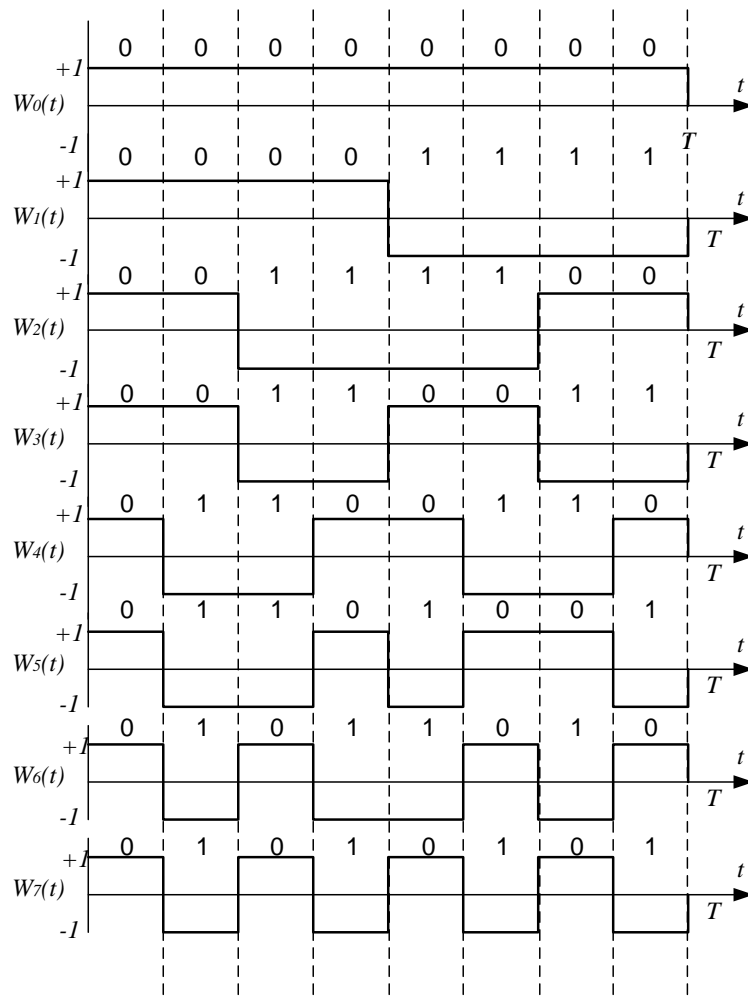
- Za svih osam Walshevih funkcija trećeg reda zadovoljen je uvjet da se vrijednosti funkcije u zadanom intervalu  $[0, T]$  kreću na vrijednostima  $\{+1; -1\}$ , osim prolaza funkcije kroz nulu kada trenutačno mijenja stanje.
- Također, svaka od funkcija sa slike 3.10. započinje s vrijednošću +1.
- Indeks u oznaci funkcije  $j$  ( $W_j(t)$ ) kod svake funkcije označava broj prolaza kroz nulu (broj skokova funkcije).
- Ako pažljivo razmatramo sliku, možemo zaključiti da će biti zadovoljen uvjet ortogonalnosti funkcija.
- Funkcije koje imaju indeks  $j = 0, 2, 4, 6$  jesu parno simetrične funkcije u odnosu na sredinu intervala  $T/2$ .
- Funkcije koje imaju indeks  $j = 1, 3, 5, 7$  jesu neparno simetrične u odnosu na sredinu intervala  $T/2$ .

## Generiranje ortogonalnih kodova

Ako pretvorimo vremenski oblik funkcije s amplitudama  $+1, -1$  u binarnu vremensku logičku funkciju s vrijednostima  $0$  i  $1$  na način

- da vremenski interval  $[0, T]$  Walshevih funkcija  $V$ -tog reda podijelimo u  $N$ -podintervale, gdje je  $N = 2^V$ ,
- da za svaki podinterval u kojem funkcija  $W_j(t)$  poprima vrijednost iz skupa  $\{+1, -1\}$  izvršimo supstituciju vrijednosti funkcije na način da
  - amplituda funkcije  $+1$  prelazi u logičku  $0$  (nulu) i
  - amplituda funkcije  $-1$  prelazi u logičku  $1$  (jedinicu),

tada Walsheve vremenske funkcije prelaze u Walsheve kodne sekvence, kao što je to prikazano na slici 3.11.



Slika 3.11. Pretvaranje Walshevih funkcija trećeg reda u osmobicitne kodne sekvence

U tablici 3.1. prikazane su Walsheve kodne sekvence stvorene na osnovi funkcija četvrtog reda.

Tablica 3.1. Walsheve kodne sekvence stvorene na osnovi skupa Walshevih funkcija četvrtog reda

Cjelo- brojni indeks $j$	Binarni indeks	Walsheva kodna sekvenca
0	0000	0000000000000000
1	0001	0000000011111111
2	0010	0000111111110000
3	0011	0000111100001111
4	0100	0011110000111100
5	0101	0011110011000011
6	0110	0011001111001100
7	0111	0011001100110011
8	1000	0110011001100110
9	1001	0110011010011001
10	1010	0110100110010110
11	1011	0110100101101001
12	1100	0101101001011010
13	1101	0101101010100101
14	1110	0101010110101010
15	1111	0101010101010101

Walsheve funkcije  $V$ -tog reda  $N = 2^V$  imaju  $V$ -osi simetrije. Prva os simetrije postavljena je na polovini intervala  $T/2$ , druga  $T/4$ , treća na  $T/8$ , četvrta na  $T/16$  i tako dalje za funkciju  $V$ -tog reda do vrijednosti  $T/2^V$ .

Oсна simetričnost koja prikazuje Walshevu funkciju  $W_{11}$  prikazana je na slici 3.12.

															$j$			
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1		$T/16$	1
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1		$T/8$	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1		$T/4$	1
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1		$T/2$	1

Slika 3.12. Osna simetričnost koja prikazuje Walshevu funkciju  $W_{11}$

Indeks Walsheve sekvence za funkciju  $W_{11}$   $j = 11$  napisan u binarnom obliku jest  $j = 1011$ .

Ako je u binarno ispisanom indeksu Walsheve sekvence na prvom mjestu jedinica, to znači da u intervalu  $T/16$  postoji neparna simetrija Walsheve funkcije.

Kako binarna kodna sekvenca Walsheve funkcije uvijek započinje s nulom, znači da je prva kombinacija 01. Ako je u binarno ispisanom indeksu Walsheve kodne sekvence na drugom mjestu nula, to znači da u intervalu  $T/8$  postoji parna simetrija Walsheve funkcije, to jest kombinacija je 0110.

Ako je u binarno ispisanom indeksu Walsheve kodne sekvence na trećem mjestu jedinica, to znači da u intervalu  $T/4$  postoji neparna simetrija Walsheve funkcije, to jest kombinacija je 01101001. Ako je u binarno ispisanom indeksu Walsheve kodne sekvence na četvrtom mjestu jedinica, to znači da u intervalu  $T/2$  postoji neparna simetrija Walsheve funkcije, to jest kombinacija je 011010010110100.

Na ovaj način možemo ispisati bilo koju Walshevu funkciju. Uzmimo slučaj da je  $j = 7$ , što napisano u binarnom obliku izgleda  $j = 0111$ . Za taj slučaj vrijedi prikaz kao na slici 3.13.

															$j$			
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1		$T/16$	1
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1		$T/8$	0
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1		$T/4$	1
0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1		$T/2$	1

Slika 3.13. Osna simetrija i osna simetrija po intervalima Walsheve funkcije

Za skup Walshevih funkcija u vremenskom obliku  $W_j(t)$  kažemo da je zatvoren jer produkt između bilo koje dvije funkcije daje jednu od funkcija iz skupa. Dakle, vrijedi jednačina:

$$W_i(t) = W_k(t) \cdot W_l(t) \quad (3.8)$$

U binarnom prikazu funkcije kodnom sekvencom produkt iz vremenskog oblika mijenja se sumom po modulu 2,  $\oplus$ .

Dakle, vrijedi jednačina (3.9).

$$W_i = W_k \oplus W_l \quad (3.9)$$

### Generiranje ortogonalnih kodova

Postoji više matematičkih postupaka pomoću kojih se može generirati Walshev skup ortogonalnih kodnih sekvenci. Neki od značajnih postupaka jesu:

- korištenje simetričnih svojstava Walsheve funkcije (kako smo to već objasnili u prethodnom stavku)
- korištenje Rademacherovih funkcija
- korištenje Hadamardove matrice.

Ovdje ćemo objasniti generiranje ortogonalnih kodova korištenjem *Hadamardove* matrice. Tu metodu generiranja ortogonalnih kodnih sekvenci odabrali smo iz razloga što ćemo se *Hadamardovom* matricom poslužiti pri opisu promjene faktora kodnog raspršenja, te iz razloga što se vrlo često kod sustava koji se osnivaju na kodnoj podjeli među korisnicima ova metoda brzog generiranja upotrebljava.

*Hadamard* matrica je kvadratno polje koje se sastoji od pozitivnih i negativnih jedinica (nije matrica u matematičkom smislu), ako želimo generirati vremensku *Walshevu* funkciju  $W_j(t)$ . *Hadamard* matrica je kvadratno polje koje se sastoji od nula i jedinica, ako se koristimo binarnom prezentacijom *Walsheve* kodne sekvence.

*Hadamard* matrica nulte razine prikazana je u jednačini (3.10).

$$H_0 = [1] \equiv [0] \quad (3.10)$$

*Hadamard* matrica  $n$ -te razine može se generirati iz *Hadamard* matrice  $(n-1)$  razine preko jednačine (3.11).

$$H_n = \begin{bmatrix} H_{n-1} & H_{n-1} \\ H_{n-1} & -H_{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Primjer generiranja kodnih sekvenci korištenjem *Hadamardove* matrice.



$$\begin{aligned}
H_0 &= [0] \\
H_1 &= \begin{bmatrix} H_0 & H_0 \\ H_0 & H_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
H_2 &= \begin{bmatrix} H_1 & H_1 \\ H_1 & H_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\
H_3 &= \begin{bmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Tablica 3.2. Promjena Walshevih indeksa funkcije u Hadamardove

Walsh poredak	$j$	Razdijeljeni indeksi	Walsh indeksa	Proračun Hadamardovih indeksa iz Walsh indeksa	$c$	Hadamardov poredak
0	000	$j_{01}=0, j_{02}=0, j_{03}=0$			000	0
1	001	$j_{11}=0, j_{12}=0, j_{13}=1$			100	4
2	010	$j_{21}=0, j_{22}=1, j_{23}=0$		$c_{x3}=j_{x1}$	110	6
3	011	$j_{31}=0, j_{32}=1, j_{33}=1$		$c_{x2}=j_{x1} \oplus j_{x2}$	010	2
4	100	$j_{41}=1, j_{42}=0, j_{43}=0$		$c_{x1}=j_{x2} \oplus j_{x3}$	011	3
5	101	$j_{51}=1, j_{52}=0, j_{53}=1$			111	7
6	110	$j_{61}=1, j_{62}=1, j_{63}=0$			101	5
7	111	$j_{71}=1, j_{72}=1, j_{73}=1$			001	1

Ukupni skup ortogonalnih kodova je isti, ali poredak kodova po Walshu i po Hadamardu nije isti.

### Kodna podjela među korisnicima primjenom ortogonalnih kodova

- Korisnički signal  $S(t)$  ima period jednoga simbola (bita) u intervalu  $(0, T)$ .
- U tom intervalu signal  $S(t)$  može biti  $\{+1\}$  što odgovara logičkoj nuli (0) ili  $\{-1\}$  što odgovara logičkoj jedinici (1).

- Korisnički signal  $j$ -tog korisnika  $S_j(t)$  promatran u vremenskoj domeni množi se s jednom od *Walsh*evih funkcija  $W_j(t)$ .
- Ukupni raspršeni signal  $R_{uk}(t)$  dobiva se kao suma pojedinačnih produkata između korisničkih signala i *Walsh*evih funkcija, što je opisano jednadžbom. Za stupanj kodnog raspršenja  $N$ , moguće je proizvesti  $N$  različitih raspršenih signala. Ukupni signal koji se vodi na izlaz je:

$$R_{uk}(t) = \sum_{j=0}^{N-1} S_j(t) \cdot W_j(t) \quad \text{odnosno na kodnoj razini} \quad R_{uk} = \sum_{j=0}^{N-1} S_j \oplus W_j \quad (3.13)$$

U prijemu očitavanje  $i$ -tog korisničkog signala iz ukupnog signala vrši se množenjem ukupnog signala  $R_{uk}(t)$  s *Walsh*evom funkcijom  $W_i(t)$ , te integriranjem u intervalu  $(0, T)$ . Treba dokazati da vrijedi jednadžba (3.5):

$$\begin{aligned} S_i(t) \cdot T &= \int_0^T W_i(t) \cdot R_{uk}(t) \cdot dt = \\ S_i(t) \cdot T &= \int_0^T W_i(t) \cdot \left( \sum_{j=0}^{N-1} S_j(t) \cdot W_j(t) \right) dt \\ S_i(t) \cdot T &= \int_0^T \left( \sum_{j=0}^{N-1} S_j(t) \cdot W_j(t) \cdot W_i(t) \right) dt = \\ S_i(t) \cdot T &= \sum_{j=0}^{N-1} \int_0^T S_j(t) \cdot W_j(t) \cdot W_i(t) \cdot dt \end{aligned} \quad (3.14)$$

Kako u intervalu  $(0, T)$   $S_j(t)$  ima vrijednost  $+1$  ili  $-1$  (jedan informacijski bit u intervalu raspršenja), to u jednadžbi suma svih integrala predstavlja sumu integrala umnoška *Walsh*evih funkcija od kojih pojedini članovi sume mogu biti pozitivni ili negativni (što ovisi o stanju svakog pojedinog korisničkog signala  $S_j(t)$ ). Koristeći se rješenjem iz jednadžbe (3.5) dobivamo rješenje iskazano u jednadžbi (3.15).

$$\begin{aligned} S_i(t) \cdot T &= \sum_{j=0}^{N-1} \int_0^T S_j(t) \cdot W_j(t) \cdot W_i(t) \cdot dt \\ S_i(t) \cdot T &= \int_0^T S_1(t) \cdot W_1(t) \cdot W_i(t) \cdot dt + \int_0^T S_2(t) \cdot W_2(t) \cdot W_i(t) \cdot dt + \dots \\ &\dots + \int_0^T S_i(t) \cdot W_i(t) \cdot W_i(t) \cdot dt \dots + \int_0^T S_N(t) \cdot W_N(t) \cdot W_i(t) \cdot dt = \\ S_i(t) \cdot T &= (\pm) \int_0^T W_1(t) \cdot W_i(t) \cdot dt + (\pm) \int_0^T W_2(t) \cdot W_i(t) \cdot dt + \dots \\ &\dots + (\pm) \int_0^T W_i(t) \cdot W_i(t) \cdot dt + \dots + (\pm) \int_0^T W_N(t) \cdot W_i(t) \cdot dt = \\ S_i(t) \cdot T &= (\pm) \cdot 0 + (\pm) \cdot 0 + \dots + S_i(t) \cdot T + \dots + (\pm) \cdot 0 \\ S_i(t) \cdot T &= S_i(t) \cdot T \end{aligned} \quad (3.15)$$

### Promjena kodnog raspršenja i združivanje kodova kod mobilnih komunikacijskih sustava WCDMA (UMTS)

- Od svakog koda  $V$ -te razine mogu se napraviti dva koda  $(V+1)$  razine na način koji proizlazi iz generiranja koda preko *Hadamard*ove matrice, kao što je to prikazano u jednadžbama (3.16).

$$\begin{aligned}
 W_{2^{j+1}(V+1 \text{ razine})} &= W_{j(V-te \text{ razine})} (+ \textit{nastavak}) W_{j(V-te \text{ razine})} \\
 W_{2^j(V+1 \text{ razine})} &= W_{j(V-te \text{ razine})} (+ \textit{nastavak}) \overline{W_{j(V-te \text{ razine})}}
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

Gdje je:

$$\begin{aligned}
 \overline{W_{j(V-te \text{ razine})}}(t) &= (-1) \cdot W_{j(V-te \text{ razine})}(t) \text{ vremenski} \\
 \overline{W_{j(V-te \text{ razine})}} &= (1) \oplus W_{j(V-te \text{ razine})} \text{ binarno}
 \end{aligned}$$

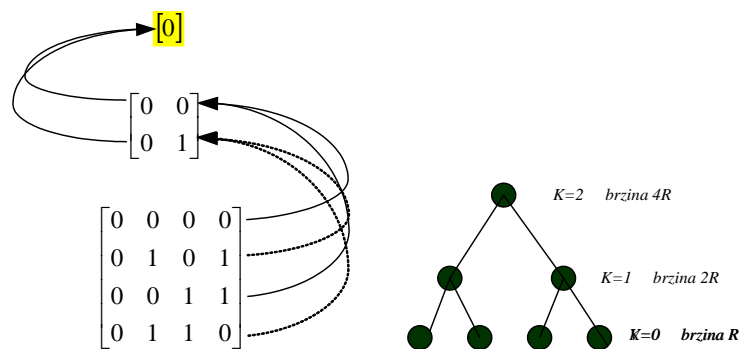
U jednadžbi (3.16 b) vrijednost (-1) množi se sa svim vrijednostima funkcije polovine intervala

$$W_{j(V-te \text{ razine})}(t) \tag{3.17}$$

Funkcije  $W_{2^{j+1}(V-te \text{ razine})}$  i  $W_{2^j(V-te \text{ razine})}$  međusobno su ortogonalne u ukupnoj dužini od 0 do T. Međutim, kod dvostruko bržeg signala gdje je vrijeme trajanja bita upola manje, od 0 do T/2, polovina perioda funkcije  $W_{2^{j+1}(V-te \text{ razine})}$  i  $W_{2^j(V-te \text{ razine})}$  nisu ortogonalne, jer se u drugoj polovini intervala sastoje od funkcija  $W_{j(V-te \text{ razine})}$  i inverzije te funkcije.

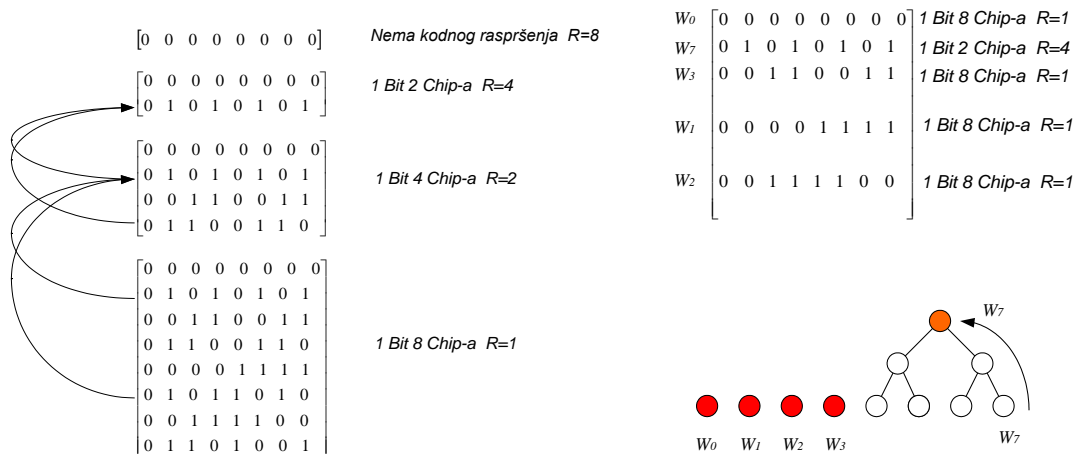
Za prijenos dvostruko bržeg signala koristi se funkcija  $W_{2^{j+1}(V-te \text{ razine})}$  u polovini intervala, što je u stvari funkcija  $W_{j(V-te \text{ razine})}$ , a funkcija  $W_{2^j(V-te \text{ razine})}$  se odbacuje, to jest ne smije se koristiti. Taj postupak zove se združivanje kodova i označava se s W-CDMA.

Kod smanjenja stupnja kodnog raspršenja koje se provodi na način da koderu privodimo signal (dvostruke brzine) koristit ćemo se samo jednim od kodova. Povoljnije je koristiti se onim kodom koji samo pasivno ponavlja prethodnu kodnu sekvencu iz jednadžbe (3.17). Navedeno se može prikazati *Hadamardovom* matricom, kao na slici 3.14.



Slika 3.14. Združivanje kodova pri prijenosu signala veće brzine od R u W CDMA tehnici smanjenja kodnog raspršenja ili združivanja kodova

Združivanje kodova pri prijenosu usluga koje zahtijevaju veće brzine prijenosa prikazano je i na slici 3.15.



### 3.15. Združivanje kodova pri prijenosu signala veće brzine od $R$ u $W$ CDMA tehnici smanjenja kodnog raspršenja ili združivanja kodova

#### Kapacitet sustava s kodnom podjelom i osnovna svojstva CDMA sustava s direktnim raspršenjem

Definirajmo sljedeće parametre sustava s direktnim raspršenjem spektra (DS CDMA).

- $S$  - primljena **snaga korisnog signala** mjerena u  $W$
- $J$  - primljena snaga nekorisnog, odnosno neželjenog i ometajućeg signala, **šuma** u  $W$
- $W$  - opseg signala u Hz
- $R=1/T_b$  - brzina korisničkih podataka (podatkovni signalni opseg u Hz)
- $E_b$  - primljena energija po bitu informacije korisnog signala u  $W\text{sec}$
- $N_0$  - spektralna gustoća šuma u  $W/\text{Hz}$ .

Odnos **šum/signal** na ulazu u prijemnik definiran je odnosom  $J/S$ .

Snaga ukupnog korisnog signala određena je umnoškom primljene energije po bitu  $E_b$  i brzine korisničkih podataka  $R$ . Brzina korisničkog signala je  $R = 1/T_b$ .

$$S = E_b R \quad \& \quad S = E_b / T_b \quad (3.18)$$

Ukupna snaga šuma na ulazu u prijemnik dana je umnoškom spektralne gustoće šuma  $N_0$  i ukupne širine opsega raspršenog signala  $W$ , dakle:

$$J = N_0 W \quad (3.19)$$

Odnos šum/signal na ulazu u prijemnik definiran je jednadžbom (3.20):

$$\frac{J}{S} = \frac{N_0 W}{E_b / T_b} = \frac{W T_b}{E_b / N_0} = \frac{W / R}{E_b / N_0} \quad (3.20)$$

Stvarni odnos šum/signal na ulazu u prijemnik određen je odnosom ukupne širine spektra  $W$  koja je podijeljena s brzinom podataka  $R$  prema odnosu energije po bitu  $E_b$  naspram spektralnoj gustoći šuma  $N_0$ .

#### Odnos $W/R$ naziva se dobitkom kodnog raspršenja.

Ako nema kodnog raspršenja  $W=R$ , tada je odnos signal/šum na ulazu jednak odnosu snage signala po bitu informacije koji je podijeljen sa spektralnom gustoćom šuma.

$$SNR=S/J=Eb/N_0. \quad (3.21)$$

Izraz (3.21) možemo pisati i u obliku *dB*. Tada dobivamo takozvani definirani granični odnos signal/šum za odgovarajući unaprijed zadani *BER*, koji je određen zahtijevanim odnosom  $E_b/N_0$ .

$$\text{Granični odnos (dB)} = \left(\frac{W}{R}\right) \text{ (dB)} - \left(\frac{E_b}{N_0}\right) \text{ (dB)} \quad (3.22)$$

Isto razmišljanje nas navodi na činjenicu da je na taj način moguće izračunati stvarni kapacitet sustava. Glavni izvor šuma su drugi korisnici u sustavu te bez obzira na broj kodova zbog odnosa signal/šum svi kodovi ne mogu biti u upotrebi.

Pretpostavimo da je sustav izoliran od vanjskih oblika interferencije. Korisna primljena snaga je  $C=S=Eb/Tb=REb$ , a ukupna ometajuća snaga je  $I=J=WN_0$ . Pretpostavimo da ukupno u ćeliji imamo  $M$  korisnika. Korisnik prima jednu korisnu snagu i  $(M-1)$  ometajućih snaga. Pretpostavimo da je razina korisne snage svih korisnika ista, pa je ukupna ometajuća snaga nastala zbog interferencije dana izrazom:

$$I = C \cdot (M - 1) \quad (3.23)$$

Odnos šuma i signala  $I/C$  možemo izraziti kao (3.24).

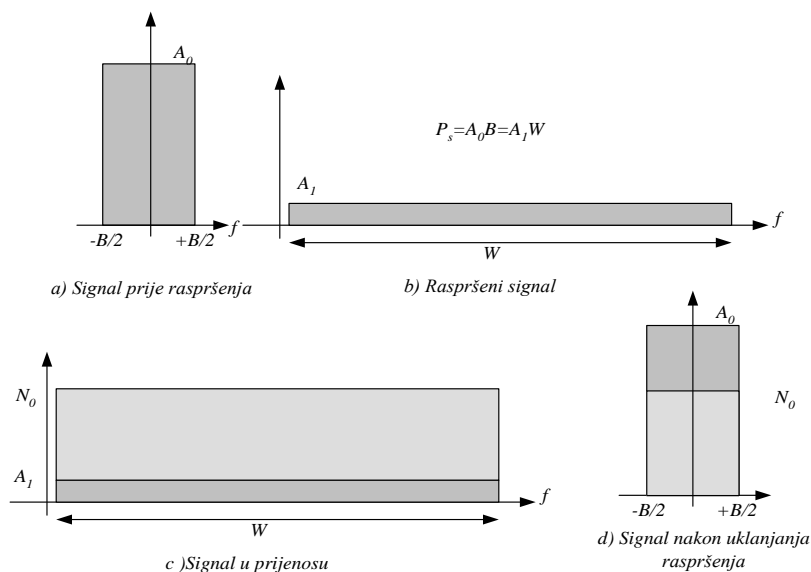
$$\frac{I}{C} = (M - 1) \quad (3.24)$$

Odnos šuma i signala također je opisan jednadžbom (3.20), pa možemo izjednačiti jednadžbu (3.20) i jednadžbu (3.24).

$$(M - 1) = \frac{W/R}{E_b/N_0}$$

$$M = \frac{W/R}{E_b/N_0} + 1 \quad (3.25)$$

Maksimalni broj korisnika određen je odnosom kodnog dobitka  $(W/R)$  i zahtijevanog odnosa signala i šuma za razumijevanje neraspršenog signala  $(E_b/N_0)$  uvećan za jedan. Stvarni broj ortogonalnih kodova koji mogu biti aktivni u ćeliji uvijek je manji od broja raspoloživih kodova.



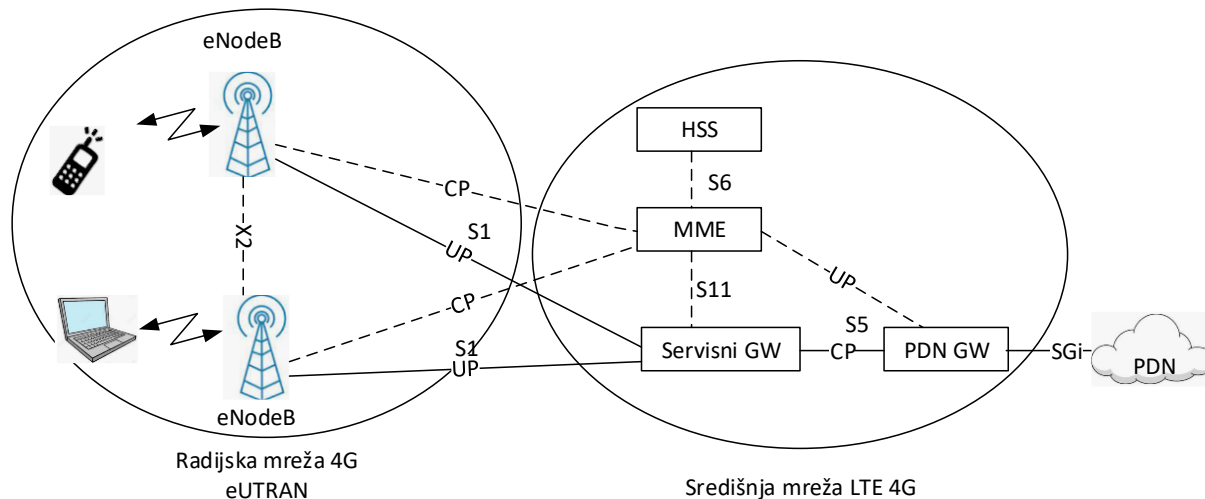
Slika 3. 16. Slika prikazuje spektralnu gustoću snage signala prije raspršenja, nakon raspršenja odnos signal/šum u prijenosu i odnos signal/šum nakon uklanjanja raspršenja.



## 4. 4G LTE

### 4.1. Značajna unaprjeđenja sustava 4G u odnosu na sustave 3G

Na slici 4.1. prikazana je arhitektura LTE 4G mreže. Prije nego što objasnimo arhitekturu 4G mreže, navest ćemo najznačajnije izmjene u odnosu na arhitekturu i način rada 3G mreža.



Slika 4.1. Arhitektura LTE 4G mreže

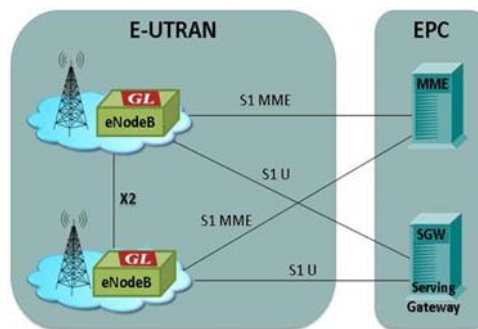
1. 4G LTE mreže **podržavaju samo prijenos paketa**, zbog toga u središnjoj mreži nestaje čvor MSC (mobilna komutacija) koji je postojao u mrežama 2 i 3G, a koji je bio zadužen za kanalska prosipanja.
2. U radijskoj mreži 4G LTE koja se naziva eUTRAN, gdje oznaka „e“ znači *enhanced* (unaprijeđena ili poboljšana), **ukinuta je funkcija područnog kontrolera** (u 2G to je bio BSC, a u 3G RNC). Kako više nema područnog kontrolera, manji dio njegovih funkcija prelazi na baznu postaju koja sada nosi oznaku eNodeB, gdje oznaka „e“ znači *enhanced*, a veći dio funkcija prelazi na čvor koji se je u 2 i 3G označavao kao VLR. Sada primajući na sebe veći dio funkcija koji je obavljao područni kontroler, to postaje jedan od najvažnijih upravljačkih čvorova za upravljanje u mobilnoj mreži 4G i nosi novu oznaku MME (**Mobile Management Entity**).
3. Kako bi se olakšao prijelaz između susjednih ćelija, **susjedne ćelije (bazne postaje) povezane su novim signalizacijskim linkom X2** čija je osnovna funkcija dogovaranje prelaska iz ćelije u ćeliju.
4. Pozadinska mreža kod 3G temeljila se je na ATM prijenosu. Kod sustava 4G LTE **pozadinska mreža (prometni linkovi UP) temelji se na Ethernet prijenosu**.
5. Promijenjen je način rada **u zračnom sučelju** i sada se umjesto jednog nositelja koristi više podnositelja ili **tehnika OFDM**, a na svakom podnositelju može se primijeniti **različiti stupanj modulacijske složenosti**.
6. U prijenosu signala primjenjuje se **kognitivna radiotehnika**. Modulacijska složenost i stupanj zaštitnog kodiranja prilagođuju se kvaliteti radijskog linka.
7. Kod 4G LTE sustava **povećan je informacijski volumen** koji dijele svi korisnici u ćeliji. Tako je maksimalna teoretska granica kapaciteta prijenosa u silaznom smjeru 175 Mbit/s, a u uzlaznom smjeru 80 Mbit/s.
8. Zbog strukturnih promjena u arhitekturi mreže **većina entiteta dobiva nove nazive**, ali i funkcije, kao što je MME (*Mobile Management Entity*), HSS i drugi.

## 4.2. Arhitektura sustava 4G, frekventni opsezi i način rada sustava 4G

Arhitektura sustava 4G LTE znatno je pojednostavljena u odnosu na arhitekturu 3G sustava. Dijelom je to posljedica odustajanja od komutacije kanala i prelaska na komutaciju paketa, što se kao razvojni trend podudara i s ostalim komunikacijskim mrežama. Do promjena u arhitekturi dijelom dolazi i zbog smanjenja broja čvorova, to jest ukidanja područnog kontrolera. Manji broj čvorova u podatkovnoj mreži smanjuje kašnjenje signala, ali uzrokuje promjene u organizaciji. Kada ukinete jedan čvor da biste smanjili kašnjenje, funkcije tog čvora moraju prijeći na okruženje, što opet ima za uzrok promjenu (nadogradnju) susjednih čvorova mreže pa se samim tim mijenja i njihov naziv.

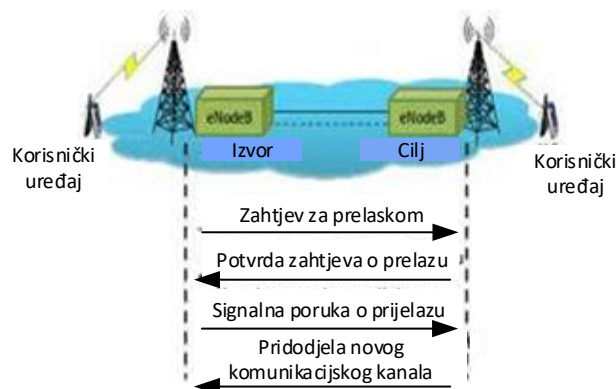
### eNode B

Bazna postaja koja kod 4G nosi oznaku eNode B preuzela je manji dio upravljačkih funkcija u mreži koje je prije imao područni kontroler. Bazna postaja (slika 4.2.) povezana je sa središnjom mrežom dvama logičkim linkovima, od kojih je link koji povezuje eNode B s MME (Mobile Management Entity) signalizacijski link, a link koji povezuje eNode B sa servisnim poslužiteljem (SGW) prometni link.



Slika 4.2. Povezivanje baznih postaja eNode B u 4G LTE mobilnoj mreži

Između susjednih baznih postaja (eNode B) uspostavlja se signalizacijski link X2 koji rješava zahtjeve u vezi s prelaskom pretplatnika iz ćelije u ćeliju.



Slika 4.3. X2 sučelje u povezivanju susjednih eNode B

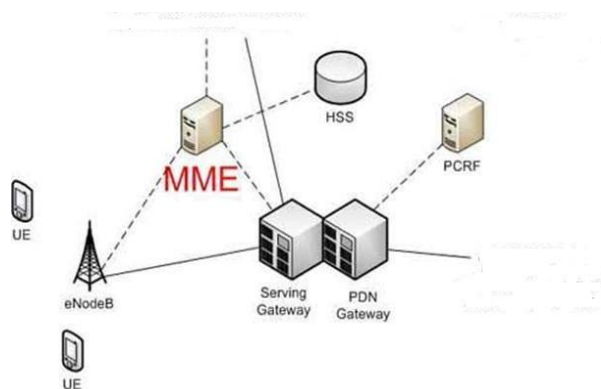
### MME (Mobile Management Entity)

Entitet za upravljanje mobilnošću (MME - Mobile Management Entity) jest osnovni čvor središnje mreže. Njegova je funkcija obrada i prosljeđivanje signalnih poruka koje se razmjenjuju kroz upravljačku ravninu između krajnje opreme korisnika i drugih čvorova središnje mreže. Izvještavanje se vrši pomoću NAS (*Non Access Stratum*) protokola. MME (Mobile Management Entity) – entitet za



upravljanje mobilnošću, također je odgovoran za čvorove pristupne mreže eNode B. Osnovne funkcije entiteta za upravljanje mobilnošću MME (Mobile Management Entity) su sljedeće:

- izvještavanje NAS
- sigurnost signalizacije NAS
- kontrola pristupa na razini čvora
- izbor elemenata PDN-GW i S-GW
- upravljanje mobilnošću pri prelasku na druge mreže
- odabir SGSN-a pri prebacivanju između LTE i 3GPP 2G/3G pristupnih mreža
- posredovanje kod autentifikacija korisnika u suradnji s matičnim registrom pretplatnikove mreže HSS ili HLR
- dodjeljivanje privremenog broja korisniku itd.



Slika 4.4. Signalizacijski (upravljački) linkovi kojima je povezan MME (Mobile Management Entity) sa radijskom mrežom i ostalim entitetima središnje mreže.

#### S-GW

Servisni pristupnik, uslužni poslužitelj (S-GW) ili pristupni čvor usluge koristi se za povezivanje korisničke opreme i mrežnog pristupnika mrežnog paketa podataka (PDN-GW). Pristupni čvor usluge prenosi podatke u PDN-GW i prati kretanje korisničke opreme između baznih stanica pristupne mreže. Ako se korisnik preseli u područje druge bazne stanice, pristupni čvor usluge se mijenja. Također služi za reguliranje veze s korisnicima druge mreže i **lokalna je točka za proces prebacivanja između baznih stanica i za mobilnost između 3GPP mreža.**

Neke od aktivnosti čvora pristupa usluzi (S-GW) su sljedeće:

- slanje i prosljeđivanje paketa podataka
- presretanje poziva
- označavanje paketa transportnog sloja za ulaznu i dolaznu vezu
- upravljanje privremenom pohranom paketa u načinu mirovanja.

#### PDN-GW

(PDN-GW), odnosno pristupni čvor paketne mreže, predstavlja krajnju točku podatkovnog sučelja podatkovne mreže prema IP protokolu. Kao čvor pristupa usluzi, on pruža vezu između korisničke opreme i SAE-GW, koji se sastoji od S-GW i PDN-GW. Pristupni čvor paketne mreže povezan je s pristupnim čvorom usluge s jedne strane i IP podatkovnom mrežom s druge strane. Za razliku od čvora za pristup usluzi koji se mijenja promjenom lokacije korisnika, pristupni čvor paketne mreže PDN-GW ostaje isti sve dok je korisnički terminal spojen na mrežu. Neke od funkcija čvora za pristup paketnoj mreži jesu:

- dodjeljivanje IP adrese korisničkom terminalu
- filtriranje i upravljanje paketima
- presretanje poziva
- označavanje paketa na transportnoj razini u uzlaznoj i silaznoj vezi
- naplata.

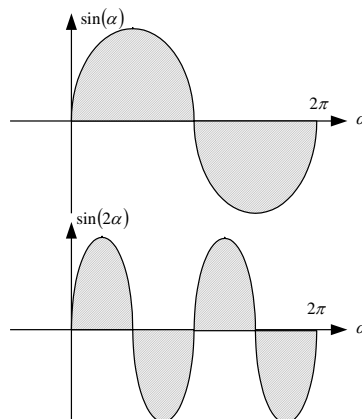
## HSS

Domaći pretplatnički poslužitelj (HSS) koristi se za upravljanje profilima korisnika. Izvršava autentifikaciju i autorizaciju korisnika (koristeći se AUC ekstenzijom). Korisnički profili sastoje se od informacija koje se odnose na pretplatnika, pretplatu, sigurnost, kvalitetu usluge i ograničenja pristupa pri prelasku na drugu mrežu (*roaming*) te trenutnu lokaciju korisnika ili njegova krajnjeg uređaja (u kojoj je mreži). Sadrži podatke o mreži paketnih podataka (PDN) na koje se korisnik može povezati u obliku naziva pristupne točke ili kao PDN adresa koja označava IP adresu pretplatnika.

HSS također sadrži dinamičke podatke o identitetu MME (Mobile Management Entity), a na koji je korisnička oprema tek spojena ili registrirana. Ima centar za provjeru autentičnosti i sigurnosnu lozinku, pa kad MME (Mobile Management Entity) primi zahtjev od korisnika za povezivanje s mrežom, MME (Mobile Management Entity) šalje zahtjev za potvrdu pretplatničkom poslužitelju radi provjere autentičnosti podataka.

## 4.3. OFDMA tehnologija prijenosa

Sinusna funkcija  $\sin(\alpha)$  je ortogonalna sa svojim harmoničnim komponentama  $\sin(n\alpha)$  u intervalu  $[0;2\pi]$ , gdje je  $n$  redni broj od 2 do  $\infty$ . Sinusna funkcija i prva harmonična komponenta ( $n = 2$ ) prikazane su na slici 4.5.



Slika 4.5. Funkcije  $\sin\alpha$  i  $\sin 2\alpha$

Ako su funkcije  $\sin(\alpha)$  i  $\sin(2\alpha)$  međusobno ortogonalne u intervalu  $[0;2\pi]$ , onda one moraju u tom intervalu ispuniti uvjet ortogonalnosti opisan u jednadžbi (3.2) koji možemo pisati u obliku (4.1):

$$\begin{aligned}
& \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot \sin(2\alpha) \cdot d\alpha = 0 \\
& \sin(2\alpha) = 2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \\
& \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot 2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot d\alpha = 0 \\
& 2 \cdot \int_0^{2\pi} [\sin(\alpha)]^2 \cdot \cos(\alpha) \cdot d\alpha = 2 \cdot \int_0^{2\pi} \{1 - [\cos(\alpha)]^2\} \cdot \cos(\alpha) \cdot d\alpha = 2 \cdot \underbrace{\int_0^{2\pi} \cos(\alpha) \cdot d\alpha}_{I_1} - 2 \cdot \underbrace{\int_0^{2\pi} [\cos(\alpha)]^3 \cdot d\alpha}_{I_2} \quad (4.1)
\end{aligned}$$

Integral funkcije  $\cos(\alpha)$  je  $\sin(\alpha)$  iz čega proizlazi da je  $I_1$  iz jednadžbe (4.1) iskazan kao u (4.2).

$$I_1 = 2 \cdot \int_0^{2\pi} \cos(\alpha) \cdot d\alpha = 2 \cdot \sin(\alpha) \Big|_0^{2\pi} = 2 \cdot [\sin(2\pi) - \sin(0)] = 2 \cdot [0 - 0] = 0 \quad (4.2)$$

Sada izračunajmo  $I_2$  iz jednadžbe (4.1).

$$I_2 = -2 \cdot \int_0^{2\pi} [\cos(\alpha)]^3 \cdot d\alpha = -2 \cdot \left[ \sin(\alpha) - \frac{1}{3} [\sin(\alpha)]^3 \right] \Big|_0^{2\pi} = 0 \quad (4.3)$$

Računajući (4.2) i (4.3) dokazali smo da funkcije  $\sin(\alpha)$  i  $\sin(2\alpha)$  zadovoljavaju uvjet ortogonalnosti (3.2) da je integral njihova produkta u intervalu ortogonalnosti  $[0; 2\pi]$  jednak 0. Da bi se ove funkcije mogle koristiti za ortogonalnu podjelu u prijenosu informacije, nužno je da nisu same sa sobom ortogonalne, to jest da integral svake funkcije pomnožene same sa sobom u intervalu ortogonalnosti  $[0; 2\pi]$  daje konstantu, što je također iskazano u (3.2).

Riješimo integral funkcije  $[\sin(\alpha)]^2$  u intervalu ortogonalnosti  $[0; 2\pi]$ , (4.4).

$$\int_0^{2\pi} [\sin(\alpha)]^2 \cdot d\alpha = \left[ \frac{1}{2} \alpha - \frac{1}{4} \sin(2\alpha) \right] \Big|_0^{2\pi} = \left\{ \left[ \frac{1}{2} 2\pi - \underbrace{\frac{1}{4} \sin(4\pi)}_{=0} \right] - \left[ \underbrace{\frac{1}{2} 0}_{=0} - \underbrace{\frac{1}{4} \sin(0)}_{=0} \right] \right\} = \pi \quad (4.4)$$

Dakle vrijedi da je  $\int_0^{2\pi} [\sin(\alpha)]^2 \cdot d\alpha = \pi$  konstanta.

Za prvu višu harmoničnu komponentu  $\sin(2\alpha)$  također vrijedi:

$$\int_0^{2\pi} [\sin(2\alpha)]^2 \cdot d\alpha = \pi$$

Moglo bi se pokazati da za bilo koji  $n$  vrijedi izraz  $\int_0^{2\pi} [\sin(n\alpha)]^2 d\alpha = \pi$ .

Sinusna funkcija i njezina prva harmonična komponenta međusobno su ortogonalne i mogu se koristiti kao skup funkcija za ortogonalnu podjelu. Postavlja se pitanje zadovoljava li i sljedeća harmonična komponenta  $\sin(3\alpha)$  uvjet ortogonalnosti s funkcijom  $\sin(\alpha)$ , to jest uvjet iskazan jednadžbom (3.2).

$$\begin{aligned}
& \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot \sin(3\alpha) \cdot d\alpha = 0 \\
& \sin(3\alpha) = \sin(\alpha + 2\alpha) = \sin(\alpha)\cos(2\alpha) + \sin(2\alpha)\cos(\alpha) \\
& \sin(3\alpha) = \sin(\alpha)([\cos(\alpha)]^2 - [\sin(\alpha)]^2) + 2\sin(\alpha)[\cos(\alpha)]^2 \\
& \sin(3\alpha) = 3\sin(\alpha)[\cos(\alpha)]^2 - [\sin(\alpha)]^3 = 3\sin(\alpha)\{1 - [\sin(\alpha)]^2\} - [\sin(\alpha)]^3 = 3\sin(\alpha) - 4[\sin(\alpha)]^3 \\
& \sin(\alpha) \cdot \sin(3\alpha) = 3[\sin(\alpha)]^2 - 4[\sin(\alpha)]^4 \\
& \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot \sin(3\alpha) \cdot d\alpha = 3 \cdot \underbrace{\int_0^{2\pi} [\sin(\alpha)]^2 \cdot d\alpha}_{3\pi} - 4 \cdot \underbrace{\int_0^{2\pi} [\sin(\alpha)]^4 \cdot d\alpha}_{3\pi} = 3\pi - 3\pi = 0 \\
& \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot \sin(3\alpha) \cdot d\alpha = 0 \tag{4.5}
\end{aligned}$$

Vrijedi uvjet ortogonalnosti funkcija  $\sin(\alpha)$  i  $\sin(3\alpha)$ . Dalo bi se pokazati i da sve funkcije višeg reda zadovoljavaju uvjet ortogonalnosti, to jest da je  $\{\sin(\alpha), \sin(2\alpha), \sin(3\alpha), \dots, \sin(n\alpha), \dots, \sin(\infty\alpha)\}$  skup ortogonalnih funkcija koji zadovoljava uvjet (2). Ako taj skup ortogonalnih funkcija želimo iskoristiti za prijenos informacija, onda te sinusne funkcije moraju biti vremenske funkcije kao u (4.6).

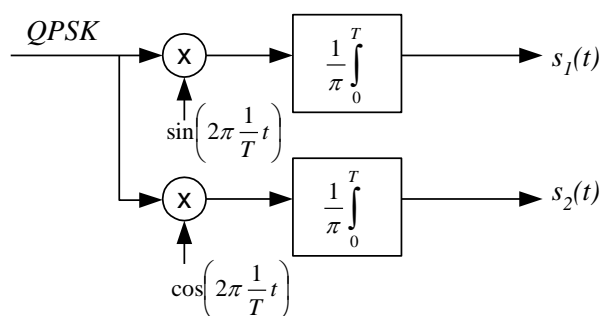
$$\left\{ \sin\left(2\pi \frac{1}{T} t\right), \sin\left(2\pi \frac{2}{T} t\right), \sin\left(2\pi \frac{3}{T} t\right), \dots, \sin\left(2\pi \frac{n}{T} t\right), \dots, \sin\left(2\pi \frac{\infty}{T} t\right) \right\} \tag{4.6}$$

Kvadraturna fazna modulacija QPSK kao ortogonalna modulacija.

Funkcije  $\sin(\alpha)$  i  $\cos(\alpha)$  također su međusobno ortogonalne funkcije jer zadovoljavaju uvjet postavljen pod (3.2). Dokažimo to:

$$\begin{aligned}
& \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot d\alpha = \\
& \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) = \frac{1}{2} \cdot \sin(2\alpha) \\
& \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \cdot \sin(2\alpha) \cdot d\alpha = \frac{1}{2} \cdot \int_0^{2\pi} \sin(2\alpha) \cdot d\alpha = -\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \cos(2\alpha) \Big|_0^{2\pi} = -\frac{1}{4} \left[ \underbrace{\cos(4\pi)}_{=1} - \underbrace{\cos(0)}_{=1} \right] \\
& \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \cdot d\alpha = -\frac{1}{4} [1 - 1] = 0 \tag{4.7}
\end{aligned}$$

Dakle, QPSK možemo shvatiti kao ortogonalnu podjelu sa skupom ortogonalnih funkcija  $\{\sin(\alpha), \cos(\alpha)\}$ . Kvadraturnu faznu demodulaciju također možemo ostvariti ortogonalnim demodulatorima kao na slici 4.6.



Slika 4.6. QPSK demodulacija kao ortogonalna demodulacija

Također, može se pokazati da je red funkcija  $\{\cos(\alpha), \cos(2\alpha), \cos(3\alpha), \dots, \cos(n\alpha), \dots, \cos(\infty\alpha)\}$  beskonačni skup ortogonalnih funkcija. Intuitivno zaključujemo da će se od skupova ortogonalnih funkcija  $\sin$  i  $\cos$  moći napraviti jedinstveni ortogonalni skup (4.8).

$$\left\{ \sin\left(2\pi\frac{1}{T}t\right), \cos\left(2\pi\frac{1}{T}t\right), \sin\left(2\pi\frac{2}{T}t\right), \cos\left(2\pi\frac{2}{T}t\right), \dots, \sin\left(2\pi\frac{n}{T}t\right), \cos\left(2\pi\frac{n}{T}t\right), \dots, \sin\left(2\pi\frac{\infty}{T}t\right), \cos\left(2\pi\frac{\infty}{T}t\right) \right\} \quad (4.8)$$

Ortogonalni skup (4.8) možemo iskazati preko kompleksnog *Furierova* reda (4.9).

$$\left\{ \sum_{n=1}^{\infty} e^{jn\omega t} \right\} \text{ gdje je } \omega = 2\pi\frac{1}{T} \quad (4.9)$$

Da bismo bili sigurni u prethodne tvrdnje, pokažimo međusobnu ortogonalnost funkcija  $\sin(\alpha)$  i  $\cos(2\alpha)$ .

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot \cos(2\alpha) \cdot d\alpha &= \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot ([\cos(\alpha)]^2 - [\sin(\alpha)]^2) \cdot d\alpha = \\ \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot (1 - 2 \cdot [\sin(\alpha)]^2) \cdot d\alpha &= \int_0^{2\pi} \sin(\alpha) \cdot d\alpha - 2 \cdot \int_0^{2\pi} [\sin(\alpha)]^3 \cdot d\alpha = \\ &= \underbrace{-\cos(\alpha)}_{=0} \Big|_0^{2\pi} - 2 \cdot \underbrace{\left[ -\cos(\alpha) + \frac{1}{3} [\cos(\alpha)]^3 \right]}_{=0} \Big|_0^{2\pi} = 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

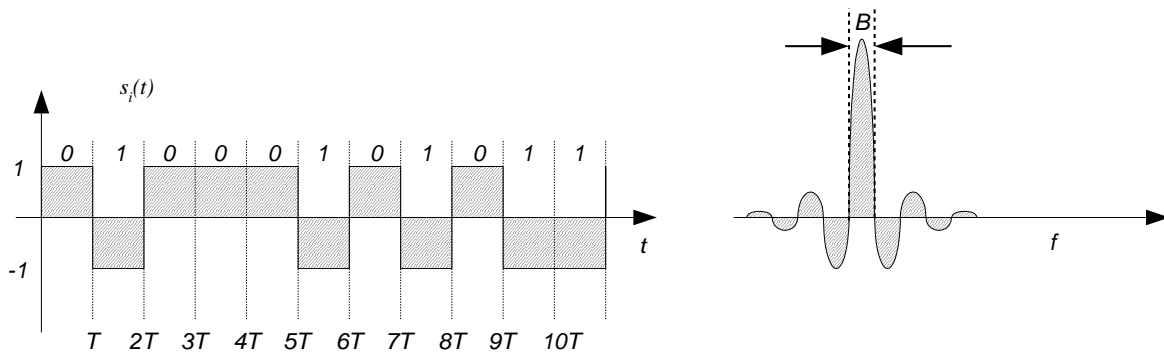
### Slanje širokopojasnog signala korištenjem OFDM modulacije

Pri slanju signala korištenjem sustava OFDM moramo razlikovati dva pristupa i koristi od njih:

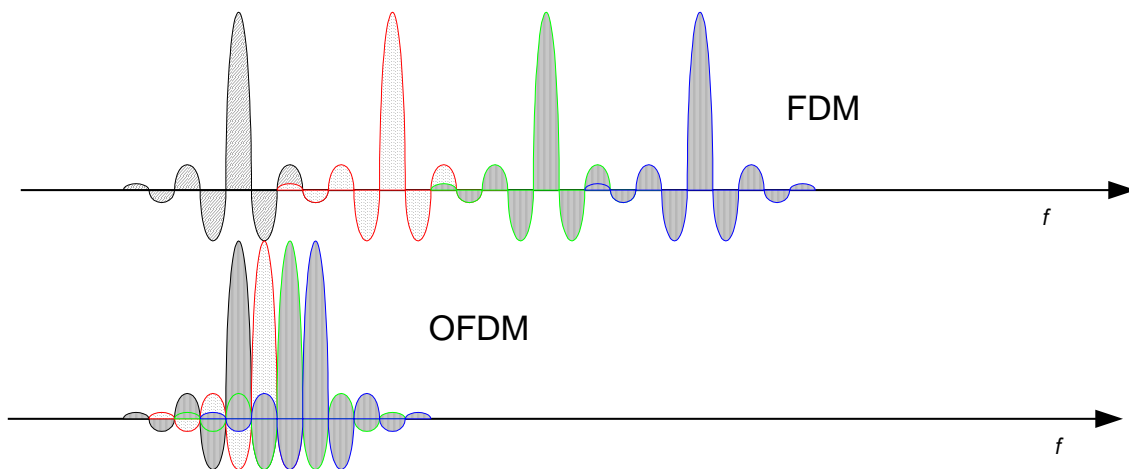
- jedan je pristup kada imamo skup različitih korisničkih signala  $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$  koji svi imaju jednaku brzinu  $R$  (mobilna),
- a drugi je pristup kada imamo samo jedan korisnički signal  $s_{uk}(t)$  visoke brzine  $R$ , te kada ga razdvajamo u  $n$  paralelnih sljedova (istog signala poput DVBTn), što se opet svodi na skup  $s_{uk}(t) = S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$ .

I jedan i drugi pristup u prijenosu ostvaruju primjenom OFDM-a stanovite pogodnosti.

Bilo koji signal  $s_i(t)$  moduliran dvofazno na neku nosivu frekvenciju imat će spektar kao što je to prikazano na slici 4.7.



Slika 4.7. Signal  $s_i(t)$  i njegov spektar nakon BPSK modulacije



Slika 4.8. Prijenos skupa signala  $\{s_1(t), s_2(t), s_3(t), s_4(t)\}$  primjenom klasične frekvencijske podjele među kanalima FDM i primjenom OFDM-a

Primjenom OFDM-a koristi se ortogonalni slijed frekvencija (koji je na primjer za radijski prijenos prebačen u viši opseg). Prva ortogonalna frekvencija imala bi periodu jednaku trajanju bita informacije. Trajanje bita informacije određeno je jednadžbom (4.11).

$$T = \frac{1}{R} \tag{4.11}$$

gdje je:

$R$  brzina slijeda  $s_i(t)$  izražena u bit/s.

Koristi se skup ortogonalnih frekvencija  $\{\sin(\alpha), \sin(2\alpha), \sin(3\alpha), \dots, \sin(n\alpha)\}$  za prijenos skupa signala  $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$  (4.12).

$$F(t) = \left\{ \sin\left(2\pi \frac{1}{T} t\right), \sin\left(2\pi \frac{2}{T} t\right), \sin\left(2\pi \frac{3}{T} t\right), \dots, \sin\left(2\pi \frac{n}{T} t\right) \right\}$$

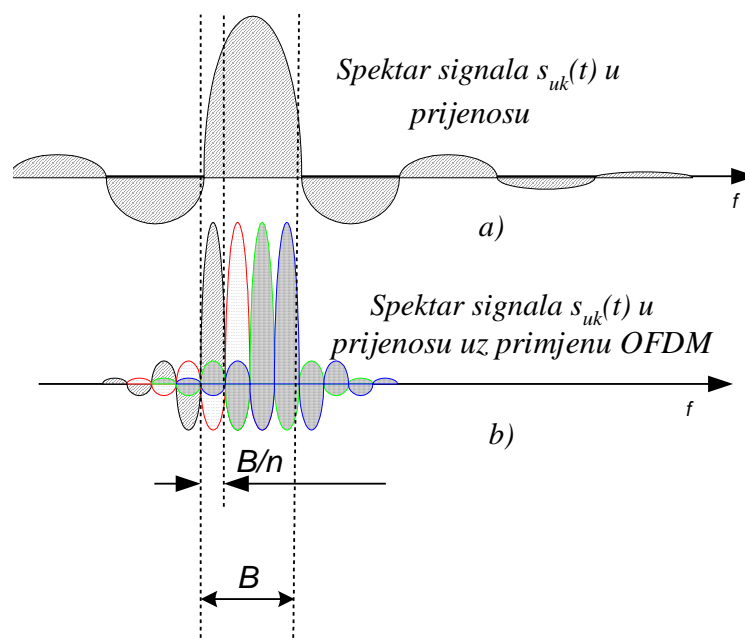
$$F(t) = \{ \sin(2\pi R t), \sin(2\pi 2R t), \sin(2\pi 3R t), \dots, \sin(2\pi n R t) \} \tag{4.12}$$

Međusobno su ortogonalne frekvencije razmaknute upravo za  $2B_{NQ}$  te se pri takvu prijenosu većeg broja signala može znatno uštedjeti na zaposjednutom dijelu RF spektra, kao što je vidljivo iz slike 4.8. No svi signali iz skupa  $S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$  moraju biti vremenski poravnani i jednakih osnovnih brzina  $R$ . Osim što smo uštedjeli na ukupnom frekvencijskom opsegu, koji sada iznosi  $B_{uk} = n \cdot B \approx n \cdot R$ , glavna prednost OFDM načina prijenosa očituje se u tome što za detektiranje svakog od pojedinih signala ne trebamo imati selektivni filter, već pojedini signal izdvajamo iz ukupnog matematičkim postupkom množenja s određenom sinusnom funkcijom i integracijom u vremenu trajanja bita.

### Prijenos jednog signala korištenjem OFDM načina prijenosa

Pri prijenosu jednog signala korištenjem OFDM-a **ukupni signal  $s_{uk}(t)$  dijelimo u  $n$  paralelnih tokova** (signala), što se svodi na skup  $s_{uk}(t) = S(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$ .

Ukupna širina spektra koju signal  $s_{uk}(t)$  zahtijeva za prienos kada se odvija po jednom nositelju jednaka je kao u slučaju kada se prienos odvija po više podnositelja, što je prikazano na slici 4.9.



Slika 4.9. Zaposjednuti spektar pri prijenosu signala s jednim nositeljem i s više podnositelja

Kada podijelimo ukupni tok signala  $s_{uk}(t)$  u  $n$  paralelnih tokova  $\{s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)\}$  čije su pojedinačne brzine  $R/n$ , u primjeni OFDM-a primjenjujemo ortogonalni skup sinusnih funkcija opisan u jednadžbi (4.12).

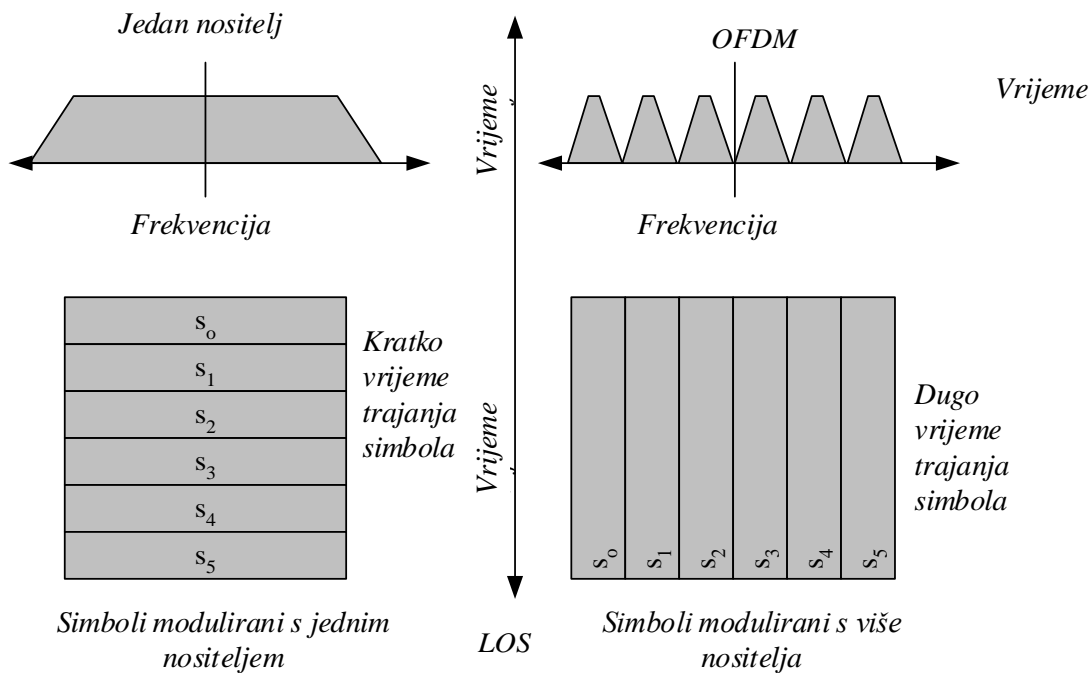
### OFDM tehnologija

Slanjem korisnog signala po većem broju ortogonalnih podnositelja smanjuje se brzina promjene informacije po jednom ortogonalnom nositelju te signal koji je došao izravnom stazom i signal koji je došao obilaznom stazom (zakašnjeli signal) nose isti bit informacije.

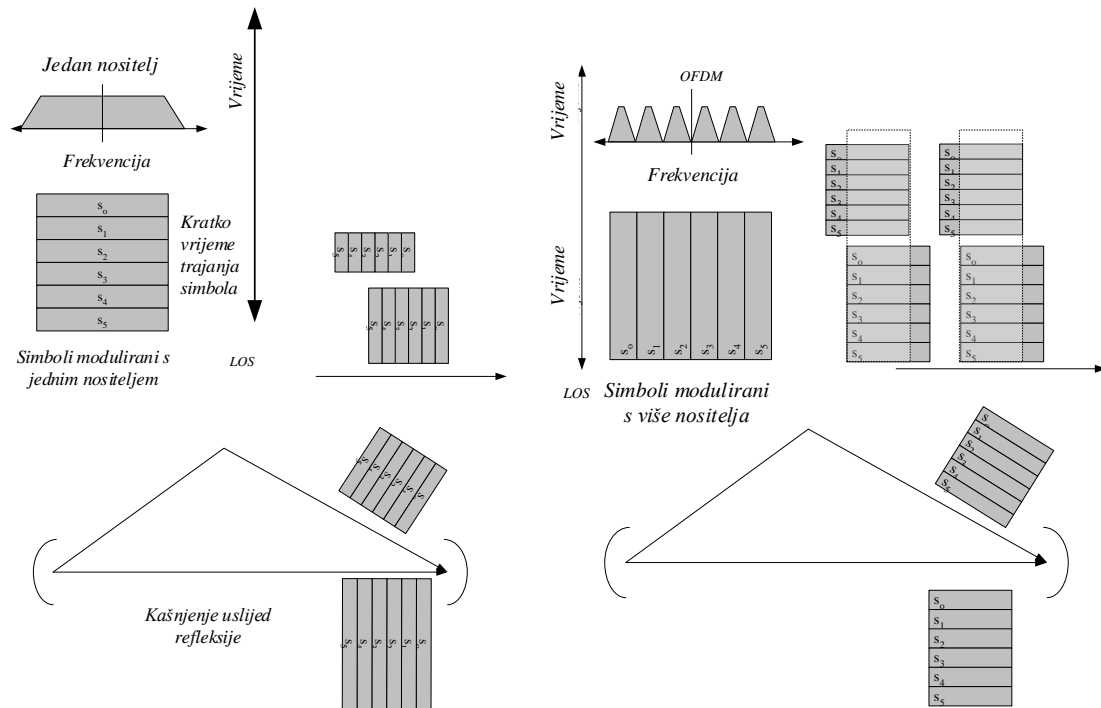
Na primjer, ako imamo tok bita brzine 1 Mbit/s i BPSK-om moduliramo tu informaciju na jedan lac, tada u zraku na svakih 300 m dolazi do promjene simbola informacije. Signal koji je prešao više od 300 m zbog višestrukog prostiranja na prijemu čini intersimboličnu interferenciju.

Ako signal od 1 Mbit/s u serijskom paralelnom konverteru pretvorimo u 1000 paralelnih tokova, tada je brzina svakog podslijeda 1 Kbit/s, što znači da se kod BPSK-a u zraku simbol mijenja svakih 300 km. Mala je vjerojatnost da bi signal koji bi prešao više od 300 km na prijemnoj anteni imao relevantnu snagu. Najčešće se radi o reflektiranim signalima koji su prešli znatno manji put. Međutim, da ni u trenutku izmjene simbola ne bi došlo do ometanja zbog višestrukog prostiranja, signal se ne emitira sve vrijeme koje je za njega predviđeno, već samo određeni postotak vremena, na primjer 75 %, a 25 % vremena ne emitira se ništa, pa tako u realnim uvjetima prostiranja ne može ni u kojem slučaju doći do intersimbolične interferencije. Period neemitiranja simbola naziva se zaštitni period i razlikuje se od sustava do sustava i od primjene do primjene.

Na slici 4.10. prikazan je prijenos s jednim nositeljem i prijenos s više podnositelja.







Slika 4.10. Prijenos jednim nositeljem i OFDM prijenos s više podnositelja te izbjegavanje intersimbolične interferencije pri primjeni OFDM tehnike

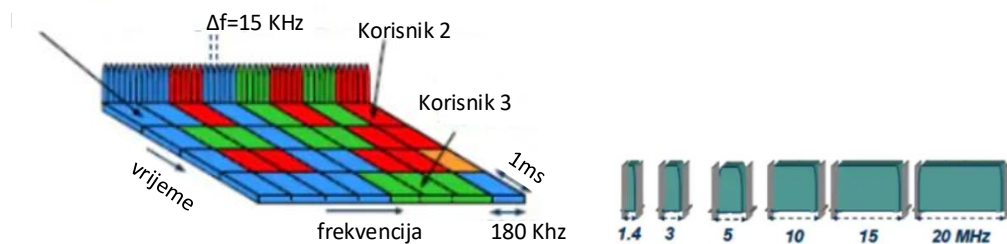
Primjena OFDM tehnike u digitalnom prijenosu kod DVBTn (digitalne televizije) omogućila je jednofrekvencijsku mrežu (*Single frequency network*). Dakle, kod SFN-a na određenom prostoru svi TV odašiljači koji odašilju TV programe (jedan radijski kanal ima više TV programa) koriste se istom frekvencijom za radijski kanal. Navedeno dovodi do znatne uštede u RF spektru namijenjenom za DVBT. Te uštede su omogućile da se područje od 800 MHz oslobodi za mobilne sustave 4G LTE (digitalna dividenda kod DVBT1) i područje od 700 MHz za mobilne sustave 5G (digitalna dividenda kod DVBT2).

#### 4.4. Zračno sučelje 4G LTE

Zračno sučelje kod mobilnih sustava 4G LTE koristi se OFDM-om koji je visoko otporan na pogreške koje nastaju zbog višestrukog prostiranja.

##### 4.4.1. Osnovne osobine LTE zračnog sučelja

**U silaznom smjeru** koristi se adaptabilni OFDM i OFDMA. Korisnički kanali uspostavljaju se po vremenu i frekvenciji prema potrebama korisnika, slika 4.11. Svaki podnositelj je definirane fiksne širine od 15 KHz. Takozvani radioblokovi  $RB_s$  koji se mogu kao minimalna količina (po frekvenciji) dati jednom korisniku širine su 180 KHz i sastoje se od 12 podnositelja ( $12 \times 15 \text{ KHz} = 180 \text{ KHz}$ ). Vremenska minimalna količina bloka  $RB_s$  koji se minimalno može dati jednom korisniku iznosi 0,5 ms i sastoji se od 7 OFDM simbola (stanja) [kod QPSK-a svako stanje opisuje 2 bita]. Unutar jednog  $RB_s$  imamo 12 podnositelja, a u vremenu od 0,5 ms svaki prenosi 7 OFDM simbola te uz primjenu QPSK-a u okviru jednog bloka imamo prijenos od 160 bita, što je sasvim dovoljno za prijenos jednog videotelefonskog kanala. Korisnici koji trebaju usluge koje su po informacijskom volumenu zahtjevnije dobit će na raspolaganje veći broj  $RB_s$  blokova (po frekvenciji), a oni korisnici čija komunikacija zahtijeva manje od 160 bita u 0,5 ms (320 Kbit/s) neće dobiti  $RB_s$  blokove jedan za drugim nego s razmakom od jednog do više slotova.



Slika 4.11. OFDM silazni smjer prijensa i predviđene širine radijskih kanala

Ovisno o frekvencijskoj širini radijskog kanala koji je namijenjen za 4G LTE komunikaciju širina tog kanala može biti različita te sadržavati veći ili manji broj podnositelja, kao što je to prikazano u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Frekvencijski opseg LTE radijskog kanala, broj podnositelja i broj blokova

Opseg kanala u MHz	1,4	3	5	10	15	20
<b>Broj zauzetih podnositelja uključujući i DC(N<sub>sc</sub>) (središnji podnositelj)</b>	<b>73</b>	<b>181</b>	<b>301</b>	<b>601</b>	<b>901</b>	<b>1201</b>
<b>FTT veličina</b>	<b>128</b>	<b>256</b>	<b>512</b>	<b>1024</b>	<b>1536</b>	<b>2048</b>
(Sampling Rate) Brzina uzorkovanja MHz	1,92 ½ 3,84	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
N of resource blocks (broj od RB <sub>s</sub> ). Broj blokova od 180 KHz (u vremenu od 0,5 ms)	6	15	25	50	75	100

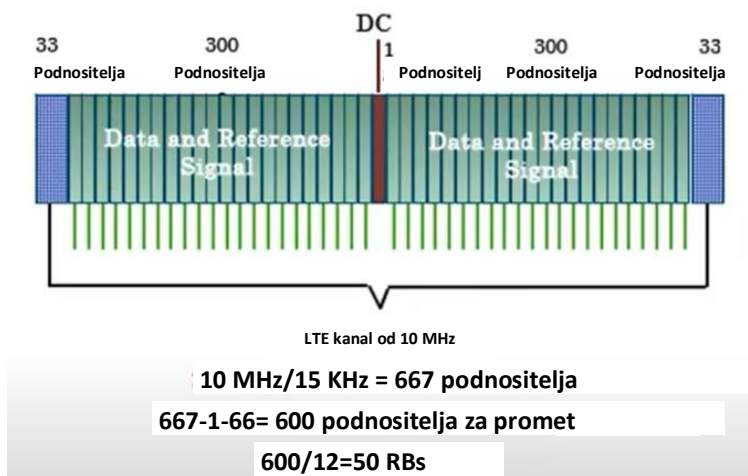
Δf – razmak između podnositelja:

15 KHz u normalnom slučaju

7,5 KHz u MBFSN prijensu.

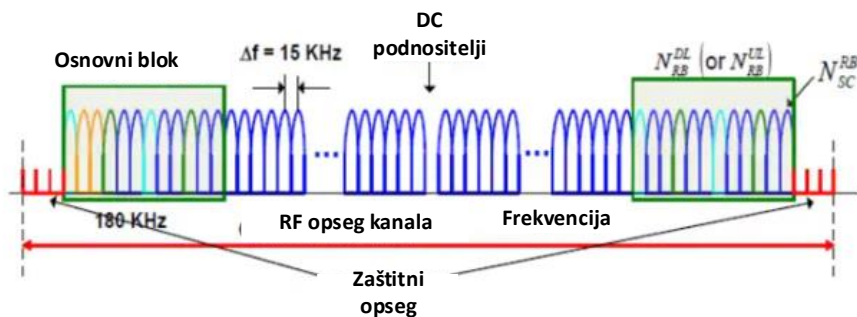
Pogledajmo primjer radijskog 4G LTE kanala od 10 MHz na slici 4.12.

Kanal od 10 MHz sastoji se od 667 podnositelja (10 MHz/15 KHz); sa svake strane opsega od 10 MHz nulovana su 33 podnositelja što čini zaštitni razmak od drugog radijskog kanala. (Kod podjele radijskih kanala među operatorima kanale možemo stavljati jedan do drugoga jer svaki na svojem kraju ima zaštitni opseg od 33 nulovana podnositelja ili 495 KHz, n. a.) Dakle preostaje 601 podnositelj. Od svih podnositelja jedan je u sredini pojasa, a 600 podnositelja ostaje na raspolaganju za prijenos. Podnositelji, njih 600, mogu se podijeliti u 12 RB<sub>s</sub> blokova.



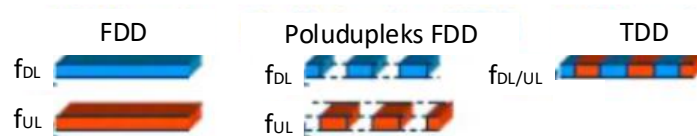
Slika 4.12. Primjer radijskog kanala 4G LTE frekvencijske širine od 10 MHz

Sasvim općenito frekventijski spektar i njegova raspodjela kod 4G LTE izgleda kao na slici 4.13.

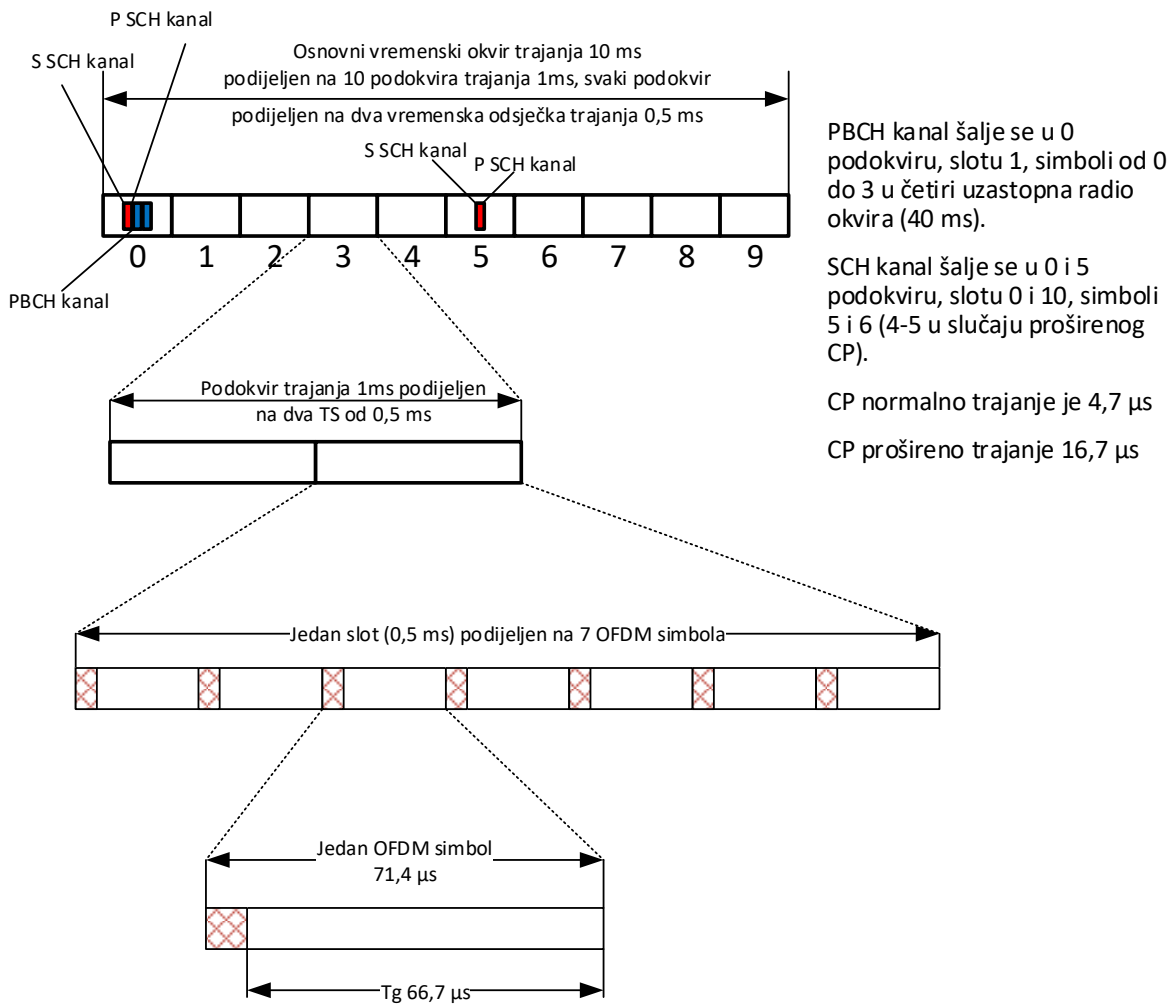


Slika 4.13. Predviđena širina radijskih kanala za 4G LTE sustave

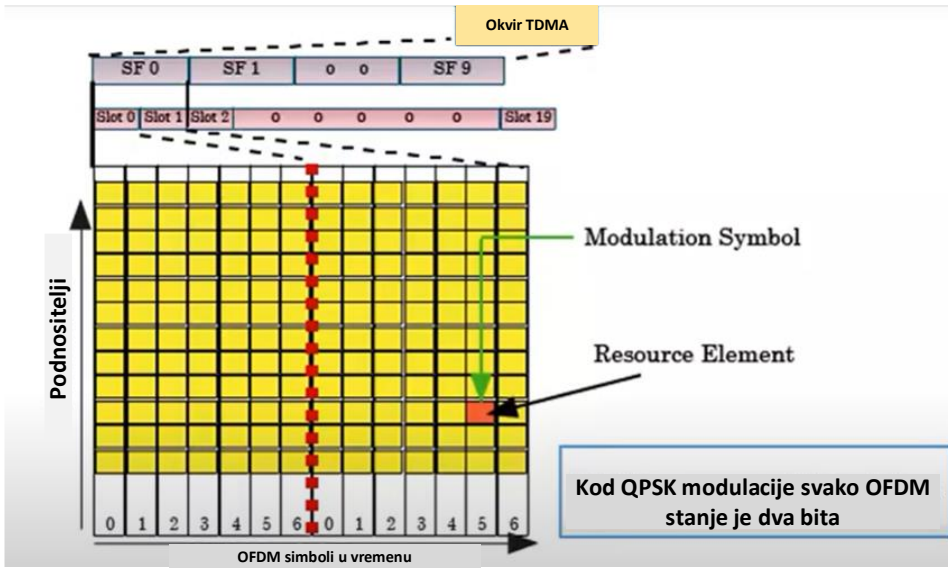
4G LTE sustavi predviđaju rad u frekventijskom dupleksu i poludupleksu te u vremenskom dupleksu (slika 4.14.). Međutim, bez obzira na to kako radi 4G sustav (FDD, poludupleks FDD, TDD) uvijek ima bazičnu vremensku strukturu TDMA okvira podijeljenu na deset (10) podokvira. Svaki podokvir traje 1 ms. Kod FDD načina rada svaki se podokvir dijeli na dva odsječka (*Time Slot*). Svaki vremenski odsječak traje 0,5 ms i nosi u sebi 7 OFDM simbola. **Generalna vremenska struktura FDD okvira kod 4G LTE** prikazana je na slici 4.15.



Slika 4.14. FDD, poludupleksni FDD i TDD način rada kod 4G LTE sustava

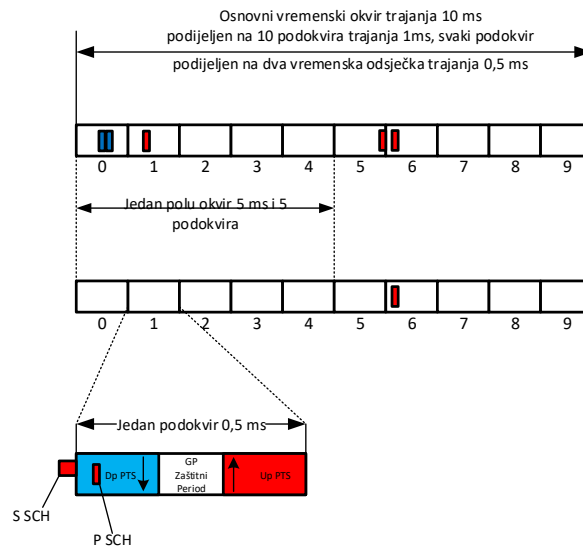


Slika 4.15. Generalna vremenska struktura FDD okvira kod 4G LTE sustava



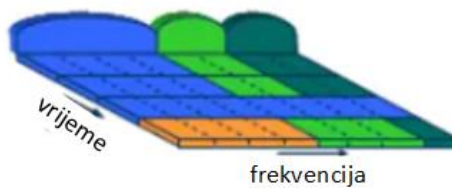
Slika 4.16. Vremenska dinamika popunjavanja OFDM simbola u TDMA okviru s odgovarajućim brojem podnositelja

Jedna od mogućih organizacija rada u TDD-u prikazana je na slici 4.17. Za rad u vremenskom dupleksu (TDD) 4G sustav može ostvariti nekoliko vremenskih struktura, a razlike među njima ovise o različitosti struktura raspodjele informacijskog volumena za uzlazni i za silazni smjer prijenosa.



Slika 4.17. Jedna od mogućih organizacija rada u TDD-u

**U uzlaznom smjeru** koristi se SC-FDMA s dinamičkim zaposjedanjem opsega (prekodirani OFDM), a odlikuje se niskom potrošnjom energije. U uzlaznom smjeru interferencija je ograničena. Uzlazni link prikazan je na slici 4.18.

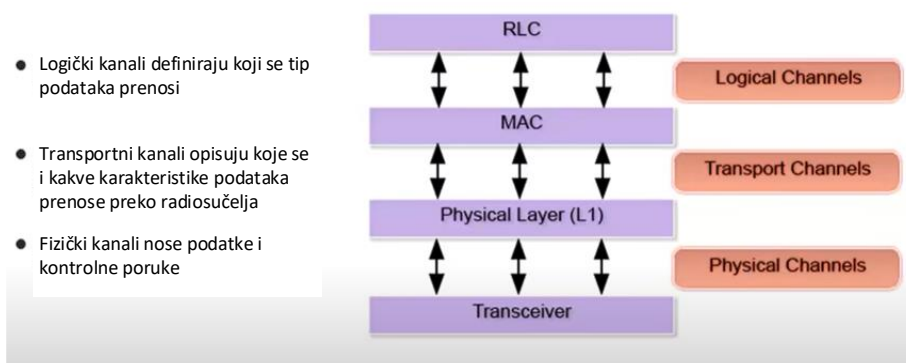


Slika 4.18. Uzlazni smjer prijenosa

Sustav također predviđa u budućnosti **korištenje MIMO antena**.

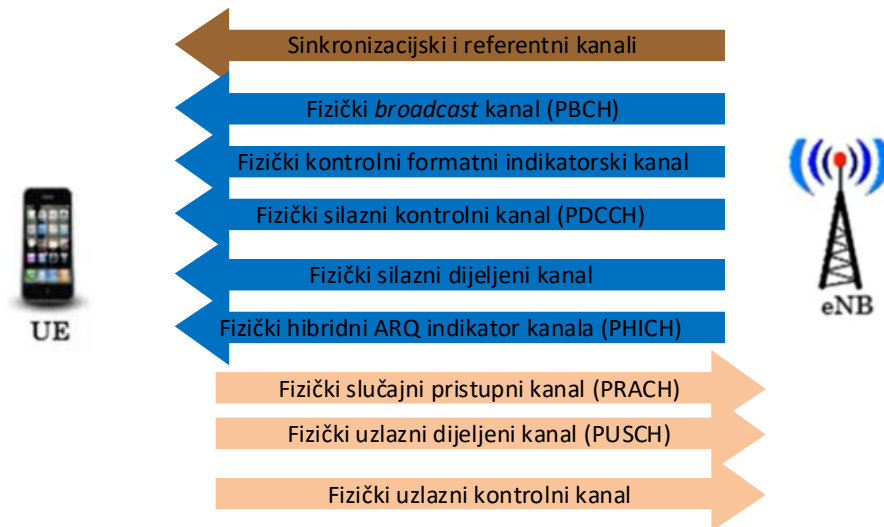
#### 4G LTE kanali

LTE kanale općenito dijelimo u **logičke, transportne i fizičke**, kao što je to prikazano na slici 4.19.



Slika 4.19. Podjela kanala na logičke, transportne i fizičke

### Fizička razina 4G LTE kanala



Slika 4.20. Fizička raspodjela kanala 4G LTE sustava

#### Fizički silazni kanali

**Fizički *broadcast* kanal PBCH** koristi se za prijenos *broadcast* kanala (informacija), šalje se u silaznom smjeru u svakom okviru u podnositelju glavnog informacijskog bloka.

**Fizički kontrolni formatni indikatorski kanal PCFICH** šalje se u jednom podokviru i indikaciji PDCCH simbola.

**Fizički silazni kontrolni kanal PDCCH** šalje se na početku svakog podokvira i označava PDSCH/PUSCH.

**Silazni dijeljeni kanal PDSCH** šalje se u jednom podokviru i na jednom podnositelju, a sadrži sve silazne informacije u vezi s održavanjem prometa i dijeli se između svih korisnika u ćeliji.

**Fizički hibridni ARQ indikator kanala (PHICH)** obavještava korisnika je li uzlazni promet (promet koji je korisnik poslao) uspješno primljen i dekodiran.

#### Fizički uzlazni kanali

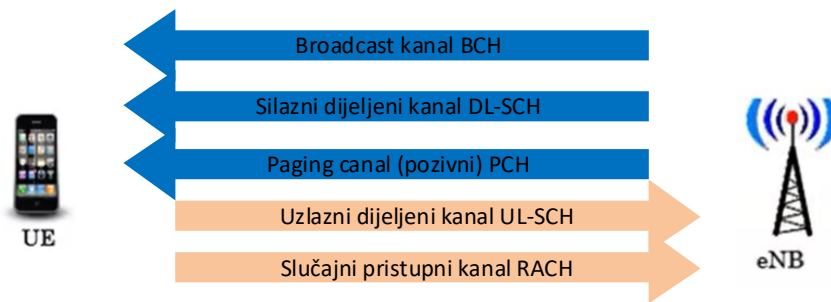
**Fizički slučajni pristupni kanal (PRACH).** Koristi se za sinkronizaciju mobilne postaje (UE – *user equipment*) u uzlaznom linku, šalje se najmanje jednom u svakom drugom okviru u trajanju od jednog podokvira.

**Fizički uzlazni dijeljeni kanal (PUSCH).** Koristi se za promet i signalizaciju u uzlaznom linku. PDCCH kontrolira tko je poslao podatke i kada.

**Fizički uzlazni kontrolni kanal (PUCCH).** Upotrebljava ga mobilna postaja (UE) da pošalje informacije na baznu postaju eNodeB, sadrži zahtjev za zaposjedanjem informacija, volumena, HARQACK/NACK za silazni smjer podataka i kontrolu kvalitete primljene informacije od mobilne postaje.

### 4G LTE transportni kanali

Na slici 4.21. prikazani su transportni kanali kod 4G LTE sustava.



Slika 4.21. Transportni kanali kod 4G LTE sustava

### Transportni silazni kanali

**BCH silazni transportni kanal**, često označavan kao *broadcast* kontrolni kanal BCCH, daje osnovne informacije o sustavu korisnicima u ćeliji.

**DL SCH** kanal se koristi za prijenos podataka u silaznom smjeru.

**PCH kanal** prenosi informaciju o kontroli poziva u silaznom smjeru.

### Transportni uzlazni kanali

**UL-SCH** kanal se koristi za prijenos podataka u uzlaznom smjeru.

**RACH** kanal služi za slanje poziva u uzlaznom smjeru.

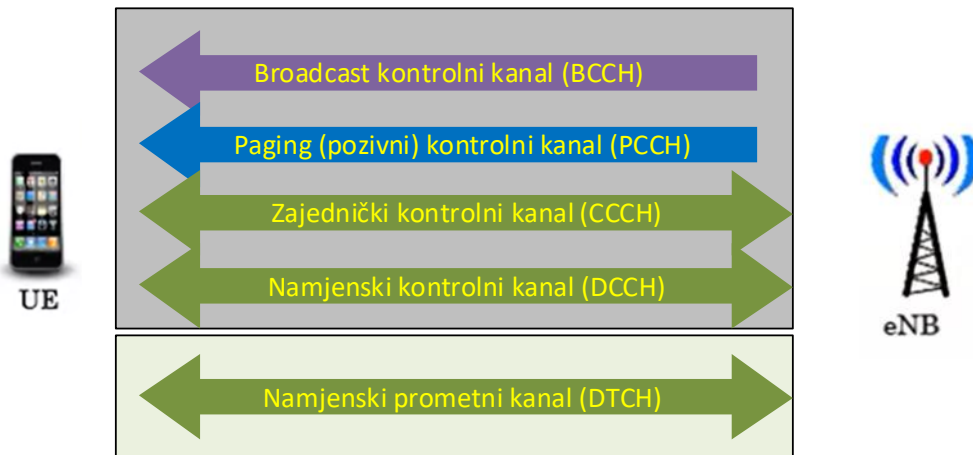
### 4G LTE logički kanali

Na logičkoj razini svi kanali dijele se samo na dvije vrste: na kontrolne (signalizacijske) i prometne kanale. Podjela na logičkoj razini među kanalima prikazana je na slici 4.22.



Slika 4.22. Podjela kanala na logičkoj razini

Na logičkoj razini kontrolni (signalizacijski) kanali dijele se samo u četiri osnovna tipa kanala, dva za silazni smjer (BCCH i PCCH) i dva dvosmjerna (CCCH i DCCH), a od prometnih kanala postoji samo jedan dvosmjerni (DTCH) koji je namijenjen prometu, što nam prikazuje slika 4.23.



Slika 4.23. Detaljan prikaz osnovne logičke podjele kanala

**BCCH** je silazni kontrolni kanal koji se koristi za razaslanje sistemskih kontrolnih informacija.

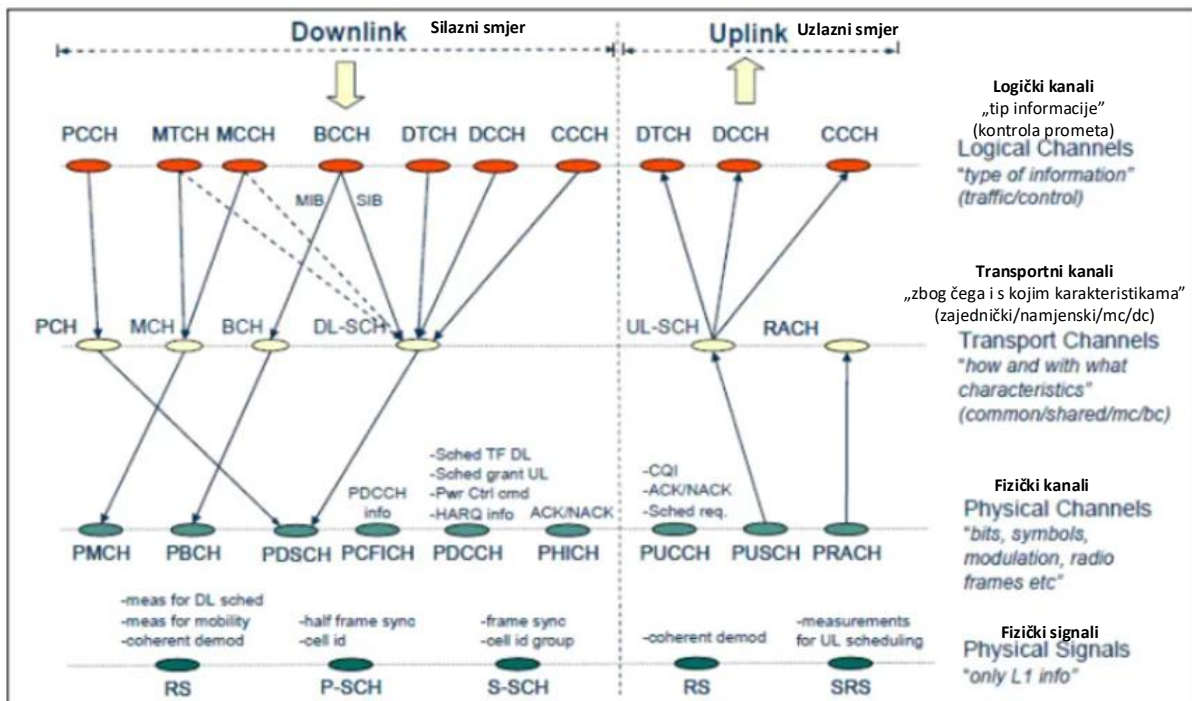
**PCCH** je silazni kontrolni kanal koji se koristi za slanje poziva prema UE-u (mobilnom uređaju) odnosno za traženje UE-a u mreži (ćeliji).

**CCCH** je dvosmjerni kanal koji se koristi za prijenos pristupnih informacija.

**DCCH** je dvosmjerni kanal točka-točka (sustav-mobilna postaja) koji se koristi za prijenos specifičnih kontrolnih informacija namijenjenih točno određenom korisniku.

*Organizacija kanala kod 4G LTE sustava na logičku, transportnu i fizičku razinu*

Organizacija kanala prema smjerovima prijenosa te prema logičkoj, transportnoj i fizičkoj razini prikazana je na slici 4.24.



Slika 4.24. Organizacija kanala prema smjerovima prijenosa te prema logičkoj, transportnoj i fizičkoj razini



## 5. 5G sustavi

ITU je definirao standardom IMT-2020 specifikacije koje 5G mreže moraju zadovoljavati u svojem radu i primjeni.

- Maksimalna brzina prijenosa podataka: 10 – 20 Gbit/s
- Vršna spektralna učinkovitost: 10 – 30 bit/s/Hz
- Korisnička brzina prijenosa podataka: 50 – 100 Mbit/s
- Kašnjenje manje od 1 ms
- Gustoća veze: 1,000,000 uređaja po km<sup>2</sup>
- Raspoloživost mreže 99,999 %
- Gotovo 100 % pokrivenost
- Trajanje baterije IoT uređaja do 10 godina.

5G tehnologija iako je već u primjeni još uvijek nije u cijelosti razvijena na način da bi mogla zadovoljiti sve gore navedene zahtjeve. Dakle, još se mogu očekivati nadopune postojećih rješenja.

Tehnološke podskupine koje obuhvaćaju gore navedene uvjete mogle bi se uvjetno podijeliti na:

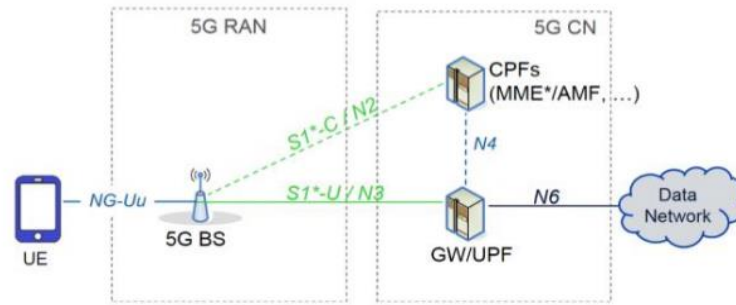
1. poboljšanu mobilnu širokopoljasnu mrežu (*Enhanced Mobile Broadband, eMBB*)
2. masivne komunikacije strojeva (*Massive Machine Type Communications, mMTC*) i
3. visoko pouzdane komunikacije s malim kašnjenjem (*Ultra – Reliable and Low – Latency Communications, URLLC*).

Prva tehnološka podskupina treba omogućiti veću propusnost i veću brzinu prijenosa podataka **upotrebom više frekvencijskih pojasova**.

Druga tehnološka skupina **odnosi se na IoT**. Tu postoji čitav niz izazova, a jedan od najzanimljivijih jest samovozeći automobil i čitava infrastruktura koja bi trebala komunikacijski podržati ova rješenja koja se sva ne odnose na 5G mreže, ali na njihov rad postavljaju zahtjeve.

Treća tehnološka skupina orijentirana je na zadovoljenje postavljenih zahtjeva za rješenjima koja podržava 5G mreža. Upravo iz nastojanja rješenja problema samovozećih automobila proizlazi zahtjev za **niskim kašnjenjem signala (do 1 ms)**.

## 5.1. Arhitektura sustava 5G, frekventni opsezi i načini rada



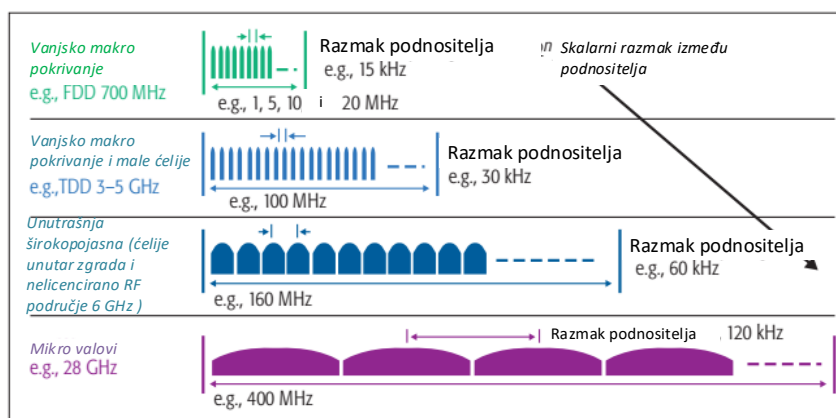
Slika 5.1. Arhitektura 5G mreže

Osnovna arhitektura 5G mreža koje se danas nalaze u primjeni ili ulaze u primjenu prikazana je na slici 5.1. U središnjem dijelu mreže S-GW i PDN-GW ujedinjeni su u jedinstveni čvor. Sjedinjavanje je napravljeno kako bi se kašnjenje signala u njegovu procesiranju kroz 5G mrežu smanjilo na minimum. U radiomreži napravljene su izmjene u odnosu na 4G koje ćemo u nastavku detaljno objasniti. Za sada recimo da je kod 4G mreža korišten OFDM kod kojeg je razmak između centralne frekvencije podnositelja bio fiksni i iznosio je 15 KHz, a kod 5G razmak može biti promjenjiv 15, 30, 60 KHz i tako dalje do vrijednosti 240 KHz, kako nam je to prikazano u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Osnovne karakteristike zračnog sučelja u silaznom smjeru OFDM-a

Razmak između podnositelja	15 KHz	30 KHz (2x15 KHz)	60 KHz (4x15 KHz)	15x2n KHz (n=3, 4, ...)
Trajanje OFDM simbola	66,67 $\mu$ s	33,33 $\mu$ s	16,67 $\mu$ s	66,67/2 <sup>n</sup> $\mu$ s
Trajanje cikličkog prefiksa (CP)	4,69 $\mu$ s	2,34 $\mu$ s	1,17 $\mu$ s	4,69/2 <sup>n</sup> $\mu$ s
OPDM simbol uključujući CP	71,35 $\mu$ s	35,68 $\mu$ s	17,84 $\mu$ s	71,35/2 <sup>n</sup> $\mu$ s
Broj OFDM simbola po slotu	14	14	12 ili 14	14
Trajanje slotu	1000 $\mu$ s	500 $\mu$ s	250 $\mu$ s	1000/2 <sup>n</sup> $\mu$ s

Kakav će se razmak podnositelja koristiti ovisi o širini radijskog kanala, ali i o RF području, kao i o svrsi u koju će se 5G sustavi koristiti. (Kada govorimo o području korištenja 5G mreža, u mikrovalnom području za EU predviđaju se frekvencije oko 26 GHz, n. a.)



Slika 5.2. Primjer korištenja različitih frekventijskih opsega i različitih razmaka podnositelja u njima

Za područje EU-a za sada se predviđa za 5G korištenje triju pojasa:

1. **700 MHz** područje. Ovo područje se oslobađa prelaskom digitalne televizije s DVBT1 na DVBT2 standard emitiranja. U Republici Hrvatskoj ta je tranzicija završena krajem 2020. godine. U ovom području 5G će raditi u frekvencijskom dupleksu (**FDD**) i koristiti će se za ostvarivanje pretplatničkih usluga u ćelijama koje će imati široko pokrivanje.
2. **3,4 do 3,8 GHz** područje. U ovom području tijekom 2020. godine vršilo se je eksperimentalno emitiranje u Republici Hrvatskoj. Uglavnom su se koristile bazne postaje koje su upotrebljavale radijski kanal širine 80 MHz s centralnom frekvencijom RF opsega 3,460 GHz. Čitavo ovo područje nije još u uporabi jer je u dvjema županijama na sjeveru Hrvatske dio ovog područja zauzet sustavima WiMAX za fiksni bežični pristup. U ovom području, kao i u svim ostalim višim RF opsezima, predviđen je rad u vremenskom dupleksu (**TDD**). U ovom području predviđaju se vanjske ćelije za makro pokrivanje (iako ove ćelije mogu biti znatno manje nego ćelije na 700 MHz području), ali i za male ćelije, a vjerojatno će se pojaviti i rješenja za *indor* propagaciju na ovom RF području. U ovom području postoji mala varijacija oko odabranih frekvencija između pojedinih EU zemalja.
3. **26 GHz** područje. U ovom području sustavi će također raditi u vremenskom dupleksu (TDD). Postoji stanovita raznolikost između EU država oko korištenja frekvencija, a kako je to predviđeno prikazano je u tablici 5.2. Za sada u ovom području nema sustava 5G u radu, a koristilo bi se u budućnosti u *indor* propagaciji kako bi se pokrile velike sale sveučilišta, sportske dvorane, kazališta i druge javne ustanove gdje se očekuje velik broj ljudi.

Tablica 5.2. Predviđena RF područja za rad 5G sustava u pojedinim zemljama u 3,5 i 26 GHz području

Država	Frekventni opseg 3,5 GHz TDD mod rada	Frekventni opseg 26 GHz TDD mod rada
Finska	3,4 – 3,8 GHz	26,5 – 27,5 GHz
Francuska	3,46 – 3,8 GHz	26 GHz
Njemačka	3,4 – 3,8 GHz	26 – 27,5 GHz
Irska	3,4 – 3,8 GHz	26 GHz
Italija	3,6 – 3,8 GHz	26,5 – 27,5 GHz
Rusija	3,4 – 3,8 GHz	26 GHz
Španjolska	3,4 – 3,8 GHz	26,5 – 27,5 GHz
Velika Britanija	3,4 – 3,6 GHz, 3,6 – 3,8 GHz (u 2019.)	26,5 – 27,5 GHz

## 5.2. 5G MREŽA U HRVATSKOJ

Operatori mreža pokretnih komunikacija implementirali su 5G tehnologiju u RH upotrebom dinamičkog dijeljenja spektra (*Dynamic Spectrum Sharing – DSS*). DSS omogućuje operatorima da upotrebljavaju isti radiofrekvencijski spektar, odnosno isti frekvencijski nositelj za pružanje 5G i 4G (LTE) usluga. Dijeljenje resursa između 4G i 5G tehnologije ovisi o prometnim potrebama korisnika za pojedinom tehnologijom na određenom području gdje se resursi dinamički raspoređuju tijekom vremena.

DSS omogućuje pokrivanje 5G signalom korištenjem postojećeg „4G“ spektra i postojeće radijske opreme i lokacija, bez investiranja u novu 5G infrastrukturu. Na taj se način 5G usluga može brzo i efikasno uspostaviti, bez potrebe za dodjelom novog spektra. **Za pružanje 5G usluga dovoljna je**

**softverska nadogradnja postojećih baznih postaja 4G**, čime se omogućuje efikasnija uporaba spektra dodijeljenog operatorima.

S obzirom na to da se u RH radiofrekvencijski spektar primarno namijenjen za 5G planira dodijeliti tijekom prve polovice 2021., uporaba DSS-a čini 5G tehnologiju dostupnom krajnjim korisnicima i prije te dodjele. Uporaba DSS-a u klasičnim 4G pojasovima pridonijet će bržoj implementaciji 5G tehnologije. Podatci o baznim postajama koje su u komercijalnom radu javno su dostupni u sklopu HAKOM-ova GIS portala, u okviru tematskog preglednika „Radijske postaje“.

Izmjenom planova dodjele za radiofrekvencijske pojase **800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz i 2600 MHz (NN br. 110/20)** u tim je pojasovima dopuštena uporaba i 5G tehnologije te posljedično i uporaba DSS-a. Implementacija DSS tehnologije, kao i odabir pojasova u kojima će se ona odviti, ovisi o poslovnim planovima pojedinog operatora.

HACOM je 7. srpnja 2021. godine objavio dokument pod nazivom „Javna dražba za dodjelu prava uporabe radiofrekvencijskog spektra u frekvencijskim pojasevima 700 MHz, 3600 MHz i 26 GHz Dražbovna dokumentacija“ [3].

Na osmoj stranici tog dokumenta govori se o predmetu javne dražbe, to jest o ponuđenom radiofrekvencijskom spektru, kao što je to prikazano u tablici 5.3.

Tablica 5.3. Frekvencijski pojasevi u postupku javne dražbe za 5G sustave

Frekvencijski pojas	Donji pojas (FDD) [MHz]	Gornji pojas (FDD) [MHz]	Neupareni pojas (TDD) [MHz]
<b>700 MHz</b>	703-733	758-788	
<b>3600 MHz</b>			3400-3800
<b>26 GHz</b>			26500-27500

#### Frekvencijski pojas 700 MHz

Frekvencijski pojas 700 MHz jedan je od temeljnih frekvencijskih pojasova u kojem će se uvoditi 5G tehnologija. Ovim postupkom javne dražbe u frekvencijskom pojasu 700 MHz dodjeljuju se tri **uparena frekvencijska bloka, svaki ukupne širine 20 MHz (2 x 10 MHz)**, na nacionalnoj razini. Upareni blokovi upućuju na FDD način rada.

Grafički prikaz ponuđenih blokova u 700 MHz području prikazan je na slici 5.3.

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

Slika 5.3. Ponuđeni RF spektar u RH u 700 MHz području, podijeljen u tri uparena bloka od 10 MHz

#### Frekvencijski pojas 3600 MHz

Frekvencijski pojas 3600 MHz jest frekvencijski pojas s nepovoljnijim propagacijskim karakteristikama u odnosu na frekvencijske pojaseve kojima se operatori pokretnih komunikacija trenutačno koriste u

RH (800 MHz do 2600 MHz). S druge strane, ovaj frekvencijski pojas može osigurati operatorima dovoljnu količinu RF spektra koja omogućuje veliku propusnost i kapacitet potreban za podršku velikog broja povezanih uređaja, a time i osigurati najbržu implementaciju 5G tehnologije.

U ovom frekvencijskom pojasu dopuštena je uporaba vremenskog dupleksa (TDD), a predviđena je dodjela radiofrekvencijskog spektra u višekratnicima bloka frekvencija širine 10 MHz poravnanih od donjeg ruba pojasa na 3400 MHz do gornjeg ruba pojasa na 3800 MHz.

HAKOM će za frekvencijski pojas 3600 MHz provesti dva odvojena nadmetanja:

- jedno za frekvencijske blokove na nacionalnoj razini, a
- drugo za frekvencijske blokove na regionalnoj (županijskoj) razini.

Na regionalnoj (županijskoj) razini nadmetanje će biti provedeno za sedam frekvencijskih blokova u pojasu od 3410 do 3480 MHz, a blok 3400 – 3410 MHz nakon faze dodjele dodijelit će se odabranom ponuđaču za frekvencijski blok 3410 – 3420 MHz bez dodatne naknade. Uporaba frekvencijskog bloka 3400 – 3410 MHz dopuštena je uz dodatna ograničenja propisana Planom dodjele za frekvencijski pojas 3400 – 3800 MHz. Na nacionalnoj razini nadmetanje će biti provedeno za 32 frekvencijska bloka u pojasu od 3480 do 3800 MHz (slika 5.4.).

Regionalna (županijska) razina								Nacionalna razina											
3400-3410	3410-3420	3420-3430	3430-3440	3440-3450	3450-3460	3460-3470	3470-3480	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	

Slika 5.4. Raspodjela RF blokova u RF području od 3,4 do 3,8 GHz za rad 5G mreža

#### Frekvencijski pojas 26 GHz

Frekvencijski pojas 26 GHz može omogućiti implementaciju višestruko širih kontinuiranih frekvencijskih blokova, a time i pružanje usluge vrlo visokog kapaciteta i vrlo niskog kašnjenja (latencije) za razliku od frekvencijskih pojasa ispod 6 GHz. S druge strane, s obzirom na propagacijsko slabljenje signala u ovom frekvencijskom pojasu, **izgradnja mreže rezultirat će implementacijom pristupnih točaka kratkog dometa i njihovim postavljanjem na uličnu infrastrukturu i bočne zidove zgrada.**

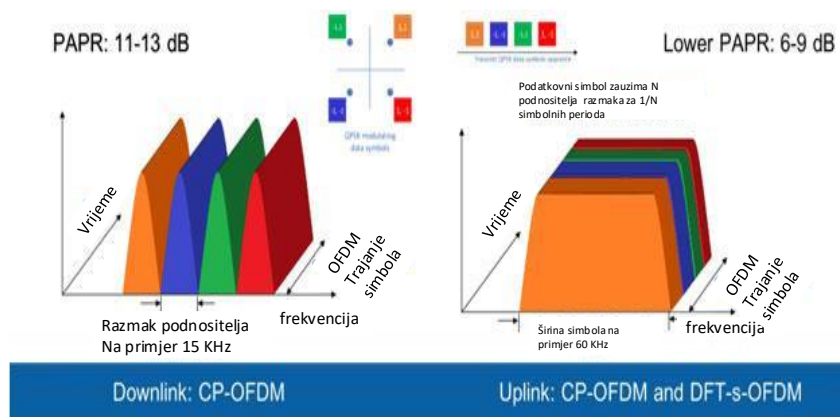
U ovom frekvencijskom pojasu dopuštena je uporaba vremenskog dupleksa (TDD), a radiofrekvencijski spektar dodjeljivat će se **na nacionalnoj razini u višekratnicima bloka frekvencija širine 200 MHz** poravnanih od donjeg ruba pojasa na 26 500 MHz do gornjeg ruba pojasa na 27 500 MHz. Nadmetanje će biti provedeno za pet frekvencijskih blokova širine 200 MHz. Raspodjela blokova u 26 GHz području prikazana je na slici 5.5.

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

Slika 5.5. Raspodjela RF blokova u RF području od 26 GHz za rad 5G mreža

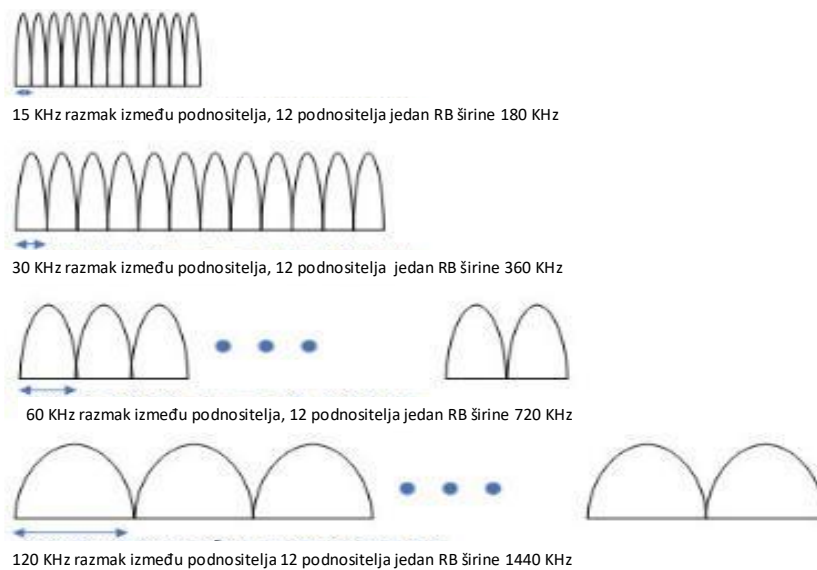
### 5.3. 5G NR modulacijska shema

Modulacijska shema koja se koristi kod 5G sustava slična je modulacijskoj shemi koja se koristi kod 4G LTE, a u slučaju kanala širine 10 MHz modulacijska shema može čak biti istovjetna između 5G i 4G LTE sustava. Međutim, ako se koristi kanal od 20 MHz, broj podnositelja bit će isti (600 za prijenos informacija) kao i kod kanala od 20 MHz jer je razmak između podnositelja dvostruko veći (30 KHz). Širi podnositelj znači i prijenos veće količine informacija. Modulacija svakog podnositelja kod 5G NR mreža može biti QPSK, 16 QAM, 64 QAM, što je slično kao i kod 4G LTE mreža. U silaznom smjeru (*downlink*), kao i kod 4G LTE mreža, u 5G NR mrežama koristi se CP-OFDM, gdje CP znači ciklički prefiks, a CP nastupa u slotu prije OFDM simbola i služi kako bi se spriječila intersimbolarna interferencija koja bi mogla nastati zbog višestrukog prostiranja. U uzlaznom smjeru (*uplink*) koristi se CP-OFDM + DFT-s-OFDM, što je prikazano na slici 5.8.



Slika 5.6. Modulacijska shema za 5G NR mreže, silazni i uzlazni smjer prijenosa

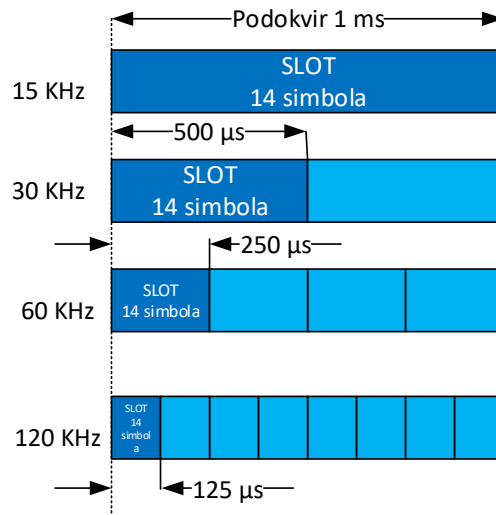
Na slici 5.7. prikazane su promjenjiva širina podnositelja i širina RB bloka.



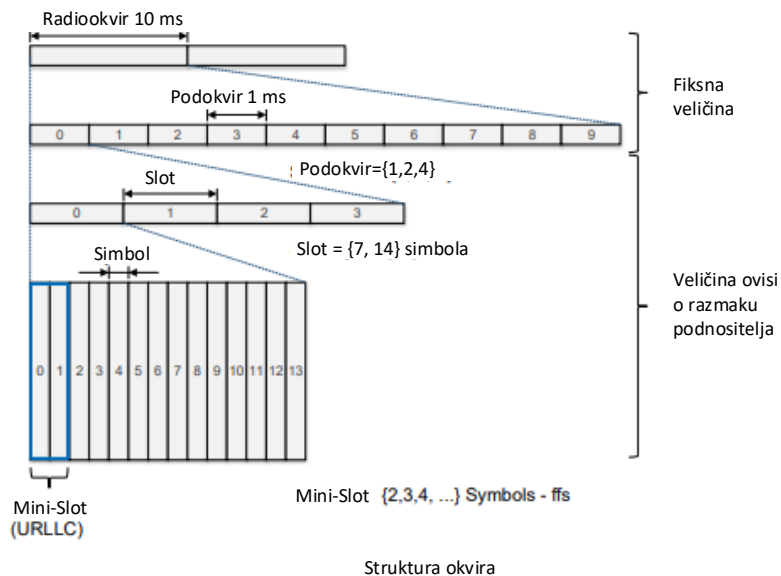
Slika 5.7. Promjena širine podnositelja kod 5G NR mreža

## Struktura vremenskog okvira kod 5G NR mreža

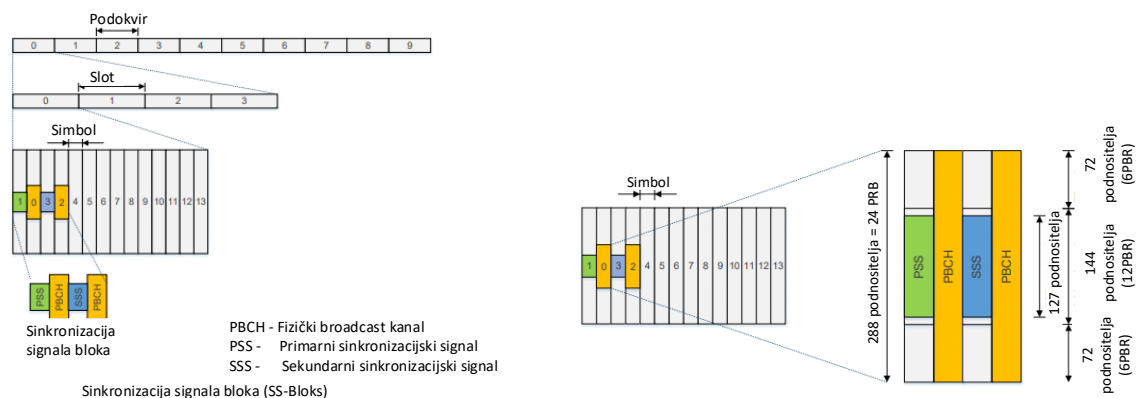
Osnovni vremenski TDMA okvir kod 5G NR mreža traje 10 ms i dijeli se na deset podokvira kao i kod 4G LTE mreža. Međutim, koliko će podokvir imati slotova ovisi o širini radijskog kanala. Svaki slot ima 14 OFDM simbola. Navedeno je prikazano na slici 5.8. Ukupna struktura okvira prikazana je na slici 5.9.



Slika 5.8. Struktura vremenskog podokvira 5G NR mreže u ovisnosti o širini radijskog kanala



Slika 5.9. Struktura okvira kod 5G NR sustava



Slika 5.10. Sinkronizacija signalnog bloka

## 5.4. Usporedba 4G LTE i 5G NR sustava

Usporedba osnovnih karakteristika između 4G LTE i 5G NR sustava prikazana je u tablici 5.4.

Tablica 5.4. Usporedba osnovnih karakteristika 4G LTE i 5G NR sustava

	4G LTE	5G NR
Maksimalna širina kanala	20 MHz	50 MHz (@15 KHz), 100 MHz (@30 KHz), 200 MHz (@60 KHz), 200 MHz (@120 KHz)
Razmak podnositelja	15 KHz	2 <sup>n</sup> x 15 KHz za TDD i FDD mod rada
Maksimalni broj podnositelja	1200	3300
Valna forma	CP-OFDM za DL, SC-FDMA za UL	CP-OFDM za DL, CP-FDMA i DFT-s-OFDM za UL
Vremensko trajanje podokvira	1 ms (podijeljen na 2 TS od 0,5 ms)	1 ms
Kašnjenje u zračnom sučelju	0,5 ms	0,5 ms
Vremenska dužina TS	7 OFDM simbola svakih 500 μs	14 simbola (trajanje ovisi o broju podnositelja) 2, 4 i 7 simbola za mini slot
Kodiranje u kanalu	Turbo kod (podatci prometa); TBCC (podatci kontrole – signalizacije)	Polar kod (kontrola – signalizacija); LDPC (podatci)
Inicijalni pristup	PVS <sup>1</sup> Formiranje laticе u digitalnoj domeni	Formiranje laticе
MIMO	8 x 8	8 x 8
Dupleks	FDD, poludupleks FDD, polustatički TDD, dinamički TDD	FDD, poludupleks FDD, polustatički TDD, dinamički TDD



## 6. Utjecaj EMZ-a na ljudsko zdravlje

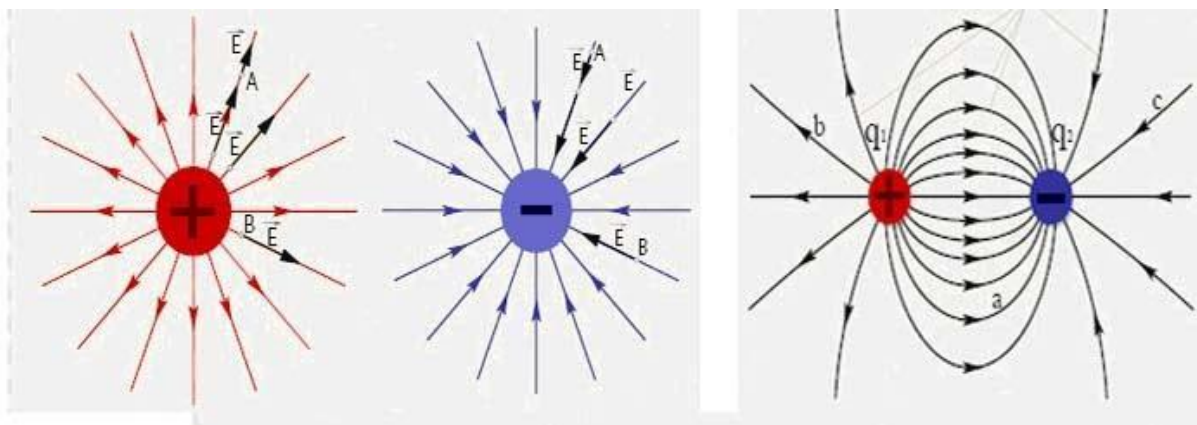
Kada se govori o uvođenju novih generacija mobilnih komunikacijskih sustava, kod ljudi se javlja strah i neizvjesnost od možebitnog štetnog utjecaja elektromagnetskih valova koje zrače mobilni sustavi tijekom svojeg rada. Moramo stoga odgovoriti na sljedeća pitanja:

- Što su to elektromagnetski valovi i kako nastaju?
- Kakav je utjecaj elektromagnetskih valova na ljudsko zdravlje?
- Koje su norme za zaštitu pučanstva od elektromagnetskih zračenja?
- Koja tijela donose te norme i na osnovi kojih se znanstvenih spoznaja one postavljaju?

### 6.1. Što su to elektromagnetski valovi

#### Električno polje

Električna polja nastaju zbog razlika električnog potencijala ili napona: što je napon veći, električno polje je jače.



Slika 6.1. Električno polje koje se formira oko naboja (nabijene čestice) i razlika potencijala među nabijenim česticama

#### Magnetsko polje

Magnetska polja nastaju oko naboja koji se giba (električna struja). Što je veća struja, to je magnetsko polje jače.



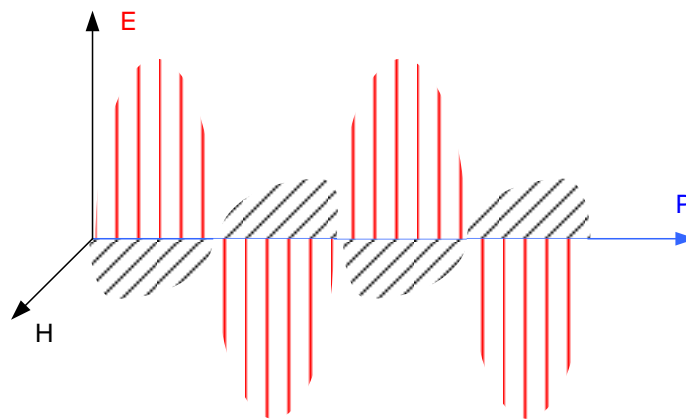
Slika 6.2. Magnetsko polje koje se formira oko vodiča

## Elektromagnetsko polje

Elektromagnetsko polje nastaje kao posljedica akceleriranog gibanja električnog naboja. Da bi električno polje postalo elektromagnetski val koji se slobodno širi kroz prostor i nakon što je uklonjen njegov izvor, potrebni su uvjeti prostornog gibanja naboja u dimenzijama koje odgovaraju valnoj dužini, a u radijskoj tehnici navedeno zovemo antenama.

Elektromagnetski valovi nalaze se u čitavom rasponu frekvencija od nula do beskonačno. Međutim, da bismo primili (pretvorili u električnu struju) elektromagnetski val od 1 Hz koristeći se antenom koja je poluvalni dipol (Hertzov dipol), bila bi nam potrebna antena koja bi bila duga od Zemlje pa do nešto manje od pola udaljenosti do Mjeseca, antena duljine 150 000 km (udaljenost Zemlja – Mjesec od 362 000 do 382 000 km). Dakle, u realnim zemaljskim uvjetima ne možemo primati ni odašiljati elektromagnetski val frekvencije 1 Hz.

Elektromagnetski val je transverzalni val kod kojega su vektori električnog i magnetskog polja međusobno okomiti i okomiti na smjer gibanja elektromagnetskog vala (Pointingov vektor), kao što to prikazuje slika 6.3.



Slika 6.3. Elektromagnetski val

Elektromagnetski valovi, za razliku od drugih valnih pojava u prirodi, imaju četiri važna svojstva:

1. Elektromagnetski valovi **moгу se širiti vakuumom**.
2. Titrajuća električna i magnetska polja u linearno polariziranom **elektromagnetskom valu su u fazi**.
3. Smjerovi električnoga i magnetskog polja u elektromagnetskom valu okomiti su jedan na drugi i oba su okomita na smjer širenja vala, što ih čini **transverzalnim valovima**.
4. Brzina elektromagnetskih valova ovisi **samo o električnim i magnetnim svojstvima medija kojim se šire**, a ne ovisi o amplitudi električnog ili/i magnetskog polja.
- 5.

Elektromagnetski valovi u vakuumu šire se brzinom svjetlosti od 300 000 000 m/s ili točnije **299 793 077 m/s**. U svakom drugom materijalnom sredstvu elektromagnetski valovi šire se sporije, što opisuje indeks loma sredstva  $n$  (6.1.).

$$n = \frac{c}{v} \quad (6.1)$$

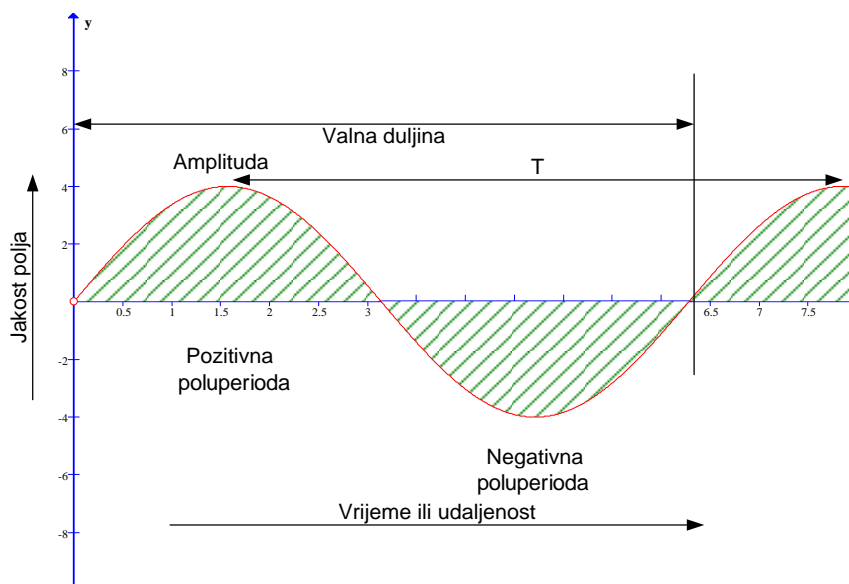
gdje je:

$n$  – indeks loma sredstva

$c$  – brzina elektromagnetskog vala u vakuumu

$v$  – brzina elektromagnetskog vala u sredstvu.

Elektromagnetske valove stvaraju električni naboji koji se gibaju akcelerirano. Ako električni naboj titra, on emitira **kontinuirani elektromagnetski val**, a ako ima samo kratkotrajnu akceleraciju, tada emitira **impulzni elektromagnetski val**.



Slika 6.4. Elementi toka elektromagnetskog vala

**Period** električnog toka ( $T$ ) jest vrijeme koje protekne od najveće vrijednosti električnog toka do sljedeće najveće vrijednosti električnog toka.

**Amplituda** ( $A$ ) jest najveći intenzitet električnog toka.

**Magnituda** je intenzitet električnog toka u nekom trenutku, mijenja se od nule do vrijednosti pozitivne ili negativne amplitude.

**Fronta vala je prednja strana svakog impulsa**, za neusmjerene valove tvori ekspanirajuću hemisferu.

Elektromagnetski val u svojem širenju odlikuje se karakteristikama:

- valne duljine  $\lambda$ (m)
- periode  $T$ (s)
- frekvencije  $f$ (Hz) i
- brzine širenja  $v$ (m/s).

Frekvencija elektromagnetskog vala određena je jednačbom (6.2).

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (6.2)$$

Perioda i frekvencija recipročne su vrijednosti (6.3).

$$T = \frac{1}{f} \quad f = \frac{1}{T} \quad (6.3)$$

Elektromagnetski valovi koji se koriste u radiotehnici odašilju se u prostor pomoću antena. U radiotehnici koriste se polarizirani elektromagnetski valovi.

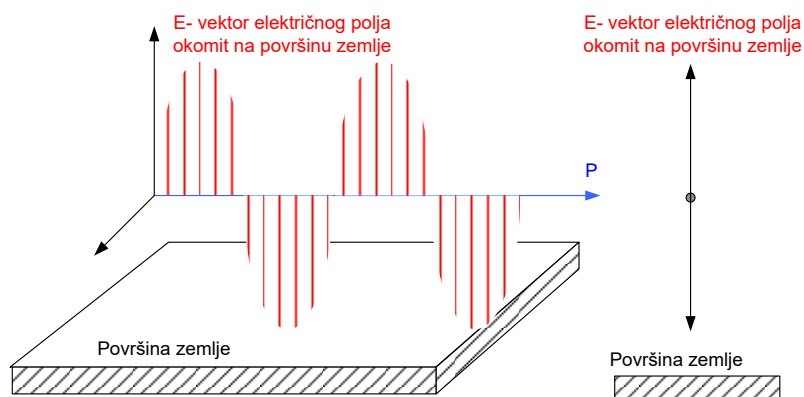
## Polarizacija

Polarizirani elektromagnetski val je val koji ima definirano prostorno gibanje električnog (i magnetskog) polja u odnosu na Zemljinu ravninu. **Polarizacija elektromagnetskog vala promatra se u odnosu na položaj električne komponente elektromagnetskog vala E.**

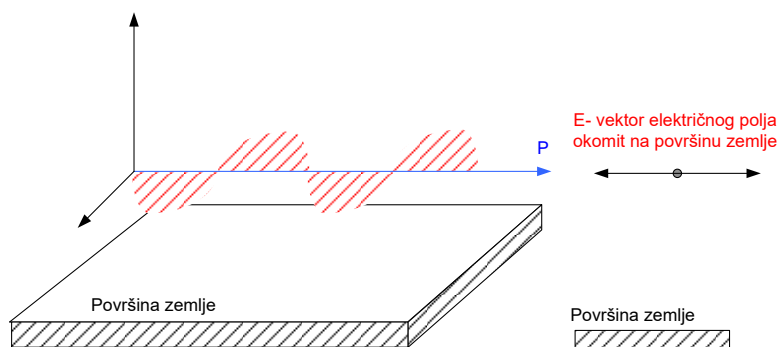
**U radiotehnici polarizacija EMV-a ovisi o obliku i položaju antene.**

Razlikujemo linearno polariziran i kružno polariziran elektromagnetski val.

**Linearno polariziran** elektromagnetski val je val kod kojeg vektor električnog polja titra uvijek u istom smjeru u odnosu na ravninu Zemljine površine, pa razlikujemo horizontalnu i vertikalnu polarizaciju elektromagnetskog vala.

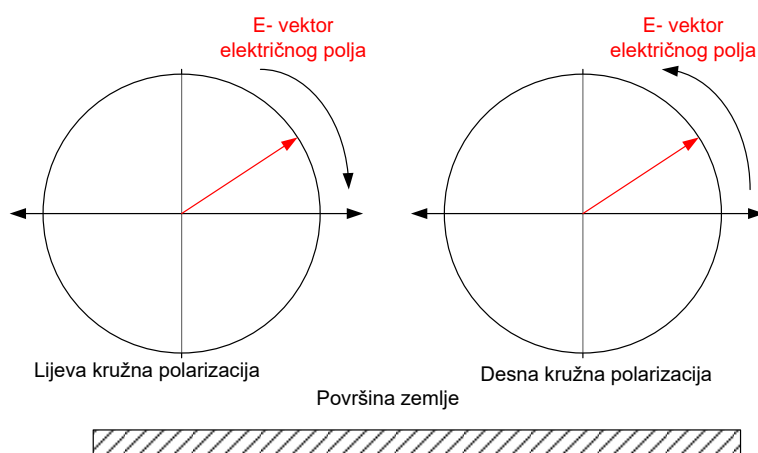


Slika 6.5. Linearna vertikalna polarizacija elektromagnetskog vala



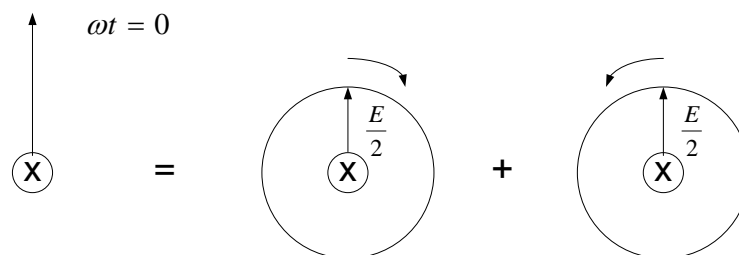
Slika 6.6. Linearna horizontalna polarizacija elektromagnetskog vala

**Kružno polariziran** elektromagnetski val kod kojeg vektor električnog polja opisuje kružnicu u prostoru (u odnosu na smjer širenja) zadržava uvijek konstantnu vrijednost jakosti električnog polja, ali mijenja položaj u prostoru. Razlikujemo desnu i lijevu kružnu polarizaciju.



Slika 6.7. Lijeva i desna kružna polarizacija

**Kružna polarizacija** može se shvatiti kao zbroj horizontalne i vertikalne polarizacije koje su međusobno fazno pomaknute za  $\pi/2$  i upola manjih amplituda (3dB). Zbog toga kružno polarizirane valove možemo primiti s horizontalno polariziranom antenom, ali će primljena energija biti za 3dB manja (polovinu energije). **Jednako tako bilo koju horizontalnu polarizaciju možemo shvatiti kao zbroj lijeve i desne kružne polarizacije gdje su snage vektora upola manje.**

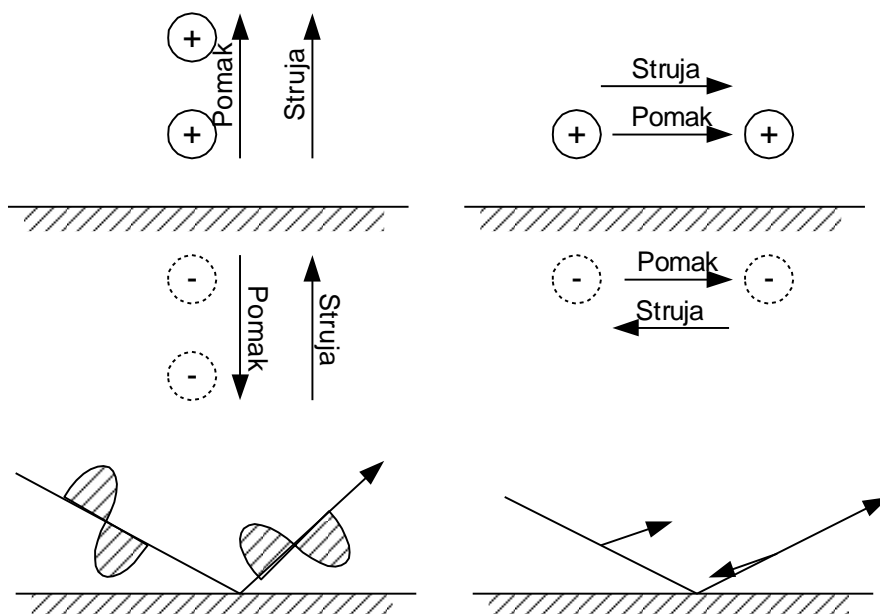


Slika 6.8. Vertikalna polarizacija kao zbroj dviju kružnih polarizacija

Postoji i **eliptička polarizacija** koja bi nastala zbrojem horizontalne i vertikalne polarizacije uz navedeni fazni pomak od  $\pi/2$ , ali i nejednake amplitude horizontalno i vertikalno polariziranih valova. Linearna i kružna polarizacija mogu se stoga shvatiti kao granični slučajevi eliptičke polarizacije.

U radiotehnici se najčešće koristimo linearno polariziranim elektromagnetskim valovima. Radiouređaji posebnih namjena mogu se koristiti i drugim tipovima polarizacija.

Vertikalna polarizacija elektromagnetskog vala pri prostiranju vala iznad «vodljivih» površina (mora, jezera, močvare, vlažna polja) neće kod refleksije mijenjati fazu (za razliku od horizontalne polarizacije) što u osnovi omogućuje dalji prodor (nema destruktivne interferencije s reflektiranim komponentama).



Slika 6.9. Promjena faze signala kod refleksije horizontalno polariziranog vala

Čitavo područje elektromagnetskih valova dijelimo ugrubo na tri dijela:

- **radijske frekvencije**
- svjetlosne frekvencije u koje ubrajamo i nevidljivo infracrveno i ultraljubičasto svjetlo
- X-zračenje i gama-zračenje.

Dakle, to su sve elektromagnetski valovi, ali različitih frekvencija.

Područje radijskih frekvencija kojim se mi koristimo u radijskoj tehnici kreće se u frekvenzijskom rasponu **od stotinjak KHz do 300 GHz**. Kod radijskih frekvencija elektromagnetski val nastaje zbog gibanja električnih struja u antenama.

U području svjetlosnih frekvencija (infracrveno, vidljivo svjetlo i ultraljubičasto) elektromagnetski valovi nastaju zbog gibanja elektrona u atomima.

U području X-zračenja i gama-zračenja elektromagnetski valovi nastaju zbog gibanja naboja u jezgri atoma.

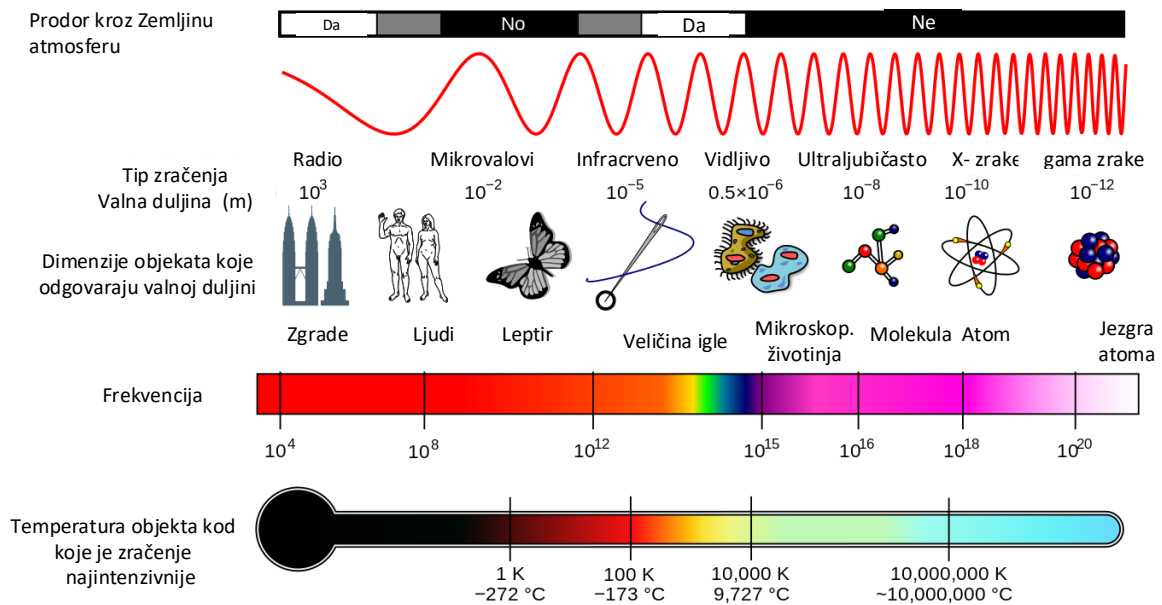
Ukupno područje elektromagnetskih valova prikazano je na slici 6.10., a na slici 6.11. prikazana je podjela ukupnog spektra elektromagnetskog zračenja na neionizirajuće i ionizirajuće zračenje (dio spektra).

**Elektromagnetski valovi koji se upotrebljavaju u radiotehnici spadaju u neionizirajuća zračenja.** Ionizirajuća zračenja su elektromagnetska zračenja iznad vidljivog dijela spektra elektromagnetskih valova, UV spektra.

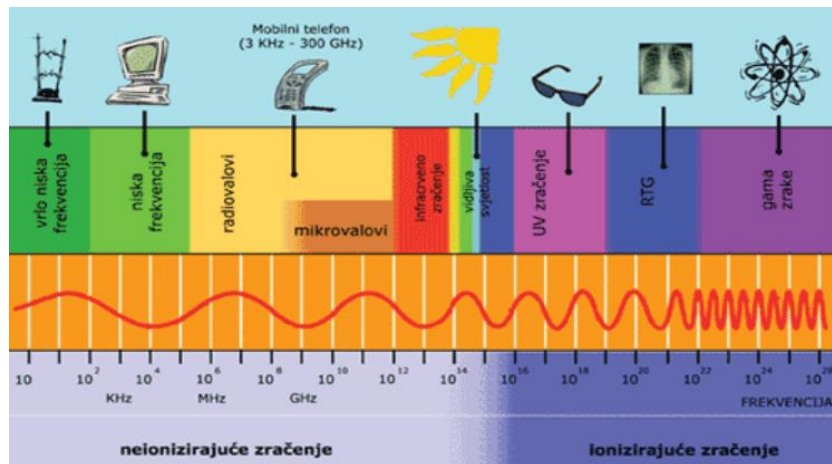
**Područje radiofrekvencija koje se koristi u:**

- radiokomunikaciji
- radiodeterminaciji
- za zagrijavanje tijela u industriji i prehrani.

Primjer uporabe takva zračenja su radio/TV, radar, mobilna komunikacija, dielektrični i indukcijski grijač, mikrovalna pećnica te varenja plastike.



Slika 6.10. Ukupni spektar elektromagnetskog zračenja



Slika 6.11. Ukupni spektar elektromagnetskog zračenja podijeljen na ionizirajući i neionizirajući dio

## 6.2. Ukupni spektar EMV-a u frekvencijama koje se koriste u radiokomunikacijama

Ukupni spektar radijskih frekvencija kreće se od nekoliko stotina KHz do 300 GHz. Međutim, unutar čitavog ovog spektra elektromagnetski val mijenja svoje osobine prostiranja u zemaljskim uvjetima te se svim tim frekvencijama nije moguće koristiti na jednak način.

U Tablici 6.1. vidljiv je spektar elektromagnetskih frekvencija s tipičnim nazivima frekvencijskih područja.

**Tablica 6.1. Spektar elektromagnetskih frekvencija**

<b>Područje frekvencija</b>	<b>Naziv</b>	
3 – 3000 Hz	Ekstremno niske frekvencije (engl. <i>Extremely Low Frequencies</i> – ELF)	
3 – 30 kHz	Vrlo niske frekvencije (engl. <i>Very Low Frequencies</i> – VLF)	
30 – 300 kHz	Niske frekvencije (engl. <i>Low Frequencies</i> – LF)	Radijske frekvencije
300 – 3000 kHz	Srednje frekvencije (engl. <i>Medium Frequencies</i> – MF)	
3 – 30 MHz	Visoke frekvencije (engl. <i>High Frequencies</i> – HF)	
30 – 300 MHz	Vrlo visoke frekvencije (engl. <i>Very High Frequencies</i> – VHF)	
300 – 3000 MHz	Ultra visoke frekvencije (engl. <i>Ultra High Frequencies</i> – UHF)	
3 – 30 GHz	Super visoke frekvencije (engl. <i>Super High Frequencies</i> – SHF)	
30 – 300 GHz	Ekstra visoke frekvencije (engl. <i>Extra High Frequencies</i> – EHF)	
0,3 – 390 THz	Infracrveno svjetlo (engl. <i>Infra red light</i> – IR)	
390 – 770 THz	Vidljivo svjetlo	
770 – 30 000 THz	Ultraljubičasto svjetlo (engl. <i>Ultraviolet light</i> – UV)	
30 000 THz – ...	X-zrake i kozmičke zrake	

### 6.2.1. Čimbenici koji utječu na ljudsko zdravlje kod izloženosti ljudskog tijela EMV zračenju

Kada govorimo o utjecaju elektromagnetskih valova na zdravlje ljudi, učinci koje oni izazivaju na ljudsko tijelo ovise o sljedećem:

- frekvenciji koja se koristi
- jačini izvora EMV-a
- trajanju izloženosti našeg tijela izvoru EMV-a.

Elektromagnetski valovi koji se nalaze u našem okruženju potječu od prirodnih i umjetnih izvora. Prirodni izvori elektromagnetskih valova su Sunce, druge zvijezde i objekti u svemiru, atmosferske električne pojave, grmljavina i sl. Zemljina atmosfera nas štiti od elektromagnetskih valova vrlo visokih frekvencija daleko iznad radiopodručja, od UV zračenja, X-zraka i gama-zraka. Iz domena radijskih frekvencija Zemljina atmosfera je teško propusna i za mikrovalove. Kod elektromagnetskih valova iz područja radijskih frekvencija čija valna duljina odgovara veličini čestica u atmosferi (mikrovalovi), kišnim kapima, kapljicama magle, molekulama oksigenih plinova dolazi do snažne apsorpcije i refleksije što dodatno otežava prostiranje takvih elektromagnetskih valova, te kada ih i iskoristavamo u radijskoj tehnici, ne možemo ih upotrebljavati na velikim udaljenostima zbog gušenja atmosfere, ali i zbog teškoća u proizvodnji visokih izlaznih snaga na visokim frekvencijama.

*(Kako frekvencija raste, tako se valna duljina smanjuje. Antena koja svojom veličinom odgovara valnoj duljini, na primjer poluvalna antena, također postaje sve manja, a fizički manja antena može predati ili*



*primiti znatno manje energije EMV-a. Navedeno svojstvo naziva se efektivna površina antene, za deset puta veću frekvenciju antena je deset puta manja, a njezina efektivna površina je sto puta manja, n. a.)*

Elektromagnetski valovi iz donjeg dijela radiofrekvencijskog spektra prostiru se relativno nesmetano kroz Zemljinu atmosferu. Što je niža frekvencija, bolji je ogib elektromagnetskog vala oko prepreke. Kako raste frekvencija, tako slabi ogib (slabi signal u sjeni). Na frekvencijama višim od 11 GHz prijemna antena mora imati izravnu optičku vidljivost s predajnom (emisijском) antenom. Takav način prostiranja označava se kao LOS prostiranje (LOS *Line of sight*).

Važno je imati na umu gore iznesene činjenice upravo kada govorimo o sustavima 5G za koje se predviđa korištenje frekvencijskog opsega iznad 26 GHz. Taj frekvencijski opseg omogućit će slanje velike količine informacija između bazne i mobilne postaje, ali na izuzetno malim udaljenostima (nekoliko desetina metara) i uz izravnu optičku vidljivost predajnika i prijemnika. Izlazne snage kod ovakvih baznih postaja s obzirom na to da pokrivaju mikroprostor izuzetno su male, oko 1 mW odnosno 0 dBm.

Kada upotrebljavamo frekvencije oko 26 GHz, radi se o izuzetno niskim snagama. Čovjekovo tijelo je sustav dinamičke ravnoteže, a bilo koji utjecaj na njegovo zdravlje, među ostalim, ovisi o količini koja se prima. Na primjer, u atmosferi na Zemlji postoje čestice prašine, vodene pare i drugih elemenata. Kada je koncentracija nečistoća u atmosferi niska, onda je količina koju čovjek primi disanjem takva i tolika da organizam može to izbaciti iz sebe i ta količina ne ostavlja negativne posljedice. Ako je atmosfera prezasićena nečistoćama, onda to ima negativne posljedice na ljudsko zdravlje. Čak i sastojci koji su nam neophodni za život, kao što je voda i hrana, ako ih uzimamo u prevelikoj količini, štetni su za ljudsko zdravlje. Elektromagnetski valovi su sastavni dio prirodnog ljudskog okruženja i čovjek ih bez posljedica za zdravlje može podnijeti, ali to ovisi o količini. Na primjer Sunčevo svjetlo može vas ubiti ako ste mu predugo izloženi, ali jednako tako je štetno ako smo potpuno od njega izolirani.

Umjetni izvori elektromagnetskih polja i valova koji se nalaze u našem okruženju prikazani su u tablici 6.2.

*Tablica 6.2. Izvori elektromagnetskih polja i valova*

Vrsta	Frekvencijsko područje	Izvor
Statička elektromagnetska polja	0 Hz	Prirodni izvori. Ekрани klasičnih katodnih cijevi. Industrijska elektroliza i dr.
Izuzetno niska frekvencija (ELF)	$(0 < f \leq 300 \text{ Hz})$	Elektroenergetski vodiči. Rasklopna postrojenja, trafostanice. Uređaji u kućanstvu. Električni automobili, vlakovi, tramvaji.
Srednja frekvencija (IF)	$300 \text{ Hz} < f \leq 100 \text{ kHz}$	Monitori. Uređaji protiv krađe u trgovinama. Sustavi za kontrolu pristupa bez upotrebe ruku. Čitači kartica. Detektori metala.

Radijska frekvencija (RF)	$100 \text{ kHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$	Emitiranje i TV. Mobilna telefonija. Mikrovalna pećnica. Radar. Prijenosni i stacionarni radioprimopredajnici. Osobni mobilni radio.
---------------------------	--	---

Energija kvanta EMV-a može se izračunati iz umnožaka frekvencije i Planckove konstante ( $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \approx 4,13566743 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$ ). Linearno s povećanjem frekvencije raste i kvantna energija kvanta EMV-a. Energija kvanta koja može promijeniti našu molekulu DNA jest oko 1 eV i nalazi se u frekvijskom području koje poznajemo kao UV zračenje.

Sve frekvencije koje spadaju u raspon radijskog zračenja (koje se koriste u radiotehnici) pripadaju neionizirajućem zračenju. Na primjer, za frekvencije oko 1 GHz energija kvanta je približno 3,7  $\mu\text{eV}$ , a za frekvencije neposredno iznad 24 GHz 90  $\mu\text{eV}$ .

Jedan od učinaka koji može uzrokovati EMV jest zagrijavanje materijala koji su mu izloženi. Ako je EMV-u izloženo ljudsko tijelo, onda govorimo o zagrijavanju ljudskog tijela. Svako zagrijavanje ljudskog tijela koje prelazi 1° C izaziva štetne učinke na ljudsko zdravlje (nepopravljive).

Koliko je štetno elektromagnetsko zračenje mobilnih telefona ili baznih stanica najbolje se procjenjuje iz jednog primjera.

Mikrovalna pećnica radi na frekvencijama od 2,430 GHz. Mobilni telefoni 3G (UMTS) ili 4G (LTE) imaju jedno od područja djelovanja UL 2,5 – 2,57 GHz i DL 2,62 – 2,69 GHz. To su vrlo bliska frekvijska područja. Postavlja se pitanje: Zašto hranu ne možemo zagrijati mobilnim telefonom, već mikrovalnom pećnicom? Samo zato što postoji značajna razlika u snazi emitirane energije. Mikrovalna pećnica troši 300 do 800 W (ovisno o vrsti i proizvođaču). Mobitel emitira snagu od 1 do 16 mW (od 0 do 12 dBm). Mobilni telefon emitira EMV koji je 50 000 do 300 000 puta slabiji nego EMV koji emitira mikrovalna pećnica. Ljudi se ne boje mikrovalne pećnice, ali se boje mobilnih telefona!

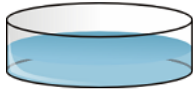
### 6.2.2. Trajanje izloženosti EMV-u

Nitko ne smije biti dugo izložen jakim izvorima EMV-a, sa slabijim izvorima izloženost može biti dulja.

Uzmimo jednostavan primjer. Kad se vozimo brodom koji je opremljen pomorskim radarom, radar ima usku vodoravnu laticu zračenja (oko 1°) i široku okomitu laticu zračenja (oko 30°). Brodski radar svojim snopom redovito prelazi preko palube broda. Ako stojimo na palubi, izloženi smo (na kratkoj udaljenosti) impulsnoj emisiji broskog radara. Izlazna impulsna snaga broskog radara je 10 KW do 100 KW. Puls traje 1  $\mu\text{s}$ , a pauza između impulsa 1 ms. Dakle, ne bojimo se pomorskog radara i držimo u ruci mobilni telefon kojeg se bojimo, a njegova izlazna snaga je reda mW.

### 6.3. Studije koje se provode radi zaštite ljudskog zdravlja od izvora EMV-a

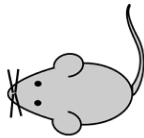
U posljednjih 30 godina objavljeno je približno 25 000 znanstvenih članaka iz područja bioloških učinaka i medicinske primjene neionizirajućeg zračenja (zračenje u području radiofrekvencija). Vrste istraživanja provedenih radi utvrđivanja štetnih učinaka neionizirajućeg zračenja na zdravlje ljudi mogu se podijeliti:



In Vitro

### In vitro

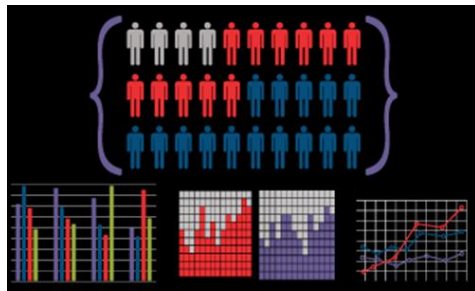
**In vitro** su studije na organskim materijalima koji su izvađeni iz živih organizama. Neživi dijelovi tkiva izloženi su vrlo jakom EMV-u kako bi se utvrdio njihov učinak na tkiva. Ove studije mogu samo djelomično pokazati negativne učinke.



In Vivo

### In vivo

**In vivo** je istraživanje provedeno na živim organizmima, laboratorijskim životinjama, najčešće miševima. Međutim, zbog djelomičnih razlika u organizmima, ove studije mogu samo djelomično pokazati mogući utjecaj EMV-a na zdravlje ljudi.



### Epidemiološke studije

Epidemiološke studije provode se na ljudima koji su u svojem profesionalnom poslu ili običnom životu izloženi višim razinama EMV-a ili elektromagnetskih polja. Te se studije temelje na statističkoj povezanosti količine zračenja i oštećenja (bolesti) organizma. Traži se povezanost između određenih vrsta bolesti i profesionalne izloženosti izvorima EMV-a. Epidemiološke studije pokazale su da će ljudi koji žive pod dalekovodima ili u blizini rasklopnih postrojenja (pod izmjeničnim elektromagnetskim poljima velike snage) vjerojatnije razviti leukemiju nego druga populacija.

Svi negativni učinci EMV-a na zdravlje ljudi mogu se podijeliti u dvije skupine:

- utjecaj bez toplinskih učinaka i
- toplinski učinci.

**Utjecaj bez toplinskih učinaka.** Ne postoje točni i mjerljivi pokazatelji ne-toplinskih negativnih učinaka. O tim se učincima još uvijek raspravlja s hipotetičkog gledišta. Ne-toplinski negativni učinci djelomično se svode na smetnje bioloških struja kojima se naše tijelo koristi za svoje funkcioniranje, te na negativne učinke koje inducirane struje mogu izazvati u našem tijelu a koje nisu toplinske prirode.

**Toplinski učinci.** Radiofrekvencijski elektromagnetski valovi uzrokuju porast tjelesne temperature. Ti su učinci mjerljivi, a svi propisi i standardi zaštite temelje se na toplinskim učincima koje EMV može proizvesti na ljudsko tijelo. Povećanje tjelesne temperature za 1 stupanj Celzijev može stvoriti štetne učinke.

### Toplinski negativni učinci na ljudsko zdravlje

Toplinska energija svake komponente biološkog tkiva (ioni, molekule, stanice) ima prosječnu vrijednost (6.4).

$$E = k \cdot T \quad (6.4)$$

gdje je:

$k$  – Boltzmanova konstanta ( $k = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K), a

$T$  – apsolutna temperatura u stupnjevima Kelvina ( $K = ^\circ C + 273,15$ ).

Na sobnoj temperaturi  $T = 300$  K produkt  $k i T$  je 26 MeV. Ako su toplinski učinci elektromagnetskih valova takvi da su promjene oko vrijednosti 26 MeV zanemarive, tada je ukupni utjecaj na zdravlje ljudi neznatan.

Međutim, ako se tjelesna temperatura promijeni za više od  $1^\circ C$  (u cijelom tijelu ili samo jednom njegovu dijelu), mogu se pojaviti štetni učinci koji su nepopravljivi. Mali porast tjelesne temperature zbog utjecaja elektromagnetskog zračenja može dovesti do:

- srčanog udara
- neplodnosti
- zamagljena vida (ozljede oka)
- glavobolje
- općeg osjećaja slabosti (nemoći)
- gubitka apetita
- poremećaja spavanja
- opekline kože
- itd.

## 6.4. Međunarodni propisi i hrvatska regulativa za zaštitu od elektromagnetskih zračenja

**Svi standardi** propisani za zaštitu od elektromagnetskog neionizirajućeg zračenja **temelje se na toplinskim učincima**. Kada smo djelomično ili u cijelom tijelu izloženi utjecaju EMV-a prema važećim standardima zaštite, **tjelesna temperatura ne bi se trebala povećati za više od  $0,1^\circ C$** . Na tim se činjenicama temelje svi propisi za zaštitu ljudskog zdravlja od neionizirajućih zračenja.

Međunarodni standardi zaštite od neionizirajućeg elektromagnetskog zračenja definiraju maksimalnu količinu snage EM zračenja po kilogramu tjelesne težine koju osoba može primiti, što je jedinica koja se naziva SAR (*Specific Absorption Rate* – W/kg). Dopuštene vrijednosti za profesionalnu izloženost i izloženost opće populacije prikazane su u tablici 6.3.

Tablica 6.3. Dopuštene vrijednosti SAR-a za profesionalnu izloženost i za opću izloženost stanovništva EM zračenju

Frekvencija	Vrijednost SAR (W/kg) za izloženost cijelog tijela	Vrijednost SAR (W/kg) za izloženost glave i trupa	Vrijednost SAR (W/kg) za izloženost ruku i nogu
-------------	--	---	---

10 MHz – 10 GHz	Profesionalna izloženost	Izloženost opće populacije	Profesionalna izloženost	Izloženost opće populacije	Profesionalna izloženost	Izloženost opće populacije
	0.4	0.08	10	2	20	4

**Druga vrijednost koju norme definiraju jest dopuštena gustoća struje** koja može protjecati kroz ljudsko tijelo  $J$  (A/m<sup>2</sup>).

Dopuštene gustoće struje reda su mA. Električna struja u našem tijelu, koju ćemo osjetiti, jest između 20 i 40 mA. Kontraksije mišića počinju kada struje prelaze 50 mA, a snažni trzaji mišića i štetni učinci na ljudsko zdravlje počinju pri vrijednostima od 160 do 320 mA.

Da bi se tjelesna temperatura povećala za 1° C na radiofrekvencijama od 10 MHz do 10 GHz, **apsorbirana snaga morala bi biti 4 W/kg**. Riječ je o velikoj apsorbiranoj snazi elektromagnetske energije i graničnim vrijednostima norma koje su deset ili četrdeset puta ispod navedene vrijednosti.

Glavni problem s ovim temeljnim ograničenjem apsorbirane snage i gustoće struje nemogućnost je izravnog mjerenja.

Zbog nedostatka sposobnosti izravnog mjerenja navedenih normiranih vrijednosti u ljudskom tijelu provodi se empirijsko modeliranje odgovarajuće vrijednosti električnog polja koja ne smije biti prijeđena za svaku pojedinu frekvenciju. U ovom empirijskom modeliranju izračunavaju se veličine snage i gustoće struje u ljudskom tijelu u odnosu na jakost električnih i magnetskih polja (u svakom frekvencijskom području, a fiksne vrijednosti definirane su iznad 2 GHz). Jačina elektromagnetskih polja u prikladnom prostoru relativno je lako mjerljiva veličina.

Međunarodna komisija za zaštitu od neionizirajućeg zračenja (ICNIRP) preporučila je referentne razine za ograničavanje izloženosti elektromagnetskim poljima za profesionalno osoblje i opću populaciju.

*Tablica 6.4. Najveća dopuštena gustoća električnog i magnetskog polja*

Frekvencije od 400 MHz do 2 GHz	Maksimalno dopuštena jakost električnog polja E(V/m)	Maksimalno dopuštena jakost magnetskog polja H(A/m)	Maksimalna gustoća magnetskog toka B(μT)	Ekvivalentna gustoća snage ravnog vala S(W/m <sup>2</sup> )
Izloženost profesionalnih osoba	$3 f^{1/2}$	$0,008 f^{1/2}$	$0,01 f^{1/2}$	$f/40$
Izloženost opće populacije	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
Napomena	U jednadžbama je frekvencija uvrštena u MHz.			
Frekvencije od 2 do 300 GHz	Maksimalno dopuštena jakost električnog polja E(V/m)	Maksimalno dopuštena jakost magnetskog polja H(A/m)	Maksimalna gustoća magnetskog toka B(μT)	Ekvivalentna gustoća snage ravnog vala S(W/m <sup>2</sup> )

Izloženost profesionalnih osoba	137	0.36	0.45	50
Izloženost opće populacije	61	0.16	0.20	10

Na primjer, za frekvencije oko 1 GHz (GSM 890 do 960 MHz) dopuštena jakost električnog polja za profesionalnu populaciju jest 93 V/m, a za opću populaciju 42 V/m (ICNIRP norme).

Dakle, to su relativno visoke vrijednosti jakosti električnog polja koje teško da će postići bilo koja bazna ili mobilna stanica.

U tablici 6.5. možemo vidjeti granične vrijednosti (na 935 MHz) koje propisuju pojedine zemlje, a koje su općenito strože od ICNIRP standarda.

*Tablica 6.5. Granične vrijednosti električnog polja za frekvenciju 935 MHz*

Države	Granične vrijednosti električnog polja za frekvenciju 935 MHz – centralna frekvencija osnovnog GSM opsega.	
	Profesionalne osobe	Opća populacija
ICNIRP	91,7 V/m	42,0 V/m
Austrija	109,09 V/m	49,0 V/m
Velika Britanija, Francuska, Irska, Španjolska	91,7 V/m	42,0 V/m
Švedska	60,0 V/m	42,0 V/m
Švicarska	42,0 V/m	42,0 V/m
Slovenija	41,9 V/m	13,1 V/m
Hrvatska	42,0 V/m	16,8 V/m

ICNIRP (Međunarodni odbor za neionizirajuće zračenje) datira od trećeg međunarodnog kongresa IRPA 1973. godine, kada je prvi put organizirana sjednica o zaštiti od neionizirajućeg zračenja. Godine 1974. osnovana je radna skupina za neionizirajuće zračenje, a 1975. studijska skupina. Godine 1977., tijekom četvrtoga međunarodnog kongresa IRPA-e, rođen je INIRC (pokrata od Međunarodni odbor za zaštitu od neionizirajućeg zračenja), preteča ICNIRP-a, koji je osnovan kao neovisno povjerenstvo 1992. tijekom osmoga međunarodnog kongresa IRPA-e. Od tada je cilj ICNIRP-a pružiti najmjerodavnije neovisno znanstveno mišljenje o svim pitanjima koja se tiču interakcije neionizirajućeg zračenja i zdravlja ljudi.

Za Europu i EU sve norme koje su vezane uz negativni utjecaj neionizirajućeg zračenja na ljudsko zdravlje propisuje ICNIRP. U Sjedinjenim Američkim Državama norme za zaštitu ljudskog zdravlja od neionizirajućeg zračenja propisuje IEEE i one se nešto razlikuju od europskih norma.

Razine električnih polja kojima smo izloženi od kućanskih aparata kad smo na udaljenosti od 30 cm također mogu biti visoke, ali to su obično mnogo niže frekvencije, pa to sugerira da bi štetni učinci mogli biti znatno manji.

## 7. Mobilna forenzika

### 7.1. Ispisi mobilnog prometa

Svaki operator mobilnih komunikacija bilježi stanje prometa na svojem sustavu, primjerice podatke o pretplatnicima, količinu i vremensko trajanje obavljenih usluga uz čitav niz popratnih tehničkih detalja. Osnovna namjera operatora pri bilježenju prometa nije priprema podataka za mobilnu forenziku, nego potreba za naplatom vlastitih usluga i uvid u tehničke karakteristike sustava. Operator temeljem prikupljenih podataka o prometu može svojim korisnicima ispostaviti račune za obavljene usluge, ali stječe i uvid u prometne karakteristike (funkcionalnosti) pojedinih dijelova svojega komunikacijskog sustava.

Podatci koje operator prikuplja o prometu čine višedimenzionalnu bazu podataka iz koje se podatci mogu iščitavati, listati, prema različitim kriterijima. Koji će kriteriji u pretraživanju podataka o prometu biti odabrani ovisi o namjeni obrade podataka, odnosno o svrsi s kojom to radimo. Na primjer, možemo za određeni vremenski period listati podatke o prometu po pojedinoj baznoj postaji i njezinim sektorima. Temeljem tih podataka možemo zaključiti je li bazna postaja preopterećena prometom ili je podopterećena, treba li nešto mijenjati u prostornoj konfiguraciji sektora i broju radijskih i komunikacijskih kanala. Ukupni podatci o prometu na pojedinom području vrlo često služe kao temeljna osnova za planiranje daljnjeg razvoja i proširenja sustava.

Operator podatke o prometu lista u redovitim mjesečnim ciklusima po pretplatničkim MSISDN brojevima (pretplatničkim brojevima) kako bi temeljem njih mogao izvršiti naplatu svojih usluga.

Podatci o prometu mogu biti i jesu temelj za forenzičnu analizu. Zbog toga se Zakonom o elektroničkim komunikacijama, koji je Hrvatski sabor donio na sjednici 19. lipnja 2008. godine, **u članku 109. definira obveza zadržavanja odnosno čuvanja podataka o prometu**, a u članku 110. eksplicitno se navode vrste podataka koje je operator telekomunikacijskih usluga dužan čuvati. Prema Zakonu o elektroničkim komunikacijama **operatori su dužni čuvati podatke o prometu godinu dana od trenutka obavljene komunikacije**. Većina operatora u Hrvatskoj **vrši automatsko brisanje podataka godinu dana unatrag**. Od operatora je moguće dobiti **najstarije podatke o prometu koji se odnose na današnji datum prethodne godine**. Značajno u analizi telekomunikacijskog prometa s gledišta mobilne forenzike jest da zadani interval promatranja **ne izlazi iz okvira koji je određen vremenskim rokom od proteklih dvanaest mjeseci**.

Ovisno o tipu i vrsti forenzične analize od operatora se može temeljem naloga nadležnog suda, državnog odvjetništva ili drugog ovlaštenog tijela zatražiti izliste podataka o prometu za odgovarajući vremenski period prema različitim kriterijima i u različitoj sintagmi ispisa. Kriterij i sintagma ispisa ovise o željenim ciljevima forenzične analize.

Na primjer, ispis možemo zatražiti za pojedini MSISDN broj, a u sintagmi ispisa možemo navesti potrebu da se u svakoj zabilježenoj komunikaciji traženog broja vidi podatak o IMEI broju (broju mobilnog aparata). Na taj način možemo zaključiti je li promatrani korisnik u promatranom vremenskom intervalu upotrebljavao za svoju SIM karticu više različitih mobilnih aparata. Također, možemo zatražiti ispis po broju mobilnog uređaja IMEI. Na taj način možemo doći do spoznaje jesu li se u mobilnom aparatu promatranog korisnika u promatranom vremenskom intervalu upotrebljavale i druge SIM kartice, to jest MSISDN brojevi.

U forenzičnim analizama mobilnog prometa vrlo se često analiziraju ispisi koji se odnose na određeni MSISDN broj ili IMEI broj. Ponekad je nužno zatražiti ispile po baznim postajama, što je čest slučaj kada promatramo događanja na pojedinom području.

Ispisi po pojedinim brojevima mobilnih aparata i/ili SIM kartica vrlo se često koriste kada se analiziraju pojedine osobe, njihove komunikacijske navike, kretanja u prostoru i socijalno okruženje kojem pripadaju. Ispisi po pojedinim baznim postajama često se koriste kada se analiziraju pojedina zbivanja, kao što su veće nesreće i to najčešće s ciljem da se utvrdi točan trenutak zbivanja i redosljed naknadnih radnja. Ispisi po pojedinim baznim postajama često se koriste i u istražnim postupcima kada je potrebno utvrditi za promatranu osobu je li se počela koristiti novim mobilnim aparatom i SIM karticom.

#### 7.1.1. Kriteriji ispisa poziva i sintagma ispisa poziva

Kada od operatora tražimo ispis poziva, onda je to zahtjev kojim se od operatora traži da iz višedimenzionalne baze podataka o prometu na svojem sustavu, prema kriterijima koje smo mu zadali u traženoj sintagmi, izlista podatke.

##### **Postoje dva osnovna kriterija po kojima se traži ispis poziva:**

1. vremenski period ispisa (od vremenskog trenutka do vremenskog trenutka)
2. veličina po kojoj se traži ispis (na primjer pretplatnički broj MSISDN, broj mobilnog aparata IMEI, međunarodni mobilni broj pretplatnika IMSI, broj sektora ćelije bazne postaje IDCELL i/ili drugo).



Što će sve biti sadržano u sintagmi tog ispisa ovisi o zahtjevu, a zahtjev ovisi o ciljevima koji se forenzičnom analizom žele postići. Što se više podataka zatraži u sintagmi ispisa, to će biti moguće provesti cjelovitiju analizu ispisa.

Zabilježeni promet može se predočiti u različitim tabličnim elektroničkim formama: .csv, .xls i drugi ili u pisanoj (tiskanoj) formi. Zbog lakše obrade, pogotovo ako su ispisi veliki i ima ih mnogo, bolje je tražiti podatke u elektroničkoj formi i formatu koji vam je blizak za obradu. Podatci se slažu u stupce koji nose odgovarajuće nazive, a redovi obično znače komunikaciju.

Kod T-Mobile i Vip-net ispisa jedan red uvijek je jedna komunikacija, u Tele 2 ispisima više redova može se odnositi na samo jednu komunikaciju. U tom se slučaju jedna komunikacija prepoznaje preko zajedničkog podatka zvanog «*ParentCallID*», koji je jedinstven za sve redove koji se odnose na istu komunikaciju (jedinstveni su i podatci koji se odnose na početak i na kraj komunikacije). Broj redova ovisi o tome je li komunikacija uspostavljena unutar iste mreže (Tele 2), između mreža i/ili s pretplatnikom koji je u nacionalnom *roamingu* u drugoj mreži.

U svim ispisima poziva mobilne i klasične telefonije, onaj koji generira poziv kao i svi podatci vezani uz njega nose prefiks **A**, a onaj koji prima poziv kao i svi podatci koji su vezani uz njega nose prefiks **B**. **A** strana ispisa je strana koja se sa svim svojim podacima odnosi na pozivatelja, a **B** strana je strana koja se sa svim svojim podacima odnosi na primatelja poziva ili usluge.

Osim onih podataka koji se odnose na pozivatelja (**A** strana) i primatelja poziva (**B** strana), u ispisima postoje i podatci koji su jedinstveni za tu komunikaciju, a to su:

- **CallID**
- **ParentCallID**
- **BeginTime ili Start Time**
- **EndTime**
- **Duration**
- **Service.**

**CallID** – to je identifikacijski broj poziva. Identifikacijski broj poziva jedinstven je za komunikaciju, a određuje ga **A** strana. Uzmimo za primjer da netko iz T-Mobile mreže zove nekoga drugog korisnika u Vip-net mreži. CallID u oba je ispisa isti. Taj se podatak može koristiti za spajanje ispisa različitih operatora (vremena početka i kraja poziva u različitim ispisima se ne podudaraju, a razlike mogu ići od nekoliko sekunda do cijele minute; više je različitih uzroka ovih razlika).

**ParentCallID** – pokazuje koliko se redova ispisa odnosi na istu komunikaciju. Ova oznaka javlja se kod Tele 2 ispisa, kod kojih jedan red ispisa može značiti jedan razgovor, ali i ne mora. U ispisima Tele 2, dva, tri, pa i više redova ispisa mogu se odnositi na isti razgovor. Taj podatak nije nužan kod ispisa koji se dobivaju od mreža Vip-net ili T-Mobile jer se kod njihovih ispisa jedan red uvijek odnosi na jednu komunikaciju.

Tipičan ispis poziva za dani vremenski period uz prethodno navedene stavke ima i sljedeće:

- **A**Number
- **A**IMSI
- **A**IMEI
- **A**Network
- **A**CellID
- **B**Number
- **B**IMSI
- **B**IMEI
- **B**Network
- **B**CellID.

Kao što je već kazano, sve one stavke koje u svom nazivu imaju prefiks **A** odnose se na stranu koja generira poziv, a sve one stavke koje u svom nazivu imaju prefiks **B** odnose se na stranu koja prima poziv (primatelj poziva).

#### 7.1.2. Čitanje ispisa poziva i značenje pojedinih stavki

Postavlja se pitanje što se može pročitati iz ispisa poziva, to jest na koja pitanja ispis poziva može odgovoriti. To su sljedeća pitanja u analizi!

1. Tko je zvao?
2. Koga je zvao?
3. Kada?
4. Koja usluga?
5. Koje vremensko trajanje?
6. Gdje je u trenutku poziva bio pozivatelj?
7. Gdje je u trenutku prijema poziva bio primatelj?

Uvidom u odgovore na osnovna pitanja te detaljnom analizom ispisa poziva možemo za promatranu osobu i/ili skup osoba zaključiti u određenom vremenskom periodu:

- kakve su joj komunikacijske navike
- u kojim se socijalnim krugovima kreće
- kako se ti socijalni krugovi presijecaju
- kakvo joj je kretanje u prostoru i koje su joj navike kretanja u prostoru, je li boravila u inozemstvu i gdje
- i drugo.

Kada ne poznajemo sadržaj komunikacije, već samo ispis poziva za promatranu osobu ili osobe možemo temeljem ispisa donositi zaključke o nizu podataka iz njihova privatnog života. Da bi sve to bilo moguće, potrebno je detaljno poznavati značenje svake pojedine stavke u ispisu.

#### 7.1.2.1. ANumber

ANumber je MSISDN broj pozivatelja, na primjer: 00385 99 2304803.

MSISDN broj pozivatelja ima sljedeću strukturu značenja:

- 00 prefiks za međunarodni promet
- 385 pozivni broj za Republiku Hrvatsku
- 99 jedan od pozivnih brojeva T-Mobile mreže
- 2304803 pozivni broj pretplatnika.

MSISDN je broj pretplatnika koji pamtimo i koji nam je dostupan. Taj broj je uveden u telefonske imenike u memorijama mobilnih aparata, SIM kartica ili u drugim telefonskim imenicima za javnu objavu.

MS ISDN ima slijedeći format:

<b>Prefiks</b>	<b>CC</b>	<b>MNC</b>	<b>SN</b>
00	385	99	xxxxxxxxx
2 znamenke		2 – 3 znamenke	do 10 znamenaka

- Prefiks – međunarodni pozivi počinju s 00 (nula-nula), što je kod analize brojeva u telefonskoj centrali znak komutaciji da se želi ići u međunarodni promet, te da su sljedeće znamenke one koje se odnose na zemlju u kojoj je pozvani pretplatnik
- CC – *Country Code* ili kod zemlje
- MNC – *Mobile Network Code* (taj se broj ponekad označava NDC – *National Destination Code*)
- SN – *Subscriber Number*, broj pretplatnika.

#### 7.1.2.2. IMSI (A International Mobile Subscriber Identity)

IMSI je međunarodni identitet mobilnog pretplatnika. IMSI slijedi u ispisima poziva iza broja ANumber, ako smo tako zatražili u sintagmi ispisa, a on je jedinstven za svakog pretplatnika.

Na primjer: 219 01 9901881191

Gdje je:

- 219 *Mobile Country Code* (MCC), u ovom primjeru znači Republika Hrvatska
- 01 *Mobile Network Code* (MNC) koji u ovom primjeru znači T-Mobile

- 9901881191 *Mobile Subscriber Identity* (MSI) koji jedinstveno označava korisnika.

IMSI broj je broj kojim se u svojem predstavljanju mobilnoj mreži (u nacionalnom prometu ili u načinu rada *roaming* {rad u stranoj mreži}) koristi mobilna postaja (mobilna postaja je sklop mobilnog aparata i SIM kartice) da bi se identificirala. MSISDN broj i IMSI broj su vezani. Može se dogoditi da se jednim MSISDN brojem koristi jedan pretplatnik neko vrijeme i onda odustane od korištenja tog broja. Operator ponovno nakon nekog vremena (od tri do šest mjeseci) aktivira taj MSISDN broj i daje ga drugom korisniku, ali njemu dodijeli drugi IMSI. IMSI je zabilježen u SIM kartici. Na taj način možemo razlikovati prethodnoga od novog korisnika MSISDN broja.

Kada zatražimo ispis po MSISDN broju za neku promatranu osobu, potrebno je zatražiti da u sintagmi ispisa bude i IMSI broj. Moguće je da se tim MSISDN brojem prethodno koristila neka druga osoba (pogotovo ako se radi o dužem vremenskom periodu promatranja) koja nije vezana uz promatrani slučaj i koja je odustala od daljnjeg korištenja tog MSISDN broja. Navedeno se u ispisu vidi kada se do određenog vremenskog trenutka javlja jedan IMSI broj, a nakon njega drugi.

IMSI ima sljedeći format:

<b>MCC</b>	<b>MNC</b>	<b>MSIN</b>
3 znamenke	2 – 3 znamenke	7 – 10 znamenaka

- MCC – *Mobile Country Code* – mobilni kod zemlje
- MNC – *Mobile Network Code* – mobilni kod mreže
- MSIN – *Mobile Station Identification Number*, broj pretplatnika (najviše 10 znamenaka).

#### 7.1.2.3. AIMEI (*A International Mobile Equipment Identity*)

AIMEI je broj mobilnog aparata. Ovaj broj ima 14 do 15 znamenaka koje su jedinstvene za svaki mobilni uređaj. Ovaj broj govori o tome koji je mobilni uređaj bio korišten prilikom generiranja poziva.

Primjer ovog broja je:

354008-03-736200-6

IMEI broj po definiciji je dug 15 znamenaka, ali se posljednja znamenka ne koristi, pa zbog toga kažemo da je njegova dužina 14 znamenaka. Sintagma ovog broja je sljedeća:

- prvih šest znamenaka su takozvani TAC (*Type Approval Code*, kod koji dodjeljuje središnje GSM tijelo za taj tip mobilnog uređaja)
- sedma i osma znamenka su FAC (*Final Assembly Code*, broj koji identificira proizvođača)
- od devete do četrnaeste znamenke (šest znamenaka) SNR (*Serial Number*, serijski broj uređaja)
- petnaesta znamenka za sada se ne koristi.

<b>TAC</b>	<b>FAC</b>	<b>SNR</b>	<b>Spare</b>
6 znamenaka	2 znamenke	6 znamenaka	1 znamenka

Kada otvorimo bilo koji mobilni uređaj, mobitel, i skinemo njegovu bateriju, na naljepnici pored ležišta za SIM karticu nalaze se podatci o proizvođaču, tipu, modelu, ali i IMEI broj. Taj broj je zapisan s 15 znamenaka, a samo prvih 14 predstavlja IMEI. U ispisima operatora pod AIMEI ili BIMEI može se također pojaviti više znamenaka, do 16 njih. Samo se prvih 14 odnosi na IMEI i one moraju biti identične prvima 14 zapisanima u mobilnom uređaju.

IMIE broj mobilnog uređaja pojavit će se na prikazivaču aktivnog mobitela ako se upiše sljedeći kod: \*#06#.

Kao što se ispis traži u zadanom vremenskom roku za pojedini MSISDN, može se zatražiti u zadanom vremenskom roku i za pojedini IMEI. U tom slučaju dobit ćemo podatke i o tome koji su sve MSISDN brojevi (SIM kartice) u zadanom vremenu zabilježeni u uporabi u tom mobilnom telefonu. Na primjer, ako neka promatrana osoba u istom mobilnom uređaju upotrebljava različite SIM kartice (čak i od različitih operatora), tada se u zadanom vremenskom razdoblju od svih operatora zatraži ispis po IMEI broju. Na taj se način lako identificiraju svi MSISDN brojevi koji su korišteni u tom uređaju.

Ponekad se promatrane osobe koriste na teritoriju Republike Hrvatske SIM karticama stranih operatora (na primjer HT-Eroneti, m:tel i drugima). U Hrvatskoj su one u *roamingu* kao pretplatnici stranih mreža na jednoj od nacionalnih mreža, te ih ta mreža bilježi u prometu. Dakle, traženjem ispisa preko broja IMEI dolazimo do podataka o svim MSISDN brojevima (bez obzira na operatora koji može biti strani ili domaći) koji su korišteni na teritoriju RH u mreži operatora koji daje ispis.

#### 7.1.2.4. ANetwork

ANetwork je podatak koji govori preko koje se mreže javlja pozivatelj (u kojoj je mreži aktivan). Ovaj podatak sastoji se od pozivnog broja zemlje MCC i pozivnog broja nacionalne mreže NCC preko koje je generiran poziv ili preko koje je poziv primljen.

Na primjer, ako pretplatnik iz Hrvatske s MSISDN brojem 385 99 2304803 ode u Italiju i iz Italije poziva neki broj, tada u ispisu operatora čiji je MSISDN pod ANetwork stoji jedan od brojeva MCC-NCC talijanskih mreža. Na primjer: 22201, što znači Telekom Italija, ili neki drugi broj (operator), kao što je prikazano u tablici 7.1.1.

Tablica 7.1.1. Popis Network kodova za mreže u Republici Italiji

MCC	MNC	Brand	Operator	Status	Bands (MHz)	References and notes
222	01	TIM	<a href="#">Telecom Italia SpA</a>	Operational	GSM 900 / GSM 1800 / UMTS 2100	

222	02	Elsacom		Not operational	Satellite (Globalstar)	Retired
222	10	Vodafone	<a href="#">Vodafone Omnitel N.V.</a>	Operational	GSM 900 / GSM 1800 / UMTS 2100	
222	30	RFI	<a href="#">Rete Ferroviaria Italiana</a>	Operational	GSM-R 900	
222	77	IPSE 2000		Not operational	UMTS 2100	Retired
222	88	Wind	<a href="#">Wind Telecomunicazioni SpA</a>	Operational	GSM 900 / GSM 1800 / UMTS 2100	
222	98	Blu		Not operational	GSM 1800	Retired
222	99	3 Italia	<a href="#">Hutchison 3G</a>	Operational	UMTS 2100	

Popis svih mrežnih kodova u svijetu moguće je naći na *web*-stranicama na adresi:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile\\_Network\\_Code](http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_Network_Code).

U prethodnom primjeru komunikacija može biti u okviru Telecom Italia Spa mreže generirana preko različitih generacija mobilnih komunikacijskih sustava.

#### 7.1.2.5. ACellID

ACellID je broj koji jedinstveno označava ćeliju i/ili sektor na kojem je generiran poziv, odnosno kod BCellID kod koje je primljen poziv.

U sustavu ostaje zabilježena ćelija preko koje je uspostavljen poziv u odlazu ili dolazu. Kasnije tijekom razgovora korisnik na **A** ili **B** strani može zbog vlastitog gibanja promijeniti ćeliju, pa čak i mod rada (na primjer s UMTS-a na 4G LTE), ali ostaje zabilježena prva ćelija i njezin sektor preko koje je generiran poziv (za **A** stranu) ili primljen poziv (za **B** stranu).

Identifikacijski broj ćelije može biti dvoznamenkasti ili višeznamenkasti, a uređenje ovih brojeva ovisi o operatoru i razlikuje se od operatora do operatora. Ovi brojevi su kod T-Mobile i Vip-net ispisa decimalni, dok su kod Tele 2 ispisa dani ponekad kao heksadecimalni, a u novije vrijeme također kao decimalni.

Svaki operator ima svoj zapis o baznim postajama i drži ga kao poslovnu tajnu. Na zahtjev suda, MUP-a ili neke druge nadležne institucije operator dostavlja tražene podatke o baznim postajama.

Podatci o baznim postajama i sektorima daju se kao tablica koja ima sljedeće stupce:

CellID	BTSName	Lokacija	LAC	Street	City	Postcode
--------	---------	----------	-----	--------	------	----------

Područje županije	Longitude	Latitude	Range	Width	Direction
-------------------	-----------	----------	-------	-------	-----------

gdje su:

CellID	Identifikacijski broj ćelije i sektora. Ovaj broj istovjetan je broju koji se nalazi u ispisu poziva i koji jednoznačno određuje ćeliju (sektor) preko koje je ostvarena komunikacija.
BTS Name	Naziv bazne postaje (interni naziv operatora).
Lokacija	Najčešće opis lokacije.
LAC	Podatak o lokacijskom području. Ovaj podatak daje informaciju na koji se područni kontroler spaja bazna postaja. Obično je to brojčani podatak, dvoznamenkasti ili višeznamenkasti broj.
Street	Ulica u kojoj je smještena bazna postaja, često i kućni broj.
City	Grad u kojem je bazna postaja.
Postcode	Poštanski broj grada.
Područje županije	Naziv županije.

To su opisni podatci i od manjeg su značaja. Iza toga slijede geografska dužina i širina, zatim podatci:

Longitude	Zemljopisna dužina.
Latitude	Zemljopisna širina.
Range	Podatak govori o dubini prodora radiosnopa, najčešće u metrima. Može biti od značaja ako je potrebno odrediti mikrolokaciju promatrane osobe.
Width	Širina radiosnopa u stupnjevima (širina glavne latice zračenja).
Direction	Azimut usmjerenja glavne latice zračenja. (Ako nema podatka o azimutu zračenja antene, a širina radiosnopa je navedena kao 360 ili uopće ništa nije navedeno, tada se radi o <i>omni directional</i> anteni (anteni koja jednako zrači u svim smjerovima). Takve se antene rijetko koriste, najčešće tamo gdje je očekivan vrlo nizak promet iz svih smjerova, npr. otočne bazne postaje.)

Tri posljednja podatka uz prethodna dva daju pokrivanje sektora ćelije u kojem je promatrani korisnik (osoba).

Zamjenom CellID (**A** ili **B**) sa slijedom odabranih podataka iz tablice dobiva se ispis s razvidnim lokacijskim podatcima. Taj postupak nije jednostavan, ako se radi ručno, mukotrpan je i dugotrajan, a ako se radi strojno, lako dolazi do unosa pogrešaka.

Pogreške nastaju kada je korisnik u stranoj mreži u *roamingu* (što se vidi preko Network podatka). Tada ta mreža daje svoj broj ćelije koji se kao strano tijelo nalazi u ispisu domaćeg operatora (T-Mobile, Vipnet ili Tele 2 ispisu). Moguće je da i nacionalni operator ima baznu postaju s istim brojem, pa tada kod automatskog unosa lokacijskih podataka može doći do pogreške koja se u analizi kretanja očituje kao diskontinuitet u kretanju promatranog korisnika.

#### 7.1.2.6. Značenje istih podataka na B strani je isto, ali u tom slučaju radi se o pretplatniku koji prima poziv

Često u ispisima poziva nastaju praznine u **A** i **B** strani. Nedostaju IMSI, IMEI, CellID ili Network podatci. To se događa kada se uzme ispis od jednog operatora i promatra se komunikacija pretplatnika tog operatora s pretplatnikom drugog operatora. Dakle, to se događa iz razloga što se ovi podatci ne prenose iz mobilne mreže jednog operatora u mobilnu mrežu drugog operatora. Ako su **A** i **B** pretplatnik u različitim nacionalnim mrežama, tada je potrebno izvršiti tzv. spajanje ispisa radi cjelovite analize kretanja promatranih osoba.

Na primjer, ako imamo dvije osobe od kojih je jedna pretplatnik mreže T-Mobile, a druga mreže Vipnet, i želimo utvrditi njihove lokacije u trenutku komunikacije, to možemo napraviti samo spajajući dva ispisa po dvama MSISDN brojevima koji su uzeti od tih dvaju operatora.

Usporedba ispisa nije jednostavna zbog toga što se zabilježena vremena komunikacije razlikuju od operatora do operatora (od nekoliko sekunda do minute). Razlika nastaje zbog razlike u vremenu različitih mreža, ali i različitog trenutka bilježenja uspostave i zaključivanja poziva kod pozivatelja i pozvanoga kada su u odvojenim mrežama.

#### 7.1.2.7. Start Time i End Time

*Start Time* označava vrijeme početka usluge, a *End Time* ili *Stop Time* označava vrijeme kraja usluge. Ti su podatci značajni za naplatu usluge, na primjer govorna usluga koja se vremenski tarifira [ista mreža, različita mreža, *roaming* i drugo].

U analizi kretanja promatrane osobe po ispisu **ispravno je uz lokaciju (CellID) uzeti i Start Time**. Ako promatrana osoba putuje autocestom i obavlja govornu komunikaciju mobilnim uređajem desetak minuta, u ispisu poziva bit će zabilježena ćelija preko koje je uspostavljen poziv, dakle ćelija u kojoj je promatrana osoba bila u trenutku **Start Time**. Tijekom dužeg razgovora promatrana osoba može promijeniti i više ćelija na svojem putu, ali one neće biti upisane (zabilježene) u ispisu.

Ćelije sustava međusobno se pokrivaju (prekrivaju), postoje mikro- i makroćelije, a mobilni uređaj svakih 120 ms snima stanje svih ćelija i svih sustava (generacija) oko sebe (one od kojih prima korisni signal) i o njima obavještava područni kontroler kod 2G i 3G ili/i MME (Mobile Management Entity) kod 4G i 5G sustava. Ne znači da će se komunikacija ostvariti preko ćelije s najjačim signalom (najboljim pokrivanjem, što je bilo karakteristično samo za sustave 1G, na primjer NMT), o tome odluku donosi



područni kontroler (2G i 3G) i/ili MME (Mobile Management Entity) (4G i 5G), a odluka je vezana uz prometni algoritam. Na primjer, tamo gdje postoje makro- i u njima mikroćelije, brzo pokretni objekt (čest zahtjev za promjenom ćelije) gura se u makroćeliju (ako prometno nije preopterećena).

Može se dogoditi, i dogodilo se je u sudskoj praksi, da su dvije promatrane osobe u istom automobilu i kreću se istim putem, pretplatnici su istih mreža i komuniciraju istovremeno, a vezu ostvaruju preko različitih baznih postaja.

*End Time* ne bi nikada trebalo vezati uz lokaciju (osim u slučaju prijema SMS poruke). Ovaj podatak je značajan samo za određivanje dužine komunikacije između promatranih osoba ili promatrane osobe s nekom drugom osobom.

#### 7.1.2.8. Duration

*Duration* opisuje vrijeme trajanja usluge, ponekad je od značaja u sudskoj praksi da se odredi vrijeme komunikacije među promatranim osobama, no za određivanje međusobne komunikacije i lokacije promatranih osoba nema dubljeg značenja.

#### 7.1.2.9. Service

*Service* je usluga. U T-Mobile i Vip-net ispisima ovaj podatak je često prezentiran kao *Voice* za govornu uslugu i SMS ili MME (Mobile Management Entity) za uslugu slanja poruke. On je značajan samo za određivanje tipa komunikacije među korisnicima.

U Tele 2 ispisu ovaj se podatak prezentira s nekoliko brojeva čije je značenje:

- 0 tranzitni poziv (uglavnom iz nacionalnog *roaminga*)
- 1 odlazni poziv iz Tele 2 mreže
- 2 *roaming call forwarding* – tehnički zapis, ne trebate uzimati u obzir
- 3 *call forwarding* – preusmjereni poziv
- 4 dolazni govorni poziv u Tele 2 mrežu
- 5 odlazni SMS iz Tele 2 mreže
- 7 dolazni SMS iz Tele 2 mreže.

## 7.2. Mobilni brojevi

U prethodnom poglavlju **1. Ispisi mobilnog operatora** objasnili smo značenje nekih od mobilnih brojeva koji se javljaju u ispisu operatora. Zbog toga u ovom poglavlju nećemo ponavljati značenje tih brojeva koji su prethodno objašnjeni, a to su:

- MSISDN
- IMSI i
- IMEI.

U ovom poglavlju objasniti ćemo neke od brojeva čije je značenje nužno razumjeti kako bismo razumjeli djelovanje mobilnih sustava.

### 7.2.1. TMSI (*Temporary Mobile Subscriber Identity*)

TMSI je po svojem nazivu privremeni broj. To je broj koji je dodijeljen mobilnoj postaji kod registracije na mobilnu mrežu, a kasnije tijekom kretanja kroz mrežu mijenja se privremeni broj TMSI vremenski periodično ili kod promjene lokacijskog područja unutar mreže. Privremeni broj mobilnoj postaji dodjeljuje VLR (*Visitor Location Register*) registar (2G, 3G) ili MME (*Mobile Management Entity*) (4G i 5G) registar (registar koji bilježi sve trenutačno aktivne mobilne postaje na mreži bez obzira na to jesu li oni matični pretplatnici te mreže ili u njoj ostvaruju rad u *roamingu*). Mobilna postaja sprema privremeni broj u SIM karticu. Korisnik mobilne postaje ne može vidjeti koji mu je privremeni broj TMSI dodijeljen od strane mreže.

Mobilna postaja se tijekom generiranja poziva ili primanja poziva služi TMSI brojem umjesto IMSI-jem, a to predstavlja dodatnu zaštitu od prisluškivanja u zračnom sučelju i lažnog predstavljanja. TMSI ima lokalni značaj, mijenja se povremeno ili prilikom nekih procesa kao što je promjena lokacijskog područja. Operator određuje strukturu TMSI broja. TMSI broj ne smije biti duži od 8 znamenaka.

Pri prvom logiranju na mrežu kada TMSI još nije dodijeljen ili nije uspjela obnova položaja mobilne postaje u novoj ćeliji (*Location Updating*), koristi se IMSI broj, a sve ostale komunikacije mobilne postaje i mreže kasnije se odvijaju korištenjem TMSI broja.

Netko tko bi neovlašteno prisluškivao zračno sučelje temeljem TMSI broja ne bi mogao zaključiti o identitetu mobilne postaje koja se njime koristi. Da bi se znao identitet, trebalo bi imati podatak koji je zabilježen u VLR registru, a koji govori o tome kojem je IMSI broju dodijeljen koji TMSI broj.

### 7.2.2. IMEISV (*International Mobile Equipment Identity and Software Version*)

Ovaj broj je proširen IMEI broj (broj mobilnog uređaja). IMEISV broju su pridodane dvije znamenke. IMEISV broj je značajan pri razmjeni podataka između mobilne i bazne postaje. Na osnovi IMEISV broja BTS (bazna postaja) može raspoznati radne karakteristike mobilne postaje. Pritom se misli na njezine mogućnosti glede prijenosa podataka (*half rate*, *full rate*) ili kodne mogućnosti (vrsta kodera govora) pri prijenosu govora. Postoji nekoliko vrsta kodera od kojih su moderniji učinkovitiji te omogućuju kvalitetniji zvuk na prijemnoj strani.

IMEISV ima sljedeći format:

<b>TAC</b>	<b>FAC</b>	<b>SNR</b>	<b>SVN</b>
6 znamenaka	2 znamenke	6 znamenaka	2 znamenke

Prvih četrnaest znamenaka odgovara strukturi IMEI broja, a posljednje dvije znamenke definiraju programsku verziju kojom se mobilni uređaj koristi.

### 7.2.3. MSRN (*Mobile Station Roaming Number*)

MSRN je privremeni ISDN broj ovisan o trenutnom mjestu zadržavanja mobilne postaje. Taj broj dodjeljuje lokalni VLR ili MME (*Mobile Management Entity*) ovisno o generaciji (registar gostujućih pretplatnika, registar koji bilježi sve trenutno aktivne pretplatnike na mreži) svakoj prijavljenoj mobilnoj postaji.

MSRN možemo smatrati privremenim brojem za knjiženje mobilne postaje u određenom području. MSRN je broj usmjerenja (*routing*). To je broj pomoću kojega se pronalazi MS (mobilna postaja) u globalnom mobilnom sustavu. Broj bilježi HLR (HSS) (*Home Location Register*) registar pretplatnika matične mreže, a generira ga VLR ili MME (*Mobile Management Entity*) mreže u kojoj se mobilna postaja nalazi. Po potrebi HLR može taj broj staviti na raspolaganje za potrebe uspostavljanja komunikacija s drugim mrežama. VLR ili MME (*Mobile Management Entity*) registar, ovisno o generaciji mobilne mreže – mreže u kojoj je MS aktivan, dodijeljeni broj izdaje nakon zahtjeva koji mu šalje HLR (matične mreže). Broj služi za usmjeravanje veze prema mobilnoj postaji kada je ona u *roamingu* (kada se nalazi u stranoj mreži). U prvom slučaju, kada dođe zahtjev za uspostavljanje veze s MS-om, HLR na osnovi IMSI i MSISDN broja zatraži od VLR-a ili MME-a (*Mobile Management Entity*) valjanu *routing* adresu, to jest MSRN broj.

Pomoću MSRN broja sustav može započeti uspostavu veze s MS-om u području u kojem se MS nalazi. Taj MSRN područni VLR šalje u HLR. HLR nakon toga zna u kojem se području nalazi MS i koji aktualni MSRN ima. Pri sljedećem pozivu k MS-u upotrebljava se taj MSRN za pronalaženje mobilne postaje. Pri napuštanju područja MSRN se briše u VLR-u ili MME-u (*Mobile Management Entity*) i u HLR-u. Broj ima istu strukturu i dužinu od maksimalno 15 znamenaka kao i MSISDN.

MSRN ima sljedeći format:

<b>VCC</b>	<b>VNDC</b>	<b>SN(VMSC+VSN)</b>
2 do 3 znamenke	3 znamenke	do 10 znamenaka

- VCC - *Visitor Country Code*, broj posjećene zemlje
- VNDC - *Visitor National Destination Code*, broj područja (operatora) u kojem je posjetitelj
- SN - *Subscriber Number*, pretplatnički broj.
  - VMSC - *Visitor Mobile Switching Center*, broj MSC područja kojem pripada pretplatnik koji je u *roamingu*
  - VSN - *Visitor Subscriber Number*, individualni broj posjetitelja

### 7.2.4. LAI (*Location Area Identity*)

U PLMN [*Public Land Mobile Network*] mreži 2 i 3G mobilnog operatora svaka lokalna zona (zona koja je obuhvaćena jednim područnim kontrolerom) ima svoj hijerarhijski organiziran i međunarodno jedinstven identifikacijski broj LAI (*Location Area ID*). Da bi mobilna postaja (MS) u području neke bazne postaje (BTS) saznala gdje se nalazi, BTS šalje LAI (identitet područja) u BCCH logičkom kanalu (*Broadcast Control Channels*). Ako mobilna postaja primi nepoznati LAI (identitet područja), znači da je

promijenila lokalnu zonu, te traži obnovu podataka o svojem prebivalištu (*Location Update*). Lokacijski podatci u spremnicima HLR-a i VLR-a tada se mijenjaju. Ako se mora proslijediti poziv MS-u, može se na osnovi MSRN-a pronaći upitom kod područnog VLR-a da dobije važeći LAI, informaciju o prebivalištu MS-a, ili direktnim upitom na MME (*Mobile Management Entity*) kod 4 i 5G sustava. Na osnovi skupnog poziva (*Paging*) preko svih područnih baznih postaja jednog područja, poziv dosegne mobilnu postaju koja tada potvrdi prijem poziva tako da MSC sazna točno prebivalište MS-a i omogući prospajanje signala u njegovu ćeliju.

LAI ima sljedeći format:

<b>MCC</b>	<b>MNC</b>	<b>LAC</b>
3 znamenke	2 – 3 znamenke	do 16 bita

- MCC – *Mobile Country Code*
- MNC – *Mobile Network Code*
- LAC (*Location Area Code*) ima najviše 16 bita i može definirati maksimalno 65 536 lokalnih područja (*Location Areas*) u jednoj mobilnoj mreži PLMN (*Public Land Mobile Network*).
- 

#### 7.2.5. CGI (*Cell Global Identity*)

Svaka ćelija ima svoj jednoznačni broj unutar područja lokalne zone (*Local Area*). Sastoji se od opisanog LAI broja kojem je dodan maksimalno 16 bita dug CI broj (*Cell Identity*).

CGI ima sljedeći format:

<b>LAI</b>			
<b>MCC</b>	<b>MNC</b>	<b>LAC</b>	<b>CI</b>
3 znamenke	2 – 3 znamenke	do 16 bita	do 16 bita

- MCC – *Mobile Country Code*
- MNC – *Mobile Network Code*
- LAC – *Location Area Code* ima najviše 16 bita i može definirati maksimalno 65 536 lokalnih područja (*Location Areas*) u jednoj mobilnoj mreži PLMN (*Public Land Mobile Network*)
- CI – *Cell Identity*.

#### 7.2.6. BSIC (*Base Station Identity Code*)

BSIC služi za identifikaciju ćelija u lokalnoj zoni. BSIC sadrži 3-bitni NCC (*Network Color Code*) i 3-bitni BCC (*Base Station Color Code*). NCC identificira PLMN, ali ne identificira neminovno operatora, nego služi za identificiranje različitosti operatora s jedne i druge strane granice mobilne mreže PLMN. BCC identificira baznu postaju BTS i pomaže MS-u da razlikuje BTS dvaju operatora u graničnom području.

BSIC ima sljedeći format:

<b>NCC</b>	<b>BCC</b>
3 bita	3 bita

#### 7.2.7. LN (*Location Number*)

LN je broj koji predočuje geografsku pripadnost. Operator ga dodaje ćelijama, lokalnim zonama ili MSC/VLR zonama (kod 2 i 3G) ili MME zonama (kod 4 i 5G) utjecaja (*Service Areas*).

LN ima sljedeći format:

<b>CC</b>	<b>NDC</b>	<b>LSP</b>
-----------	------------	------------

- LSP u tom slučaju znači *Locally Significant Part*
- NDC – *Network Destination Code*
- CC – *Country Code*.

#### 7.2.8. RSZI (*Regional Subscription Zone Identity*)

Kod svakog regionalnog ućlanjenja rabi se broj regije.

RSZI ima sljedeći format:

<b>CC</b>	<b>NDC</b>	<b>ZC</b>
-----------	------------	-----------

- ZC – *Zone Code*; dušina ZC-a je dva okteta (u nekim zemljama EU-a izrazom oktet oznaćava se bajt te tako pokušava zaobići sveprisutna amerikanizacija pojmova u računalnoj tehnici)
- NDC – *Network Destination Code*
- CC – *Country Code*.

### 7.3. Zaštita privatnosti komunikacije kod mobilnih komunikacijskih sustava

Postupak zaštite privatnosti korisnika mobilne postaje detaljno je opisan u skriptama „Mobilni komunikacijski sustavi“ Veleučilišta u Splitu iz 2002. godine te ga ovdje nećemo ponavljati jer se radi o odnosu između krajnjeg termina (MS) i središnjeg dijela mreže u kojem je funkcije VLR-a većim dijelom kod 4 i 5 G preuzeo MME. Navest ćemo samo neke od najznačajnijih stavki iz ovog područja koje su ustanovljene u posljednjih dvadesetak godina.

**Mobilni komunikacijski sustavi prve generacije** (analogni mobilni komunikacijski sustavi) **nisu imali zaštitu od lažnog predstavljanja i prisluškivanja u zračnom sučelju**. Broj zlouporaba na sustavima prve generacije bio je relativno velik. Mobilni komunikacijski sustav prve generacije u Hrvatskoj, već pomalo zaboravljen, bio je NMT 450 (*Nordic Mobile Telephony*).

Kada se je krenulo u razvoj sustava mobilnih komunikacija druge generacije (digitalni mobilni komunikacijski sustavi), formirana je posebna radna skupina u okviru GSM-a (GSM – *Grupa Speciale Mobile*, što je izvorno značilo akronim koji je kasnije zadržan kao akronim naziva *Global System for Mobile communication*) MOU-SG (*Memorandum of Understanding Steering Group*).

Radna skupina imala je zadatak učiniti komunikaciju u zračnom sučelju sigurnom, otpornom na lažna predstavljanja, otkrivanje identiteta i prisluškivanje. Mehanizmi koji su ostvareni da bi se to postiglo, ostvaruju se između središnjeg dijela mreže i mobilne postaje (MS). Daljnjim razvojem mobilnih komunikacija prema 3G, 4G i 5G sustavima, postojećem središnjem dijelu mreže koja se unapređuje programski i sklopovski dodaju se nove radiomreže. To omogućuje pojavu višerodnih terminala (GSM, UMTS, LTE i 5G i dr.), ali i zadržavanje sigurnosnih mehanizama koji su razvijeni kod GSM standarda, jer se radi o odnosu između krajnjeg terminala (MS mobitela) i središnje mreže.

U zračnom sučelju mobilna postaja koristi se privremenim brojem TMSI koji joj je dodijelio središnji dio sustava. Privremeni broj vrlo se često mijenja te temeljem njega, a bez spoznaje iz središnjeg dijela sustava komu je dodijeljen privremeni broj, nije moguće identificirati pretplatnika, to jest mobilnu postaju. Komunikacija između mobilne i bazne postaje, komunikacija u zračnom sučelju kriptirana je, a složenost je kriptiranja takva da onemogućuje neovlašteno prisluškivanje u zračnom sučelju.

Ovlašteno prisluškivanje obavlja se uz pomoć operatora na središnjem dijelu sustava. Ovlašteno prisluškivanje u svakoj zemlji regulirano je odgovarajućim zakonskim propisima kojima se strogo definira tko ga provodi i pod kojim uvjetima. **Ovlašteno prisluškivanje tretira se kao smanjenje ili ograničenje osobnih sloboda građana.**

Neovlašteno prisluškivanje sustavima zaštite je otežano, ali nije nemoguće. Direktno prisluškivanje govora u zračnom sučelju, u realnom vremenu, bez intervencija u sustav moguće je korištenjem skupe opreme samo u onim mrežama koje se koriste slabijim algoritmom za kriptiranje A5/2 i/ili u onim zemljama u kojima je zabranjena prodaja kriptografske opreme.

Neovlašteno prisluškivanje moguće je i u onim zemljama koje se koriste jakim algoritmom A5/1 za kriptiranje, ali tada se vrši upad u sustav uređajima koji iskorištavaju nedostatke i nedorečenosti u standardima mobilnih mreža. Izazivač ugroze prema mobilnoj mreži nastupa kao obična mobilna postaja, a prema mobilnoj postaji (MS) predstavlja se kao lažna bazna postaja onih globalnih mreža kod kojih se ne koristi kriptiranje u zračnom sučelju. Oprema za neovlašteno prisluškivanje izuzetno je skupa i složena, i ne može se lako nabaviti. Neovlašteno prisluškivanje i praćenje ne mogu provoditi amateri, već samo bogate i moćne obavještajne službe.

### 7.3.1. Zakonska regulativa ovlaštenog prisluškivanja

Samo temeljem naloga nadležnog suda u Republici Hrvatskoj, MUP, najčešće na inicijativu Državnog odvjetništva, provodi prisluškivanje određenih «brojeva» i osoba. Tako prikupljen materijal može se rabiti u predistražnom ili istražnom postupku i tretira se kao sudski dokaz. Kako ovako prikupljeni materijali govore o privatnosti nadziranog pojedinca, o njegovu privatnom životu i u onim segmentima koji nisu u svezi s inkriminiranom radnjom, ovi se materijali smatraju službenom tajnom, dakle ne smiju se publicirati.

Zakonom o Elektroničkim komunikacijama Republike Hrvatske od 24. lipnja 2008. godine, člankom 110., stavkom (3) operatorima je «**Zabranjeno zadržavanje podataka koji otkrivaju sadržaj komunikacije**». Operatori instaliranom opremom za «prisluškivanje» ne obavljaju prisluškivanje ni snimanje, već to omogućuju nadležnim službama. Ovim zakonom, člankom 109. i člankom 110., definirani su prometni podatci koje čuva operator (ispisi poziva) i **obveza operatora da podatke o prometu čuva godinu dana od obavljene komunikacije**. Ti se podatci mogu dati ovlaštenim tijelima Republike Hrvatske uz predočenje sudskog naloga. Bez naloga suda mogu se dati krajnjem korisniku, ali se ne mogu davati trećoj pravnoj ili fizičkoj osobi.

Prvog lipnja 2003. godine stupila je na snagu **Uredba o obvezama iz područja nacionalne sigurnosti Republike Hrvatske za pravne i fizičke osobe u telekomunikacijama** koju je donijela Vlada Republike Hrvatske.

**Uredbom se uređuje područje tajnog nadzora telekomunikacija u Republici Hrvatskoj, u skladu s rezolucijom Vijeća Europske unije o zakonitom tajnom nadzoru telekomunikacija i odgovarajućim normama i preporukama Europskog instituta za telekomunikacijske norme – ETSI.**

Po navedenoj uredbi telekomunikački i mrežni operatori, te davatelji usluga i pristupa, obvezni su o vlastitom trošku ugraditi uređaje za tajni nadzor u svoje mreže, te osigurati njihovo trajno održavanje i ispravan rad za potrebe Operativno-tehničkog centra za nadzor telekomunikacija. Također, osim sadržaja telefonskih poziva, dužni su dati i sve ostale tražene podatke o pozivima (vremena i datumi, uspostave ili pokušaji uspostave poziva, prekidi poziva, promjene statusa, usluge, lokacije i sl.) uključujući identifikacijske i lokacijske podatke o telefonima i njihovim vlasnicima, što uključuje i uvide u baze podataka. Sve podatke moraju čuvati snimljene, **a sva saznanja o sredstvima, postupcima i podatcima promjene mjera tajnog nadzora obvezni su čuvati kao državnu tajnu**. Uz sve to moraju osigurati da nadzirana ili bilo koja druga neovlaštena osoba ne osjeti bilo kakvu promjenu koja bi mogla biti uzrokovana primjenom tajnog nadzora. Tako uz različite "lovce" koje državni službenici upotrebljavaju, sada su i hrvatski koncesionari telefonskih mreža obvezni, na zahtjev ovlaštene osobe, staviti na raspolaganje tehnička sučelja i pružiti pomoć sudu, državnom odvjetništvu, policiji i vojsci u ostvarivanju njihova nadzora komunikacije korisnika usluge.

Druge države također imaju takve ili slične odredbe. Zahvaljujući takvim zakonima, pojam "prisluškivanje" gubi izvorni smisao.

Osim sadržaja komunikacije lako se utvrđuju i lokacijski podatci. Svaki mobitel odašilje periodično (na zahtjev mreže i/ili uspostave bilo komunikacije u dolasku ili odlasku) svoj IMEI, tj. 14-znamenasti identifikacijski broj mobilnog uređaja, neovisno o SIM kartici koja je u njemu. Na osnovi kašnjenja signala i/ili primljene snage do triju najbližih baznih postaja može se vrlo precizno odrediti zemljopisni položaj. Na tome se također temelje usluge operatora kao što su odgovori na upit: *Gdje je najbliža ljekarna?* i sl.

U svrhu prisluškivanja od tajnih državnih služba mobitel se može "aktivirati" iz «centrale – operativnog sustava za nadzor i održavanje mreže», te se može bilježiti sadržaj privatnih i poslovnih razgovora koje korisnik vrši u svojoj neposrednoj okolini, bez znanja korisnika. **Krajnji korisnik jedino može obratiti pozornost na prekomjerno i prebrzo trošenje baterija, jer je to jedini indikator da se nešto događa.**

Napomena autora: Prekomjerno trošenje baterije, brže nego uobičajeno događa se često kada se nalazimo u ruralnim sredinama i daleko od baznih postaja. Tada je svaka komunikacija mobilna bazna postaja s višom razinom snage nego što je to u sredinama gdje je gušća ćelijska struktura. Mobilna i bazna postaja dogovaraju se o razini snage komunikacijskog signala; što je ćelijska struktura gušća, mobiteli koriste nižu izlaznu snagu, a rezultat je duži vremenski period između dvaju punjenja baterije. Samo kada se prebrzo pražnjenje baterije mobilnog uređaja događa upravo u onom okruženju u kojem se to prije nije događalo, tada je to indikator daljinskog nazora iz središta mreže. Do bržeg trošenja baterije mobitela također može doći zbog degradacije karakteristika baterije s vremenom ili zbog upada virusa koji angažiraju najčešće beskoristan rad mobitela što se uz povećano trošenje baterije očituje i otežanim radom mobitela.

Jedina sigurna zaštita od «ovlaštenog» prisluškivanja jest isključivanje mobilnog uređaja. Nije potrebno vaditi bateriju, dovoljno je isključiti mobilni uređaj.
--

### 7.3.2. Neovlašteno prisluškivanje i sigurnost mobilnih komunikacijskih sustava

Suvremene 3G, 4G i 5G mreže nisu zasebne i u cijelosti odvojene mreže. Mreža nove generacije ostvaruje se tako da se nova radijska mreža (novi radijski podsustav) dodaje na središnji dio sustava.

Svi sigurnosni mehanizmi u mobilnim komunikacijama nisu ovisni o tipu radiosučelja (vrsti i generaciji radijske mreže), već su definirani procedurama u središnjem dijelu sustava i mobilnoj postaji. To omogućuje da imamo višemodne terminale, koji mogu raditi kao GSM (900 MHz, 1800 MHz), UMTS (900 MHz, 2100 MHz), LTE (800 MHz, 1800 MHz), 5G (700 MHz, 3,6 GHz, 26 GHz), gdje mod rada ovisi o pokrivanju pojedinog područja, ali i o potrebama krajnjeg korisnika. Sigurnosne procedure ostaju iste, to jest nepromijenjene s obzirom na drukčije modove rada u zračnom sučelju.

U ranijoj fazi razvitka Europskoga mobilnog radiosustava 2G GSM uočeno je da je sigurnost bitno pitanje koje treba riješiti (**mobilni sustavi prve generacije nisu imali dovoljno razrađenu zaštitu od lažnog predstavljanja i nisu imali nikakvu zaštitu od prisluškivanja signala u zračnom sučelju**).

Zbog toga je osnovana stručna skupina, MOU-SG (*Memorandum of Understanding Steering Group*), kojoj je bio cilj unošenje takvih značajka u sustav koje će ga zaštititi od zamijećenih prijetnja. Najslabija točka sustava bila je **radiostaza** koju se lako moglo prisluškivati pomoću radiouređaja. Postojala je također potreba za identifikacijom korisnika sustava, da se njime ne bi mogli koristiti oni koji nisu pretplatnici.

*Javna zemaljska mobilna mreža, PLMN (Public Land Mobile Network)*, treba višu razinu zaštite negoli tradicionalne telekomunikacijske fiksne mreže, pa je trebalo u sustav unijeti sigurnosne značajke. **Cilj je bio učiniti radiostazu jednako sigurnom kao kod fiksnih telefonskih mreža.** Operatori sustava su željeli osigurati naplaćivanje usluga pretplatnicima i onemogućiti prisluškivanje privatnih razgovora od neovlaštenih osoba.

**Danas postoje četiri osnovne sigurnosne usluge koje pruža mobilna mreža:**

- usluga osiguravanja anonimnosti, što se ostvaruje dodjeljivanjem *privremenog identiteta (broja mobilnog pretplatnika, TMSI (Temporary Mobile Subscriber Identity)*

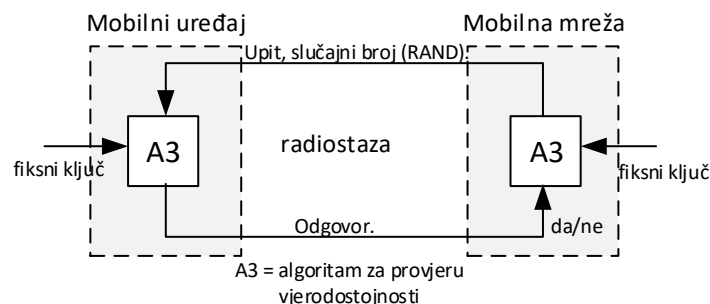


- provjera vjerodostojnosti (*Authentication*)
- šifriranje (*Ciphering*), tj. zaštita govora i podataka u svakoj komunikaciji od prisluškivanja modulacijskim šifriranjem uz korištenje uvijek nanovo generiranog kriptografskog ključa i matematičkog algoritma poznatog pod oznakom A5 (A5/1 i A5/2)
- provjera identiteta mobilne opreme (ME ID) i SIM modula (kartice).

Anonimnost podrazumijeva uporabu privremenog broja za MS postaju. *Međunarodni identitet* (broj mobilnog pretplatnika, *IMSI* (*International Mobile Subscriber Identity*, na primjer 21901xxxxxx za T-Mobile pretplatnika), mora se zaštititi što se obavlja dodjeljivanjem **privremenog broja mobilnom pretplatniku (TMSI)**. **TMSI generira** VLR (*Visitor Location Register* – baza podataka ili registar koji bilježi sve trenutačno aktivne korisnike na mreži, matične korisnike i one u *roamingu*) ili MME (*Mobile Management Entity*). TMSI broj se pohranjuje u SIM modulu (kartici), a ujedno predstavlja i rutu za slanje poziva k mobilnoj postaji.

Kada MS postaja (mobitel) prvi put uključuje svoj radijski prijamnik u novom području, mobilna postaja se predstavlja IMSI brojem, a privremeni TMSI broj njoj dodjeljuje VLR ili MME registar (ovisno o generaciji) tek nakon provjere vjerodostojnosti. Od toga se trenutka privremeni pretplatnički TMSI broj upotrebljava za svaku komunikaciju između MS postaje i mreže.

Postupak provjere vjerodostojnosti obavlja mreža zbog zaštite od neovlaštene uporabe. Pritom se rabi tehnika koja se može opisati kao *upit i odgovor*. Taj je postupak prikazan na slici 7.3.1. Pri tome se koristi fiksni ključ koji je upisan u SIM kartici i u mobilnoj mreži, a mreža kasnije generira kriptografski ključ koristeći algoritam A8 i RAND broj.



Slika 7.3.1. Postupak provjere vjerodostojnosti

### 7.3.3. Neovlašteni pristup mobilnoj komunikaciji

#### 7.3.3.1. Duljina ključa i mogućnosti prijave

Pretpostavimo da posjedujemo uređaj za razbijanje šifri koji ima mogućnost obrade milijun kombinacija u sekundi (milijun šifri u sekundi). Uz primjenu takva uređaja vrijeme potrebno za razbijanje šifri ovisilo bi o duljini šifre ili ključa šifre. Uzimajući u obzir da je efektivna duljina šifre 40 bita (inače je 64, no zbog pritiska jakih svjetskih obavještajnih služba na proizvođače mobilne opreme efektivna duljina ključa smanjuje se zamjenom posljednja 34 bita ključa nulama), dobije se mnogo kraće vrijeme za razbijanje šifre.

Iz tabličnog prikaza razvidno je zašto nije lako prisluškivati tuđi račun korisnika usluge.

Tablica 7.3.1. Vrijeme potrebno za razbijanje šifre uređajem brzine milijun kombinacija u sekundi za različite duljine kriptografskog ključa uz uporabu algoritma A5/1

Duljina ključa	Potrebno vrijeme
32 bita	79 minuta
40 bita	12,7 dana
56 bita	2,291 godina
64 bita	584,542 godina
128 bita	10,8 x 10 <sup>24</sup> godina

Mobilni sustav ne predstavlja savršenu mrežu. Tijekom osmišljavanja sigurnosnih standarda za rad mobilnih sustava dogodilo se je nekoliko propusta ili, bolje rečeno, previdi i oni se značajno koriste za potpuno tajno prisluškivanje ili druge upade u mobilnu mrežu.

**Prvi propust** je taj što se prilikom pristupa sustavu pretplatnik ne provjerava u bazi aktivnih pretplatnika. Ne provjerava se je li on već prijavljen ili nije, **dakle moguće je kloniranom SIM karticom ili karticama izvršiti višestruku prijavu u sustav.**

Tajno prisluškivanje mobilne postaje (samo u dometu jedne bazne postaje) omogućuje jedan **drugi (prešućivani) propust** u mobilnom sustavu. Mobilna mreža je globalni sustav, a zakoni o komunikacijama i njihovoj kriptozastiti nisu u svim zemljama jednaki. **Tako u mnogim zemljama istočne Europe i Bliskog istoka, na zahtjev tajnih služba, nije dopuštena uporaba jakog A5/1 algoritma, nego slabijeg A5/2, što postavlja mnogo manje tehničke i vremenske zahtjeve za njihovo razbijanje.** U neke zemlje (primjerice one pod sankcijama međunarodne zajednice) **nije dopušten uvoz nikakve kriptografske opreme**, pa su samim time i komunikacije preko njihovih mobilnih mreža potpuno nezaštićene. Potencijalni prisluškivač to može iskoristiti uz još jedan tehnički propust u sustavu, a to je da nije predviđena autorizacija baznih postaja. U sustavu se može pojaviti nova bazna postaja koja se na sustav prijavljuje preko postojeće bazne postaje i prema njoj se predstavlja kao mobilna postaja, a za mobilne postaje u svojem okruženju predstavlja BP.

Ako takva lažna bazna postaja pošalje mobitelima u svojem okruženju poruku da su u Iranu, oni automatski isključuju kriptozastitu te omogućuju prisluškivanje. Dizajneri mobilnih standarda nisu na vrijeme predvidjeli te mogućnosti te bi danas preinake na sustavima diljem svijeta stajale milijune dolara. Ili je to barem službeno opravdanje.

### 7.3.3.2. Mobiteli s dodatnom zaštitom od prisluškivanja

Danas su na tržištu raspoloživi mobilni uređaji koji imaju dodatnu zaštitu za kriptiranje ili dodatni kriptografski modul. Takvi mobilni uređaji kupuju se u paru ili se kupuje veći broj identičnih komada. Kada ovakav mobilni uređaj ostvaruje komunikaciju preko mobilne mreže s nekim drugim mobilnim uređajem ili fiksnim telefonom, dodatni se kriptografski modul ne koristi i stupanj zaštite u zračnom sučelju je kao što je prethodno opisano. Međutim, kada se ovakvim mobilnim uređajem preko mobilne mreže poziva uređaj koji također ima kriptografski modul, dakle kada komunicira uređeni par takvih uređaja, tada se aktivira (automatski ili manualno) dodatni kriptografski modul. Dodatni kriptografski modul u međusobnoj komunikaciji na vrlo sličan način generira kriptografske ključeve za komunikaciju

koji su duljine 1024 bita. U navedenom slučaju komunikacija nije kriptirana samo u zračnom sučelju, nego i u komunikaciji s kraja na kraj, to jest od jednoga do drugog mobilnog uređaja. Kriptiranjem nisu obuhvaćene signalizacijske informacije, već komunikacija s jednoga na drugi mobilni uređaj.

Ovakve mobilne uređaje nije moguće ni ovlašteno prislušivati, dakle uz pomoć operatora. Prislušivanje koje bi se odvijalo na središnjem dijelu sustava za rezultat bi imalo snimanje kriptirane, dakle zaštićene informacije.

### 5.3.3.3. Neželjeni programi u mobilnim uređajima

Suvremeni mobilni telefonski uređaji u procesorskom smislu postaju sve snažniji i snažniji. Osim komunikacije koju ostvaruju preko mobilnih mreža, gotovo redovito imaju mogućnost pristupa internetu i preko WLAN-ova. Kada mobitel pristupi bilo kakvoj komunikaciji preko WLAN-a, sve metode zaštite koje su razvijene za pristup preko mobilne mreže u cijelosti su neaktivne.

Navedena činjenica otvara čitav niz novih mogućnosti, novih usluga i pruža visoki komoditet u korištenju. Međutim, to nosi sa sobom i čitav niz novih opasnosti. Uz željenu programsku podršku u mobilni uređaj se može neprimjetno useliti i neželjeni program ili programi koji u većoj ili manjoj mjeri špijuniraju rad s mobilnim uređajem.

Na primjer, pri «skidanju» raznih igrica mobitelom s interneta, pogotovo kada se one besplatno nude, uz željenu programsku podršku za igrice može se useliti i neželjena programska podrška koja špijunira rad našeg mobilnog uređaja. Dakle, bez našeg znanja na određene adrese na internetu šalje prethodno pohranjene podatke o radu korisnika. Ti podatci mogu biti od praćenja lokacija na kojima se krećemo do praćenja svih naših komunikacija, s kim razgovaramo, s kim razmjenjujemo poruke, pa sve do samog sadržaja naših komunikacija.

Takve maliciozne programe, također bez našeg znanja, može nam ubaciti netko komu smo tek za trenutak posudili mobilni uređaj da nešto pogleda.

Za instalaciju ovakvih malicioznih programa posebno su prikladni Iphoni i razne njihove inačice, a praćenje kretanja sasvim je zagarantirano ako je u mobilnom uređaju integriran i GPS lokator, što je danas vrlo čest slučaj.

Da bismo se zaštitili od ovakvih neželjenih programa, jedino je rješenje da mobilni uređaj bude što jednostavniji i s niskom procesorskom snagom, dakle uređaj koji omogućuje samo najosnovnije, slanje poruka i telefoniranje. Osobito su opasni oni uređaji koji imaju mogućnost da se za pristup internetu koriste drugim mrežnim tehnologijama, kao što je pristup preko bežičnog LAN-a. Često neželjeni programi i sami aktiviraju ovakav pristup da bi poslali prikupljene podatke.

Neželjeni programi u mobilnim uređajima mogu biti i takvi da se nakon nekog vremena i sami deaktiviraju i obrišu te se i naknadnim detaljnijim pregledom mobilnih uređaja ne može otkriti da su prethodno bili prisutni.

## 7.4. Mobilna oprema

MS (*Mobile Station*) jest mobilni aparat koji se sastoji od uređaja ME (*Mobile Equipment*) i SIM (*Subscriber Identity Module*) kartice koja formira korisnički identitet.

### Funkcije MS postaje

Osnovna je funkcija MS postaje da osigura prijam i predaju govora i podataka preko zračnog sučelja mobilnog sustava. Pri izvršavanju tog osnovnoga zadatka MS postaja obavlja kodiranje i dekodiranje govora, zaštitu od pogrešaka, šifriranje i dešifriranje, moduliranje i demoduliranje signala. Lista važnih funkcija MS postaje uključuje:

- prijenos govora i podataka
- frekvencijsku i vremensku sinkronizaciju
- motrenje kakvoće i snage signala ćelija koje okružuju MS postaju radi optimalnog funkcioniranja mobilne postaje (motrenje okruženja)
- određivanje položaja MS postaje u mreži
- za 2 i 3G poništavanje smetnja nastalih zbog višestaznog prostiranja radio signala
- prikazivanje poruka svih vrsta.

Pri prijenosu govora ili podataka MS postaja mora biti sinkronizirana na mobilnu mrežu. Kako bi se ostvarila sinkronizacija, MS postaja automatski bira i sinkronizira frekvenciju i vremenski odsječak BCCH kanala. Dakle, imamo vremensku i frekvencijsku sinkronizaciju mobilne postaje na mrežu.

MS postaja motri kakvoću signala, tj. automatski određuje učestalost pogrešno primljenih bitova (BER) za poznatu prijamnu snagu sinkronizirane sekvence. MS postaja mjeri i uspoređuje signale od najmanje šest susjednih baznih postaja (često i znatno više). Rezultate mjerenja MS postaja šalje područnom BSC kontroleru ili MME-u, ovisno o generaciji sustava. Sustav područnog kontrolera ili MME kasnije rabi ove informacije prilikom slanja poziva MS postaji.

MS postaja odašilje podatke o svojem položaju u mobilnoj mreži čak i onda kada nije aktivna u smislu slanja poziva ili govornih informacija. Na taj način mobilni sustav zna u kojoj se PLMN mreži, u području kojega MSC središta ili MME-a (4G i 5G) i u području kojega BSC kontrolera trenutno nalazi MS postaja.

MS postaja, osim toga, prihvaća i sprema alfanumeričke poruke koje u svakom trenutku može prikazati na svojem *zaslonu s tekućim kristalima, LCD (Liquid Crystal Display)*.

MS postaja u tijeku svojeg rada mjeri sve radijske kanale koje odašilju bazne postaje u njezinu okruženju. Mjerenja koje obavlja mobilna postaja odnose se na kvalitetu i jačinu radijskih BCCH kanala (*broadcast* kanali koje mobilna postaja prepoznaje po najvišoj razini snage i preko kojih prima informacije o PLMN mreži kojoj BTS-ovi pripadaju, broj bazne postaje i druge informacije relevantne za rad na sustavu). Izmjereni podatci u radijskom okruženju dostavljaju se u sustav.

MS postaja mjerenja provodi u stanju rada, ali i u stanju pripravnosti. Mjerenja u stanju pripravnosti počinju prilikom uključivanja MS-a. Nakon uključivanja MS traži najjači signal u svim frekventnim područjima te analizira je li to BCCH kanal.

### 7.4.1. Mobilni uređaji

U europskom sustavu postoji više kategorija mobilnih uređaja koje se međusobno razlikuju glede najveće dopuštene izlazne snage i frekvencijskog područja rada. Za sustave 2G pri ugradnji mobilnih uređaja u vozila dopuštale su se maksimalne izlazne snage od 8 W (39 dBm), a postojale su još dvije klase ugradbenih mobilnih uređaja od 1 W (30 dBm) i 0,25 W (24 dBm). Za ručne mobilne postaje 2G definirale su se tri klase s maksimalnom izlaznom snagom 5 W (37 dBm), 2 W (33 dBm) i 0,8 W (29 dBm). Te su klase postavljene temeljem iskustva mobilnih uređaja iz 1G, a za puno gušći ćelijski sustav 2G i sljedećih generacija pokazale su se previsoke. Mobilni uređaji 4G i 5G mogu dati najviše izlazne snage 23 dBm što znači 0,2 W.

MS postaje često se izvode s mogućnošću smanjivanja razine snage u koracima od 2 dB i to od nominalne vrijednosti sve do 20 mW (13 dBm). Smanjivanje razine snage obavlja se automatski, pri čemu sudjeluju i MS i BTS postaje kako bi se postigla najmanja razina snage MS predajnika potrebna za pouzdani prijenos, odnosno najmanja istokanalna interferencija. Automatsko prilagođavanje razine snage MS postaje daljinski je vođeno od sustava koji prati primljenu snagu i prilagođava MS predajnik na najmanju snagu.

Danas postoji velik broj različitih mobilnih uređaja. Ti uređaji najčešće rade kao višemodni terminali GSM 900, GSM 180, GSM 1900, UMTS 2100, UMTS 900, LTE 1800, LTE 800, LTE 2600, 5G 700, 5G 3600 i 5G 26000. Mobilna mreža PLMN na središnji dio sustava može povezivati i povezuje više različitih radiomreža. Kako su sve radiomreže vezane na isti središnji dio sustava, moguće je da mobilni uređaj tijekom rada kao mobilna postaja promijeni više modova rada, promijeni rad na različitim mobilnim radiomrežama po generaciji i frekvenciji, a da pri tome ne dođe do prekida komunikacije. Zapisi ovih komunikacija su jedinstveni, a u tim zapisima mobilni uređaj ME preko kojega je izvršena komunikacija odlikuje se jedinstvenim IMEI brojem.

U forenzičnoj analizi mobilnih uređaja može se ići dosta duboko, što ovisi i o složenosti mobilnih uređaja. Osnovna je karakteristika mobilnog uređaja da ima vlastitu memoriju. Ta memorija može biti osnovna, integrirana u sam uređaj, a može biti i dodatna, koja se realizira preko memorijske kartice koja se umetne u mobilni uređaj na odgovarajuće mjesto. Često se radi o istim memorijskim karticama kojima se koriste i digitalni fotoaparati ili drugi elektronički uređaji.

U samom mobilnom uređaju mogu biti zabilježeni podatci kao što su:

- telefonski imenik koji formira sam korisnik, s nazivima i telefonskim brojevima kojima se korisnik mobilnog aparata služi (u memoriji mobilnih aparata mogu se smjestiti znatno veći telefonski imenici nego oni koji stanu na SIM karticu)
- zabilješke o primljenim, poslanim i propuštenim pozivima s podacima o telefonskim brojevima i vremenu u kojem su se dogodili
- zabilješke o primljenim i poslanim SMS i MMS porukama
- WhatsApp poruke
- skup ponuđenih i vlastito kreiranih tipiziranih poruka za slanje
- brojač ukupnog broja poslatih i primljenih poruka
- slike i drugi osobni podatci koji mogu biti pohranjeni u mobilnom uređaju na memorijskoj kartici a nemaju svoj izvor u mobilnoj komunikaciji
- različiti lokacijski podatci i drugo.

Svaki mobilni uređaj ovisno o proizvođaču ima drukčiju programsku podršku koja ga podržava i često zahtijeva drukčiji programski alat za automatsko iščitavanje i ispisivanje navedenih podataka. Također,

svaki mobilni uređaj ima drukčiju konekciju (konektorsko polje) za pristup mobilnom uređaju i prebacivanje ovih podataka na osobno računalo.

Danas postoje profesionalni uređaji koji omogućuju automatsko čitanje podataka iz velikog broja različitih mobilnih aparata. Obično ovakva profesionalna oprema ima velik broj različitih vrsta konektorskih kabela za spoj na različite tipove i vrste mobilnih uređaja od različitih proizvođača. Ovakva profesionalna oprema vrlo brzo zastarijeva jer se stalno na tržištu javljaju novi i sve složeniji mobilni uređaji. U programskom dijelu ona se može nadograđivati, ali potrebna je nadogradnja i u fizičkom smislu s novim prespojenim kabelima koji terminiraju s novijim tipovima i vrstama konektora. Oprema za čitanje memorijskog sadržaja u mobilnim uređajima jest i vrlo skupa i često se koristi samo na visoko profesionalnoj razini, a cijena joj se kreće od stotinu do više stotina tisuća eura.

Sve ove podatke mobilni uređaji mogu pokazati i na svojim prikazivačima. Moguće ih je i ručno prepisati u svrhu forenzične analize, ali to iziskuje vrijeme i strpljenje. Za svaki mobilni uređaj moguće je nabaviti i konektorski kabel koji za stranu PC-a terminira s USB ulazom. Također, za svaki mobilni uređaj moguće je preko interneta potražiti i odgovarajuću programsku podršku koja će omogućiti čitanje njegovih memorijskih podataka. Renomirani proizvođači mobilne opreme preko interneta nude takve programske pakete, ali oni najčešće nisu besplatni jer se podrazumijeva da se koriste u profesionalne svrhe, te da se mogu iskoristiti i komercijalno, na primjer za prebacivanje podataka kao što je telefonski imenik sa staroga na novi mobilni uređaj i slično.

IMEI broj mobilnog uređaja najčešće piše u samom uređaju, ali se može i programski očitati. IMEI broj mobilnog uređaja pojaviti će se na prikazivaču aktivnog mobitela ako se upiše sljedeći kod: \*#06#. IMEI broj je detaljno objašnjen u dijelu Ispisi mobilnog operatora.

U svakom mobilnom uređaju postoje funkcije koje on mora posjedovati, dakle koje su obvezne i one koje mogu varirati od proizvođača do proizvođača, dakle neobvezne su. U posljednje vrijeme velik broj pametnih telefona za svoje pokretanje traži numeričku šifru. Šifru određuje korisnik i samo on o njoj ima podatak. Skidanje šifre moguće je samo reinstaliranjem cjelokupne programske podrške mobilnog aparata, ali tada se gube svi podatci u memoriji.

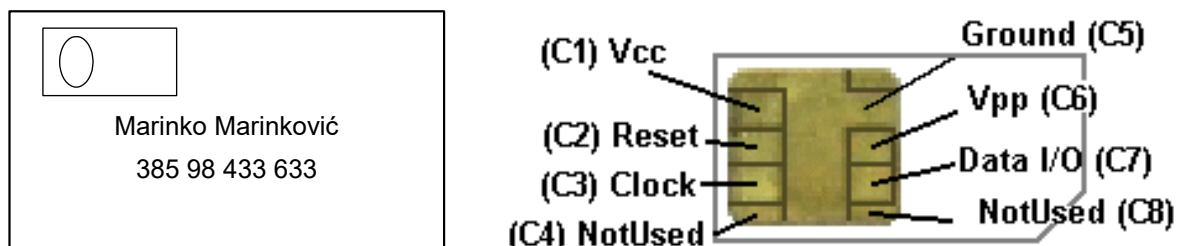
Obvezne funkcije mobilnog uređaja, među ostalima, jesu:

- slanje DTMF-a (tonski kodirani poziv)
- indikacija o uspjehu kod poslanog poziva ("veza se uspostavlja" ... ili sl.)
- obavijest o zemlji ili PLMN-u
- jačina signala (indikacija može biti i najčešće jest grafička)
- prekidanje veze ako za vrijeme razgovora odstranimo SIM karticu
- ME mora na zahtjev PLMN-a poslati IMEI broj
- podrška opisanog A5 algoritma
- SMS podrška
- odbijanje SMS-a ako je memorija za pohranu puna
- poziv spasilačkih služba (*Emergency Call*), u slučaju nevolje i bez SIM kartice ili sa SIM karticom, ali bez prava kod područnog operatora.

#### 7.4.2. SIM kartica (*Subscriber Identity Module*)

SIM kartica je pametna kartica (*Smart Card*) koja osigurava identifikaciju pretplatnika u mreži različitu od identifikacije mobilnog uređaja ME koji također ima svoj identifikacijski broj (IMEI). Mobilni se pretplatnik identificira u mobilnom sustavu onog trenutka kada ubaci SIM karticu u mobilnu opremu

ME. Kada pretplatnik ide na put, može ponijeti sa sobom samo SIM karticu i u bilo kojoj zemlji, u kojoj postoji mobilna mreža, može iznajmiti bilo koju mobilnu opremu i u nju ubaciti SIM karticu. Mobilna mreža točno će ju identificirati i svi telefonski računi dospjet će na njezin broj. Takav način rada omogućuje veliku fleksibilnost i u potpunosti personalizira komunikaciju koja nije pretplatničkim brojem vezana za krajnju opremu, nego za pretplatnika.



Slika 7.4.2.1. SIM kartica i prikaz priključaka SIM kartice

SIM kartica ima čip visokog stupnja integracije koji, među ostalim, sadrži:

- mikroprocesor
- memoriju sa slučajnim pristupom, RAM (Random Access Memory)
- memoriju samo za čitanje, ROM (Read Only Memory).

Funkcije koje ostvaruje SIM kartica važne su za mobilni sustav, jer upravo ona identificira pretplatnika. Kako bi se spriječila zlouporaba kartice, ona ima i osobni identifikacijski broj. Kada se SIM kartica postavi u mobilnu opremu, ME, za ostvarivanje ostalih funkcija MS postaje, ona obvezno zahtijeva da se ukuca osobni identifikacijski broj, PIN (Personal Identification Number).

SIM kartica je mikročip koji je ugrađen u veliku plastičnu karticu (ID-1SIM) ili je izveden na maloj plastičnoj pločici površine približno 1 cm<sup>2</sup>. Dakle, mogu postojati dvije verzije SIM kartice, što i prikazuje slika 7.4.2.1. Mobilni telefoni (MS postaje) ne mogu se upotrebljavati bez ubačene SIM kartice, osim u slučaju hitnog poziva, tj. poziva hitne službe. Nema razlike u funkcijama ako je SIM kartica izvedena u veličini kreditne kartice ili ako se radi o maloj pločici koja se umeće u mobilnu opremu, ili o takozvanoj mikro SIM kartici. Jedina je razlika između ovih izvedaba u veličini ukupne kartice (ne mikročipa). Pojedini operatori u svijetu nude identične SIM kartice u više izvedaba. Velika SIM kartica (veličine kreditne kartice) može se upotrebljavati za pojedine vrste mobilne opreme koja se ugrađuje u vozilo ili može poslužiti za umetanje u fiksnu opremu.

Tablica 7.4.2.1. Najvažniji podatci koji su sadržani u SIM kartici

Parametar	Opis
<b>Administrativni podatci</b>	
PIN/PIN2 (m/v)	Osobni identifikacijski broj koji se zahtijeva pri svakom uključivanju MS postaje (PIN ili PIN2)
PUK/PUK2 (m/f)	PIN za otključavanje koji se zahtijeva pri svakom otključavanju SIM kartice
SIM uslužna tablica	Lista opcijских funkcija SIM kartice
Posljednji birani broj (o/v)	Rabi se pri ponovljenom biranju
Podatci o napajanju	Posljednje vrijeme punjenja baterije

Jezik (m/v)	Definira jezik na zaslonu MS postaje
<b>Sigurnosni podatci</b>	
Algoritmi A3 i A8	Rabe se pri provjeri vjerodostojnosti pretplatnika u AuC središtu
Ključ Ki	Vrijednost ovoga ključa zna samo SIM kartica i HLR registar
Ključ Kc	Taj je ključ rezultat uporabe algoritma A8, ključa Ki i slučajnog broja RAND
CKSN	Ključ za šifriranje sigurnosnog broja
<b>Pretplatnički podatci</b>	
IMSI	Međunarodni broj MS postaje
MS ISDN	ISDN broj MS postaje, izravni broj pretplatnika
Nadzor pristupa	Za nadzor pristupa mreži
<b>Podatci značajni za uslugu <i>roaminga</i></b>	
TMSI	Privremeni identitet MS postaje
Vrijednost od T3212	Podatci vezani za položaj MS postaje
Status obnavljanja podataka o položaju	Zahtijevanje podataka o položaju MS postaje
LAI	Informacija o LA području (BSS) gdje se prijavila MS postaja
Mrežni kodovi (NCC)	Nakon neuspješnog lociranja BTS postaje zapisuju se podatci o mreži. Najviše se mogu zapisati četiri podatka o mrežama PLMN.
<b>Podatci mreže PLMN</b>	
NCC (mrežni kôd ) MCC (mobilni kôd zemlje, pozivni broj zemlje, primjerice 00-385) MNC (kôd mobilne mreže, tj. pozivni broj mreže 098)	Identifikacija mreže
Apsolutni broj RF kanala koji rabi vlastiti PLMN	Frekvencije za koje je vlastita PLMN mreža registrirana

Osnovna je zadaća SIM kartice pohranjivanje podataka. Međutim, podatci koji se mogu pohraniti u SIM kartici nisu samo pretplatnički podatci. Najvažniji parametri SIM kartice dani su u tablici 7.4.2.1.

SIM kartica (*Subscriber Identity Module*) daje MS postaji identitet, bez SIM kartice MS postaja nije funkcionalna. SIM kartica (*Smart Card*) ima svoj mali procesor i memoriju za pohranu fiksnih, privremenih i servisnih podataka. Pod fiksnim podatcima razumijevamo takve kodove koji su pohranjeni prije prodaje aparata sa SIM karticom. To su IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*) broj, ključ za autentificiranje Ki te algoritmi za sigurnosne procedure šifriranja. Proces autentifikacije provodi se vrlo često, a smisao je ustanovljavanje identiteta MS-a pri slanju ili primanju poziva. Sustav



vodi brigu o tome da pozive pogreškom ne primi pogrešna MS postaja. Privremeni podatci mogu biti LA (*Location Area*), dopušteni PLMN itd. Servisni podatci mogu biti definicija jezika na zaslonu i sl.

SIM podržava sljedeće sigurnosne značajke i podatke:

- Algoritam A3.
- Fiksni kod ili ključ Ki.
- Algoritam A8 za generiranje *ciphering* koda. *Ciphering* je proces kontinuiranog šifriranja SVIH podataka koje MS odašilje. Isto to čini i BTS kada šalje signale MS-u. Kako su ključevi za šifriranje poznati samo MS-u i BTS-u, prisluškivanje tuđih razgovora znatno je otežano i bez dodatne opreme u pravilu nije moguće.
- *Ciphering* ili kriptografski ključ Kc.
- Kontrola pristupa podacima i obrada podataka u SIM kartici.

Kod pohranjenih podataka razlikujemo obveznu (*Mandatory Storage*) i dodatnu pohranu.

Pod obveznom pohranom možemo nabrojiti ove podatke:

- Administrativni podatci (opisuju npr. način rada SIM kartice).
- **IC identifikacija kartice, jedinstveni broj SIM kartice i njezina izdavača.**
- SIM tablica s dodatnim uslugama, npr. pohrana posljednjega biranog broja, dužine poziva, selekcije PLMN-a itd.
- IMSI broj.
- LA, informacija o području gdje se MS nalazi.
- Ključ Kc i njegov broj sekvence koji se mogu obnavljati nakon svakog poziva. Komunikacija između MS-a i BTS-a odvija se u vremenskim odsječcima u kojima se prenosi jedan *burst*. Svaki taj vremenski okvir ima svoj broj, zovemo ga broj sekvence, a on služi zajedno s ključem Kc za *ciphering* šifriranje.
- Popis frekventnih nositelja koje MS treba pri izboru BTS-a i prelasku pod okrilje novog BTS-a.
- Nedopuštene PLMN mreže.
- Upotrebljavani jezik na zaslonu.

U sigurnosne mjere spada pohrana ovih podataka:

- osobnoga identifikacijskog broja PIN (*Personal Identification Number*)
- indikatora PIN-a, PIN je dopušten ili nije dopušten
- brojača pokušaja uporabe PIN-a
- PIN *unlock key* (PUK)
- brojača pokušaja uporabe PUK-a
- ključa Ki.

PIN je broj kojim aktiviramo aparat nakon uključjenja. Ako tri puta upotrijebimo krivi broj, kartica daljnje pokušaje ne dopušta. Tek uz pomoć PUK-a možemo aktivirati MS. Ako upotrijebimo pogrešni PUK deset puta zaredom, SIM može aktivirati samo još operator koji je prodao uređaj i SIM karticu.

### Značajke SIM kartice

Kartica SIM mora imati četveroznamenasti osobni identifikacijski broj (PIN) radi sigurnosti korisnika. Pretplatnik može intervencijom na svojoj SIM kartici promijeniti PIN broj kada i koliko god puta želi. Čak ima mogućnost isključiti verifikaciju PIN broja u određenim situacijama. SIM kartica omogućuje mobilnom pretplatniku pristup GSM sustavu, dokle god nije blokirana. Blokiranje SIM kartice u njezinu

samoinicijativnom postupku pojavljuje se samo nakon tri uzastopna pogrešna predstavljanja PIN broja. SIM kartica se može deblokirati pomoću osobnog ključa za deblokiranje (PUK). PUK broj se može unijeti najviše deset puta, nakon toga SIM karticu može deblokirati samo operator.

U 1987. godini rad na razvitku GSM sustava rezultirao je odlukom da se svi informacijski elementi sadržani u MS postaji, koji se odnose na mobilnog pretplatnika, moraju pohraniti i djelovati u posebnom modulu, tzv. *modulu identiteta pretplatnika, SIM (Subscriber Identity Module)*. Ostali dio MS postaje, nazvan mobilna oprema (ME), sadrži sve mehanizme i sredstva potrebna za pristup uslugama, a koja nisu specifična za pretplatnika. Nadalje, nastojalo se i uspjeti odvojiti SIM karticu od ME opreme. Ove odlike osiguravaju univerzalnost ME opreme koju mogu upotrebljavati razni mobilni pretplatnici, pri čemu svaki rabi vlastitu SIM karticu. Drugim riječima, MS postaju čine: *SIM kartica* (posebni pretplatnički podatci) i *ME oprema* (oprema za pristup mreži).

Posebni pretplatnički podatci, prema tome, pohranjuju se u SIM modul, dok ME oprema omogućuje pristup uslugama koje nudi sustav. Skupina eksperata SIMEG (*Subscriber Identity Module Expert Group*) osnovana je s ciljem da izradi specifikaciju za SIM-ME sučelje i za sva ostala relevantna polja. SIM se implementira u dva oblika – kao dio integriranog sklopa (IC) kartice ili kao *plug-in SIM* modul koji se može umetnuti u ME, kada god je pretplatnik želi koristiti, i može se ukloniti kada se MS postaja ne posjećuje. Drugim riječima, SIM modul može biti dio ISO standardizirane IC kartice. Druga je mogućnost da se koristi *ugradivi SIM*, koji je mali modul što se implementira u IC karticu. Veličina mehaničkog sučelja s ME definirana je GSM standardom.

Kako bi se mobilnom pretplatniku omogućila uporaba vlastite SIM kartice na različitim mjestima s različitom opremom (ME), SIM kartica mora sadržavati tekuće vrijednosti privremenih podataka, pogotovo TMSI, LAI i Kc. SIM kartica sadrži sredstva za pamćenje i upravljanje dodatnim informacijskim elementima koji se odnose na mobilnog pretplatnika, a u vezi s uslugama ili značajkama MS postaje. Navedimo neke mogućnosti SIM kartice:

- pohrana kratkih poruka i pridruženih parametara
- upravljanje listom skraćenih pozivnih brojeva
- implementacija liste fiksnih pozivnih brojeva
- pohrana prijenosnih parametara različitim konfiguracija terminala
- pohrana informacija o cijenama i naplati koje pruža mreža
- upravljanje listom preferiranih PLMN mreža za povezivanje
- implementacija prijenosnih značajka MS postaje.

SIM kartica se također upotrebljava za nadzor ili lakši pristup MS postaje mreži, putem sljedećih mogućnosti koje posjeduje:

- pohrana liste BCCH frekvencija
- pohrana nadzornih parametara za pristup mreži
- pohrana podataka o PLMN mreži gdje je ostvareno prethodno lokacijsko ažuriranje
- pohrana pojedinih uzroka pogrešaka pri ažuriranju lokacijskih podataka.

Vijek trajanja SIM kartice obuhvaća period od trenutka kada je proizvedena, preko faze personalizacije kada se dodjeljuje mobilnom pretplatniku, do trenutka kada se stavlja izvan uporabe. GSM razlikuje samo dvije faze u vijeku trajanja SIM kartice. Prva, *operacijska faza GSM mreže* podrazumijeva dodjeljivanje SIM kartice danom pretplatniku i njezin rad zajedno s ME opremom radi pristupa GSM

uslugama. Sve funkcije koje se obavljaju tijekom ove faze moraju biti u potpunosti standardizirane od GSM-a, jer njihova implementacija u bilo koju ME opremu mora funkcionirati sa svakom SIM karticom.

Druga faza, *faza administrativnog upravljanja GSM mrežom* obuhvaća različite postupke potrebne za uspostavljanje i održavanje mogućnosti SIM kartice glede pristupa sustavu. Postupci osiguravanja usluga i personalizacija (kada se SIM kartica puni s IMSI ili Ki) dio su ove faze.

### SIM i mobilna forenzika



a)

b)

*Slika 7.4.2. Prikaz SIM kartice mobilnog operatora: a) Tele 2 i b) T-Mobile Hrvatska*

Svaka SIM kartica ima na sebi utisnut broj od 14 do 20 znamenaka. Na prednjoj strani svake SIM kartice obično se nalazi oznaka operatora. Svaki operator vodi evidenciju o svojim SIM karticama. Ako prepisemo broj sa SIM kartice i zapitamo operatora o podacima za SIM, možemo dobiti čitav niz podataka vezanih u SIM. S gledišta mobilne forenzike najinteresantniji podatci ili podatci od forenzičkog značenja jesu:

- a) MSISDN i IMSI broj koji pripada SIM kartici
- b) inicijalni PIN1 i PIN2 te PUK1 i PUK2 brojevi (inicijalni PIN brojevi su oni dani pri formiranju SIM kartice)
- c) status aktivna, neaktivna i vrijeme pojedinog statusa
- d) eventualno podatci o korisniku ako ih je korisnik poslao mobilnom operatoru.

Ako je korisnik SIM kartice prethodno promijenio PIN, kada raspolažemo PUK brojem, nakon što tri puta upišemo pogrešni PIN, od nas će se zahtijevati upis PUK broja. Nakon što uspješno unesemo ispravni PUK broj koji smo dobili od operatora, definiramo novi PIN.

Za čitanje SIM kartice u forenzične svrhe od posebnog su interesa osobni podatci koje je unio korisnik SIM kartice ili koji su tijekom komunikacije uneseni, a odnose se na telefonske brojeve i SMS poruke. Ti podatci nisu zaštićeni i slobodno se mogu čitati sa SIM kartice. Za čitanje tih podataka koristimo se najčešće čitačima SIM kartica.

Podatci koji se na taj način mogu dobiti jesu:

- a) telefonski imenik koji je upisan na SIM kartici
- b) posljednjih deset komunikacija koje su obavljene preko tog SIM-a
- c) sadržaj SMS poruka koje su zapamćene u SIM kartici zajedno s podacima primatelja ili pošiljatelja i vremenom komunikacije.

Ako se radi o ulančanim SMS porukama, na čitačima SIM kartica svaka poruka iz lanca vidi se kao zasebna. Drugi operativni podatci zapisani u SIM karticama imaju zapriječen pristup preko standardnih SMS čitača.

## 7.5. Forenzična analiza mobilnih komunikacija

Forenzična analiza mobilnih komunikacija provodi se uvijek sa zacrtanim ciljem. Ciljeve forenzične analize mobilnih komunikacija definira nalog suda, državnog odvjetništva ili nekog drugog nadležnog tijela u formi naloga za vještačenje mobilnih komunikacija.

Nalogom za vještačenje postavljaju se ciljevi forenzične analize mobilnih komunikacija u **odgovarajućem vremenskom periodu**. Od značaja je da je postavljeni period unutar vremenske granice od godine dana jer to daje mogućnost cjelovite analize koja osim mobilnih aparata i SIM kartica obuhvaća i analizu ispisa poziva. Kao što je u prethodnim poglavljima već objašnjeno, operatori su dužni zapise o komunikacijama čuvati godinu dana.

Forenzičnu analizu možemo podijeliti u dva povezana poddijela:

- analiza mobilne opreme (SIM kartica, nosača SIM kartica, mobilnih uređaja i sl.)
- analiza ispisa poziva.

Da bi se moglo odgovoriti na pitanja koja se postavljaju nalogom za vještačenje, nužno je razraditi metodološki pristup u obradi i prikupljanju podataka za forenzičnu analizu.

Prilikom davanja naloga za vještačenje vještaku se veoma često uz nalog daje i mobilna oprema koja je privremeno oduzeta od osumnjičenih ili okrivljenih osoba, mobilni uređaji, kutije u kojima su mobilni uređaji bili pakirani, računari za nabavu mobilne opreme, SIM kartice, nosači SIM kartica, kao i sve drugo što bi se s mobilnom opremom moglo dovesti u vezu (punjači za mobilne uređaje i sl.).

Kako se najčešće radi o skupu promatranih osoba  $X \Leftrightarrow \{x_1, \dots, x_n\}$ , koji se promatra u određenom vremenskom intervalu  $\Delta t$  koji započinje s vremenom  $t_1$  i završava u vremenu  $t_2$ , sva mobilna oprema koja je privremeno oduzeta od promatranih osoba već je samim činom izuzimanja razvrstana po promatranim osobama.

Prvo što vještak mora napraviti nakon preuzimanja opreme jest izrada točnog popisa mobilne opreme po osobama. Dakle, za svaku osobu mora se izraditi popis mobilnih aparata kojima se koristila (na popis ne ulaze samo mobilni aparati koji su izuzeti od osobe, nego i aparati za koje promatrana osoba ima račune o kupnji ili kutije u kojima su aparati bili pakirani ili su samo navedeni po svojim IMEI brojevima u zahtjevu za vještačenje kao uređaji kojima se koristila promatrana osoba), zatim popis SIM kartica (na ovom popisu osim SIM kartica koje su dane na analizu, mogu se naći i podatci s nosača SIM kartica ili samo MS ISDN brojevi koji se navode u nalogu za vještačenje).

Najbolje je svu opremu koja je zaprimljena po pojedinoj osobi posložiti na čisti stol i fotografirati s visokom rezolucijom, kako bi se naknadno mogli pogledati detalji.

U izradi popisa mobilnih aparata ključan je IMEI broj mobilnih aparata, zatim podatak je li mobilni aparat fizički dan na analizu ili se je do IMEI broja došlo na neki drugi način (preko računara ili kutije u koju je izvorno bio zapakiran aparat).

Sustavna izrada popisa mobilne opreme od izuzetnog je značenja jer govori o korištenju određenih uređaja aparata i brojeva (MSISDN) pojedinih promatranih osoba. Tek se sustavnim predavanjem ukupne mobilne opreme za svaku promatranu osobu iz skupa mogu razlučiti komunikacijske navike pojedine osobe, kao i njihovi međusobni odnosi.

Već pri prvom pregledu opreme potrebno je podatke o opremi sustavno slagati u tablicu, kao što je to prikazano u tablici 7.5.1. Kasnije ćemo analizom ispisa poziva za pojedine mobilne aparate konstatirati da su uz SIM kartice koje su dane na analizu u aparatima u promatranom periodu korišteni i drugi brojevi.

Tablica 7.5.1. Mobilna oprema korištena po promatranim osobama

Osoba	IMEI broj	Period korištenja uređaja	Napomena	SIM kartice korištene u mobilnom aparatu						
				SIM broj	MSISDN broj	Operator	PIN1 PIN2	PUK1 PUK2	Period korištena u uređaju	Napomena
X <sub>i</sub>										

U prvom trenutku neće možda biti moguće povezati sve SIM kartice s mobilnim aparatima, tako da se ova tablica stalno tijekom analize nadopunjava i sređuje.

Nakon takva sustavnog razvrstavanja mobilne opreme može se krenuti u pripremu zahtjeva za podacima koji se traže od pojedinih mobilnih operatora.

### 7.5.1. Izrada zahtjeva za podacima od mobilnih operatora

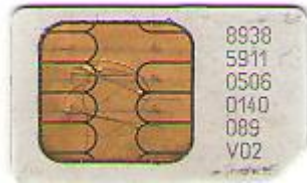
Nakon što smo detaljno proučili nalog za vještačenje i sve podatke koji su u vezi s mobilnim komunikacijama dani u njemu, te nakon što je po promatranim osobama razvrstana i popisana mobilna oprema koja je dana na vještačenje zajedno sa svim podacima koji se za pojedine osobe navode u nalogu, potrebno je izraditi dopise prema mobilnim operatorima.

#### 7.5.1.1. Što se od podataka može tražiti od mobilnih operatora

Dopisi ili upiti koji se postavljaju mobilnim operatorima trebaju dati podatke o mobilnoj opremi i o mobilnom prometu koji je kod njih zabilježen. Uz zahtjev za podatke mobilni operatori vrlo često traže na uvid original sudskog naloga, pa kad ima više operatora, dobro je od suda tražiti više kopija naloga. U budućnosti bi ovaj posao bio olakšan ako bi sud potpisivao naloge elektronički, a ne klasičnim pečatima i ako bi operatori prihvatili tako potvrđene dokumente.

Koje nam podatke može dati mobilni operator?

Mobilni operator može dati sve podatke o svojim SIM karticama. Zbog toga ćemo SIM kartice razvrstati po operatorima te popisati brojeve koji se nalaze na poledini SIM kartica.



Slika 7.5.1. Izgled poledine SIM kartice

Svakom mobilnom operatoru u Republici Hrvatskoj poslat ćemo brojeve svih SIM kartica koji se odnose na tog operatora (ti su brojevi često napisani i na nosaču SIM kartice) te ćemo za te brojeve zatražiti podatke.

Zamoliti ćemo da nam operator ispuni sljedeću tablicu po SIM brojevima.

Tablica 7.5.2. Podatci o SIM kartici

SIM Broj	MSISDN	IMSI	PIN1 PIN1	PUK1 PUK2	Status aktivnosti od – do	Podatci o korisniku ako ih ima

Uz navedeno, po svim MSISDN brojevima koji se odnose na SIM kartice, kao i onima MSISDN brojevima koji su navedeni u nalogu za vještačenje, a za koje nema SIM kartice, zamoliti ćemo podatke o prometu za vremenski period koji je naznačen u nalogu.

Podatke o prometu zahtijevat ćemo u sljedećoj formi:

«Molim vas da podatci budu kao prema niže navedenom primjeru.»

Tablica 7.5.3. Podatci o prometu

ANumber	AIMSI	AIMEI	ANetwork	ACellID	BNumber	BIMSI	BIMEI	BNetwork	BCellID
---------	-------	-------	----------	---------	---------	-------	-------	----------	---------

StartTime	EndTime	Duration	Service
-----------	---------	----------	---------

Od svakog mobilnog operatora zatražit ćemo ispis prometa i po svim IMEI brojevima kojima raspoložemo. Taj ispis također mora biti u formi kao što je prikazano u tablici 7.5.3.

Dakle, svakom mobilnom operatoru tražit ćemo podatke o prometu za sve njegove MSISDN brojeve (sa SIM kartica i iz naloga za vještačenje), a od svakog mobilnog operatora zatražit ćemo ispise po svim IMEI brojevima (brojevima mobilnih aparata).

Ako imamo navedene MSISDN brojeve inozemnih operatora ili ako imamo SIM kartice inozemnih operatora, ne možemo od njih zatražiti podatke o prometu. Inozemne operatore ne obvezuje nalog suda Republike Hrvatske i u pravilu te podatke ne daju. Međutim, za sve aparate i njihove IMEI brojeve dobit ćemo podatke o prometu od naših operatora i onda kada su oni bili u *roamingu* u jednoj od hrvatskih nacionalnih mreža.

Također, za bilo koji strani MSISDN broj možemo i od naših operatora zatražiti podatke. Ti će podatci postojati ako i samo ako su navedeni strani MSISDN brojevi bili u *roamingu* u jednoj od hrvatskih nacionalnih mobilnih mreža.

Sve podatke o prometu radi lakše analize treba tražiti u elektroničkom obliku. Postoje različiti elektronički oblici, a najprikladniji su za analizu tablični prikazi u Excelu. Nakon što nam mobilni operatori pošalju podatke o prometu, potrebno je za svakog mobilnog operatora popisati sve CellID brojeve baznih postaja koje se javljaju u ispisima, a koji se odnose na mrežu mobilnog operatora (Network podatak). Od mobilnih operatora treba zatražiti i podatke o baznim postajama. Ti su podatci kasnije od značaja za analizu kretanja promatranih osoba.

Podatke o baznim postajama također je potrebno zatražiti u elektroničkom obliku.

Zatraženi podatci trebaju biti u obliku kao što to prikazuje tablica 7.5.4.

*Tablica 7.5.4. Podatci o baznim postajama*

CELLID	BST	SMJER	TIP BST	OPIS LOKACIJE	ULICA I KUĆNI BROJ	PBR.	MJESTO	PODR. ŽUP.
LONGITUDE		LATITUDE		Dubina prodora zrake		ŠIRINA SNOPA		

Poslije se pri analizi ispisa poziva mogu pojaviti i novi brojevi. Na primjer, u ispisu za mobilni aparat IMEI mogu se pojaviti i novi MSISDN brojevi za koje nismo imali prethodnu spoznaju da su korišteni u tom mobilnom aparatu, ili u ispisu za pojedini MSISDN broj mogu se pojaviti i novi IMEI brojevi za koje nismo imali spoznaju da su korišteni. Kada tijekom analize dođemo do spoznaje o novim brojevima, od mobilnih operatora i za te je brojeve potrebno ponovno zatražiti ispise u zadanom roku. Ako se u tim ispisima javljaju bazne postaje koje nismo prethodno imali, potrebno je ponoviti i zahtjev za podacima o baznim postajama.

Često nema spoznaje o novim mobilnim uređajima ili MSISDN brojevima pa tada nije potrebno ponavljati zahtjeve, a ponekad će zahtjev biti potrebno ponoviti i do tri puta. Sve nove spoznaje treba ugraditi u tablicu 7.5.1., kako bi se poslije mogli analizirati međusobni komunikacijski odnosi.

## 7.5.2. Metodologija analize mobilne opreme

### 7.5.2.1. Analiza SIM kartica

Nakon što smo od operatora dobili sve tražene podatke o SIM karticama, da bismo ispravno mogli izvršiti forenzičnu analizu, potrebno je imati na raspolaganju «čitač SIM kartice».

#### **Čitač SIM kartice**

Čitač SIM kartice je uređaj koji se priključuje na osobno računalo (PC) najčešće preko USB konektora na strani računala. Da bi čitač SIM kartice bio aktivan, najčešće je potrebno prethodno instalirati na računalo programsku podršku za njegov rad.

Danas postoji velik broj različitih čitača SIM kartica, koji često uz SIM kartice mogu imati na sebi i ulaze za umetanje različitih memorijskih kartica koje se koriste u elektroničkim fotoaparatom i/ili u mobilnim uređajima. Dobro je imati ovakve čitače jer oni mogu poslužiti za brzo i djelotvorno skidanje i drugih podataka s različitih memorijskih kartica koje se nalaze u mobilnim uređajima koji su dani na vještačenje.

SIM kartica obično je zaključana nepoznatim PIN brojem. Korisnik (promatrana osoba) promijenila je izvorni PIN. U takvu slučaju tri puta se upiše neispravan PIN, a potom se korištenjem PUK broja definira novi PIN, obično neki jednostavan broj, na primjer 1111. O toj aktivnosti vještaka potrebno je u vještvu ostaviti zapis.

Čitač SIM kartice ne omogućuje čitanje zaštićenih podataka sa SIM kartice. Sa SIM kartice čitačem se mogu prikupiti samo korisnički podatci kao što su:

- telefonski imenik upisan u memoriji SIM kartice
- zabilježeni posljednji pozivi
- brojevi servisnih služba mobilnog operatora
- SMS poruke (ako se radi o dužim porukama, više od 160 znakova, koje su ulančane, one će se u memoriji SIM kartice vidjeti kao više poruka).

Tehnologija SIM kartica se razvija, pa su za čitanje sve suvremenijih SIM kartica (koje se odlikuju i većom memorijom) potrebni sve suvremeniji čitači ili programska nadopuna kod postojećih čitača.

Čitači SIM kartica nisu skup dio opreme. Cijena im se kreće od dvadesetak do stotinu eura po komadu, a najčešće se naručuju preko specijaliziranih internetskih trgovina (specijaliziranih za prodaju mobilne opreme).

Svi zabilježeni podatci sa SIM kartice vremenski su neovisni o zadanom periodu promatranja prema nalogu za vještačenje, ali korektno ih je uzeti sve u obzir.

Pri čitanju telefonskog imenika sa SIM kartice bilo bi dobro uz podatak o mobilnom ili fiksnom broju i zapisanom nazivu koji je vezan uz taj broj pregledati odnose li se neki od zapisanih brojeva u imeniku na druge promatrane osobe iz skupa koji definira nalog, a za ostale brojeve može se pogledati preko oglašanih telefonskih imenika postoje li podatci o korisnicima. Za one brojeve za koje ne postoje javno oglašeni podatci o korisniku, moguće je od operatora zatražiti podatke ako ih ima. No, to nije nužno uvijek raditi, to ipak ovisi o nalogu za vještačenje i o procjeni važnosti pojedinog broja. Obično se ti podatci traže kasnije (nakon cjelokupne analize) ako ima više indicija da je to potrebno uraditi.

#### 7.5.2.1. Analiza mobilnih aparata

Kada se pristupa analizi mobilnog aparata, da bi se mobilni aparat mogao aktivirati radi čitanja sadržaja spremljenoga u njegovoj memoriji, najčešće je potrebno u njega umetnuti SIM karticu. U postupku analize sadržaja mobilnog aparata najbolje je koristiti se novom i do tada neupotrebljavanom SIM karticom. Nova i neupotrebljavana SIM kartica neće unijeti u mobilni aparat nikakav nepoželjan sadržaj koji bismo onda mogli krivo identificirati kao sadržaj mobilnog uređaja. Pojedini stariji mobilni aparati kodirani su samo na odgovarajućeg mobilnog operatora te se u tom slučaju moramo koristiti novom SIM karticom toga mobilnog operatora.

Nabavka nove SIM kartice ne predstavlja veću poteškoću ako je mobilni aparat kodiran za bilo kojeg operatora iz Republike Hrvatske, no ako je mobilni aparat kodiran za inozemnoga mobilnog operatora, tada za njegovo pokretanje trebamo imati novu i nekorištenu SIM karticu upravo tog mobilnog



operatora. Nije uvijek ni moguće, a niti jednostavno nabaviti potpuno novu SIM karticu mobilnog operatora iz inozemstva. U tu svrhu mogu se koristiti i starije SIM kartice tih mobilnih operatora kojima raspolaže vještak, ali u takvu slučaju potrebno je stariju SIM karticu prethodno «oprati», to jest očistiti od svih podataka koje ima na sebi. Postupak «čišćenja» stare SIM kartice obaviti ćemo korištenjem čitača SIM kartice koji ima mogućnost unosa i brisanja podataka sa SIM kartice.

Starija SIM kartica koju smo postavili u mobilni uređaj možda je i neaktivna kod operatora koji ju je izdao, ali njom se služimo samo da aktiviramo mobilni uređaj. Dakle, tom karticom nećemo pozivati niti primiti pozive, a ona će ipak aktivirati mobilni telefon.

Danas postoji oprema pomoću koje možemo čitati sadržaj svakog mobilnog aparata na svijetu. Međutim, ta je oprema relativno skupa i najčešće nije na raspolaganju. Navedena oprema za automatsko čitanje sadržaja mobilnih aparata najčešće se sastoji od čitača koji je vrlo često nezavisan uređaj s osnovnim karakteristikama osobnog računala. Uz čitač postoji i poveći set kabela koji se koriste za spajanje mobilnog uređaja na čitač. Ovakvi čitači omogućuju brzo prebacivanje sadržaja mobilnih aparata na druge memorijske uređaje, kao što su vanjski diskovi ili USB memorijski stikovi, a sadržaj mobilnih aparata najčešće je dostupan u nekoj od standardnih aplikacija za rad na PC-u.

I bez posjedovanja ovakvih uređaja sadržaj mobilnih aparata može se automatski iščitati kada se mobilni aparati preko odgovarajućih konekcijskih kabela spoje na osobno računalo. No u tom slučaju potrebno je raspolagati programskom podrškom za taj tip mobilnog uređaja, to jest programska podrška mora biti instalirana na osobnom računalu. Do takve programske podrške može se doći preko interneta i *web*-stranica proizvođača opreme. No svi proizvođači programsku podršku ne nude besplatno, pa je katkada za nabavljanje programske podrške potrebno investirati. Naravno, treba posjedovati ili kupiti kabel koji odgovarajući tip mobilnog uređaja povezuje s osobnim računalom.

Danas postoji velik broj različitih mobilnih aparata. Mnogi suvremeni mobilni aparati imaju standardnu memorijsku karticu koja se umeće u mobilni aparat. Način umetanja memorijske kartice u mobilni aparat podosta se razlikuje od proizvođača do proizvođača i od mobilnog uređaja do mobilnog uređaja. Kod nekih mobilnih uređaja memorijska kartica se umeće a da pritom nije potrebno «rasklopiti» mobilni uređaj, a kod nekih je potrebno skinuti zadnji poklopac kako bi se pristupilo memorijskoj kartici.

Memorijske kartice koje su umetnute u mobilne aparate nisu jedina memorija kojom aparat raspolaže, one najčešće čine dodatnu memoriju za spremanje videosadržaja i slika (kada se mobilni aparat koristi kao kamera ili fotoaparat).

Sadržaj memorijske kartice može se veoma lako «skinuti» u elektroničkoj formi korištenjem čitača memorijskih kartica.

Iz mobilnog aparata može se izvući sljedeći niz podataka:

- telefonski imenik zabilježen u memoriji mobilnog aparata
- podatci o pozivima, posljednji primljeni pozivi, posljednji neuspjeli dolazni ili odlazni pozivi, posljednji odasli pozivi
- primljene poruke, odaslane poruke, spremljene poruke i sl.

Pri analizi telefonskog imenika (kao i kod SIM kartice) uz nazive vezane za pojedine brojeve potrebno je pregledati koji od zabilježenih brojeva pripadaju ciljanoj promatranoj skupini osoba, te eventualno za koje brojeve operatori TK usluga daju podatke o korisnicima preko javno objavljenih telefonskih imenika.

Pri zapisivanju poruka potrebno je zabilježiti i sva vremena koja se odnose na poruke, a poslije, pri predaji poruka treba voditi računa o tome da zabilježena vremena nisu sistemska, nego da odgovaraju vremenu koje je namješteno na mobilnom aparatu, tako da im kasnije u analizi poziva po ispisima operatora treba pridijeliti ispravno vrijeme.

### 7.5.3. Metodologija analize ispisa poziva promatrane osobe ili promatranih osoba kako bi se zaključilo o njihovom kretanju i komunikaciji s ostalim okrivljenima

Posjedujemo sve podatke o prometu, ispise operatora u elektroničkoj formi. Prije bilo koje obrade ovih ispisa **potrebno je uvijek sačuvati jednu izvornu kopiju podataka u onom obliku u kojem ju je dostavio operator.** Čuvanje jedne izvorne kopije mora se napraviti iz razloga što će se procesom obrade pojedini podatci mijenjati ili brisati, pa u tom slučaju ako naknadno želimo izvršiti još poneku analizu nad podacima, od izuzetnog je značenja imati sačuvanu izvornu verziju podataka koje je dostavio operator.

Kod rješavanja zadatka kao što je analiza ispisa poziva, koji se ciklički ponavlja u različitim varijantama, najbolje je sustavno izgraditi metodološki pristup u pristupu, dakle definirati redoslijed radnja i postupaka koji nas sustavno vode do traženog cilja.

Imamo skup promatranih osoba  $X \Leftrightarrow \{x_1, \dots, x_n\}$ . Skup promatranih osoba promatra se u određenom vremenskom intervalu  $\Delta t$  koji započinje s vremenom  $t_1$  i završava u vremenu  $t_2$ . Vrijeme  $t_2 > t_1$ , da bi se mogli pribaviti podatci od operatora, nužan je uvjet da je vrijeme početka promatranja  $t_1$  manje od godine dana gledano unazad od trenutka kada započinjemo analizu. Dakle,  **$t_1 \leq$  (godina unazad od trenutka analize poziva).**

Važno je napomenuti da operatori u Republici Hrvatskoj automatski iz sustava brišu podatke koji se odnose na prethodni kalendarski dan unazad godinu dana.

#### 7.5.3.1. Dodjeljivanje skupu imena promatranih osoba skup MSISDN i IMEI brojeva

Prvi problem koji je potrebno razriješiti jest da se svakom elementu skupa  $X$  (svakoj promatranoj osobi) pridodijeli podskup pripadajućih MSISDN i IMEI brojeva (kojima se je osoba koristila). O tome smo već govorili u uvodnom dijelu ovog poglavlja.

Potrebno je napraviti (razriješiti) tablicu 7.5.5., ali sada za sve osobe iz promatranog skupa. Tablica 7.5.5. pokazuje kojim se MSISDN brojevima i kojim mobilnim uređajima (IMEI brojevima) koristila osoba  $x_i$  iz skupa promatranih osoba  $X$ .

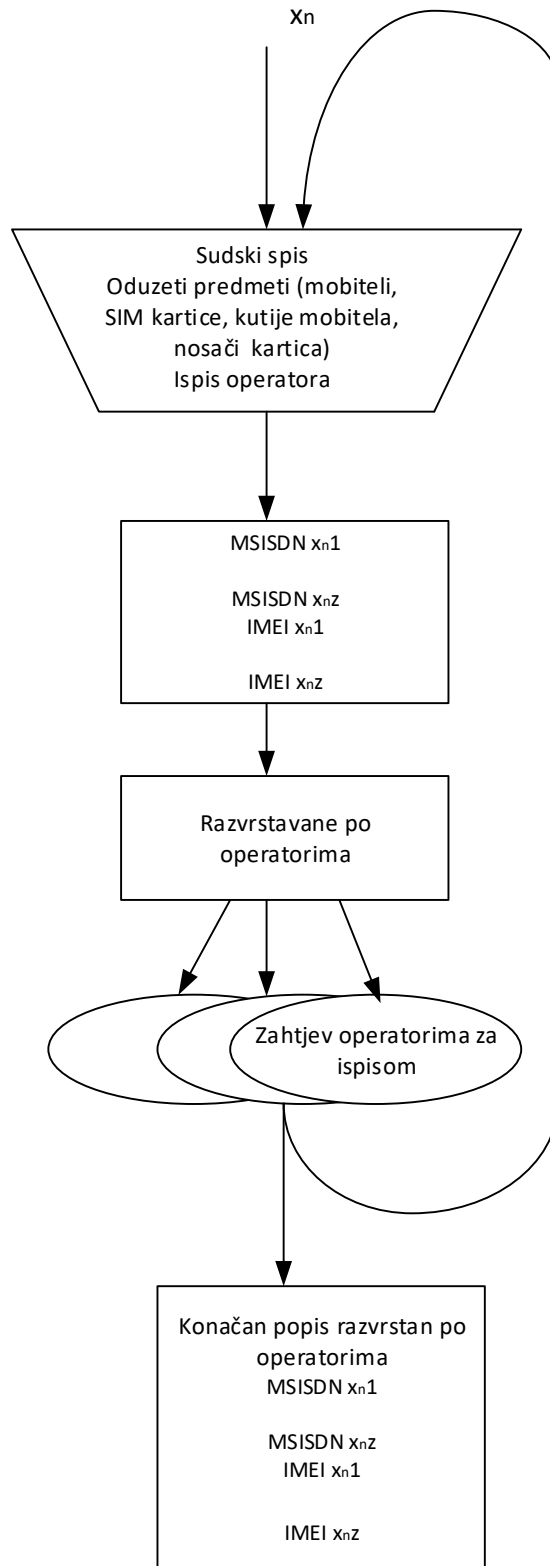
Tablica 7.5.5. Razvrstavanje MSISDN i IMEI brojeva po promatranim osobama

Promatrane osobe	$X_1$	$X_2$	.....	$X_n$
MSISDN	MSISDN $x_{11}$	MSISDN $x_{21}$	.....	MSISDN $x_{n1}$
	MSISDN $x_{1m}$	MSISDN $x_{2k}$		MSISDN $x_{nz}$
IMEI	IMEI $x_{11}$	IMEI $x_{21}$	.....	IMEI $x_{n1}$

	IMEI $x_{1r}$	IMEI $x_{2t}$		IMEI $x_{nU}$
--	---------------	---------------	--	---------------

Ulazni podatci u tablici 7.5.5. proizlaze iz privremeno oduzete mobilne opreme, sudskog spisa ili podataka koje dostavi MUP. Temeljem njih za inkriminirani period  $\Delta t$  od svakog nacionalnog operatora traže se ispisi brojeva i to MSISDN po pojedinim operatorima i od svih operatora za sve IMEI brojeve. Nakon što se dobiju inicijalni ispisi brojeva, pregledom IMEI ispisa može se doći do novih i nepoznatih MSISDN brojeva kojima se promatrana osoba koristila, a pregledom MSISDN ispisa može se zaključiti o još nepoznatim mobilnim uređajima (IMEI brojevima) kojima se promatrana osoba koristila. Zatim je za novopropažale brojeve potrebno zatražiti ispise, te se nakon dvaju do triju uzastopnih ponavljanja ovog postupka dobiva cjelovita slika o korištenim brojevima i mobilnim aparatima za svaku promatranu osobu. Međutim, svi novi brojevi moraju biti pokriveni novim sudskim nalogom jer vam operatori neće dati podatke o njima.

Logička shema navedenog postupka prikazana je na donjoj slici 7.5.2.



Slika. 7.5.2. Logički proces iznalaženja MSISDN i IMEI brojeva po operatorima

### 7.5.3.2. Roaming u komunikaciji

Za svaki ispis (MSISDN broja i IMEI broja) potrebno je odrediti je li bilo korisnika u *roamingu* u stranim

MCC	MNC	Brand	Operator	Status	Bands (MHz)	References and notes
219	01	T-Mobile	<a href="#">T-Mobile</a> Croatia	Operational	GSM 900 / GSM 1800 / UMTS 2100	
219	02	<a href="#">Tele2</a>		Operational	GSM 900 / GSM 1800 / UMTS 2100	
219	10	<a href="#">VIPnet</a>		Operational	GSM 900 / UMTS 2100	

mrežama.

Ako su ispisi u Excel formi, korištenjem funkcije «Filtar» pogleda se u A i B Network ispisa ima li brojeva koji ne započinju s 219, što je oznaka za mobilnog operatora u Republici Hrvatskoj.

Kao što je to prikazano na slici.7.5.3.

C	D	E	F
IMEI	ANetwork	ACellID	BNumber
	(All)	0	38599820357
5166603710	(Top 10...)	15210	38598515817
5166603710	(Custom...)	15165	38598515817
5717301209390	21803	15051	38598447222
5166603766226	21901	15490	38598447222
5717301209390	21901	15163	38598447222
5166603766226	21901	15490	38598958154
5166603766226	21901	15488	38592256040
5166603766226	21901	15163	38598170502
5862701258535	21901	20765	38598447222

Slika 7.5.3. Primjer traženja rada u roamingu

Dakle, na primjeru u slici 7.5.3. vidimo da se u ispisu *ANetwork* osim broja 21901 koji znači T-Mobile Hrvatska javlja i broj 21803. Taj broj možemo potražiti na *web*-stranici [http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile\\_Network\\_Code](http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_Network_Code) koja daje popise brojeva svih mobilnih mreža na svijetu. Broj 21803 znači da se radi o BiH mreži pod nazivom HT-ERONET.

#### Bosnia and Herzegovina - BA

MCC	MNC	Brand	Operator	Status	Bands (MHz)
218	03	HT-ERONET	Public Enterprise Croatian Telecom Ltd.	Operational	GSM 900
218	05	m.tel	RS Telecommunications JSC Banja Luka	Operational	GSM 900 / GSM 1800 / UMTS 2100
218	90	BH Mobile	<a href="#">BH Telecom</a>	Operational	GSM 900 / GSM 1800

Slika 7.5.4. Primjer traženja podataka o stranim mobilnim mrežama

Nakon što smo ustanovili o kojoj se mreži radi, potrebno je u ispisima zamijeniti sve brojeve mreža njihovim nazivima.

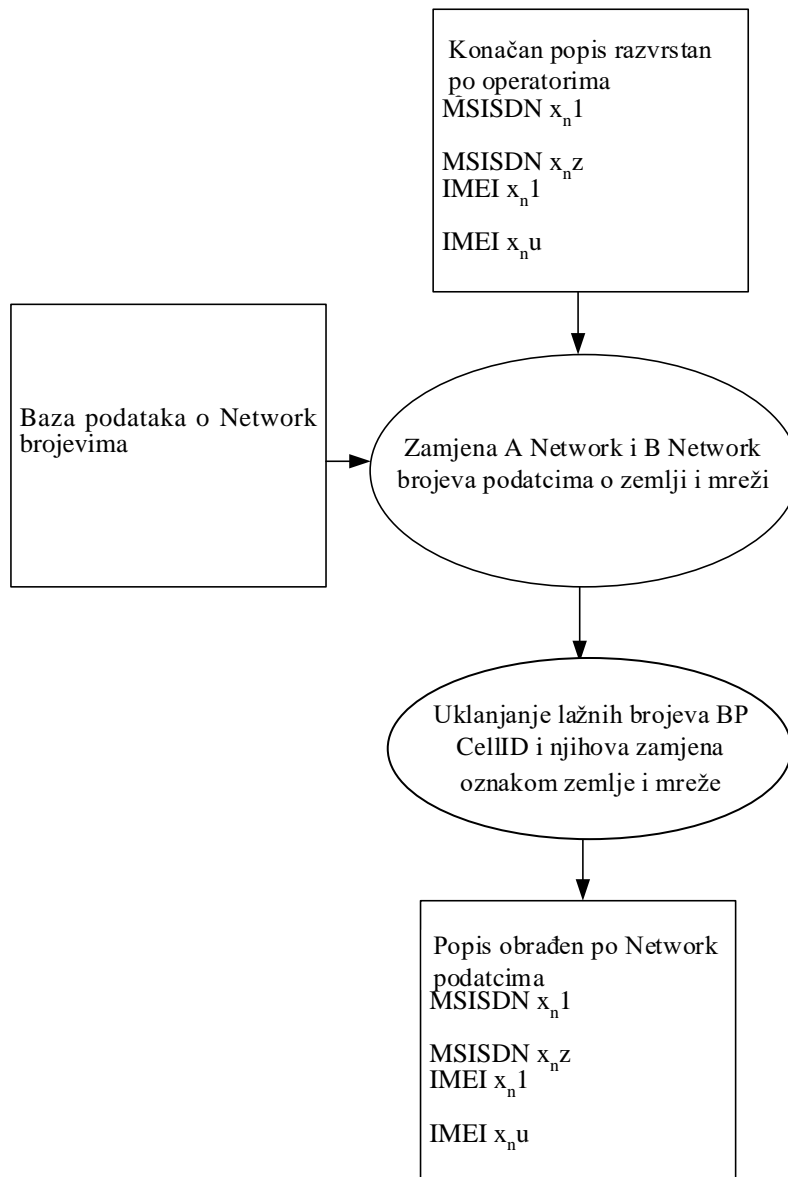
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
AIMEI	ANetw	ACellID	BNumber	BIMSI	BIMEI	BNetwork	BCellID	StartTime	EndTime	Duratic
	0	0	3859						12.2009 10:49:27	00:02:4
5166603766226	21901	15210	3859						12.2009 11:04:06	00:00:0
5166603766226	21901	15165	3859						12.2009 11:05:57	00:00:0
5717301209390	21901	15051	3859						12.2009 17:04:49	00:00:0
5166603766831	21901	15490	3859						12.2009 17:49:40	00:01:0
5717301209390	21901	15163	3859						12.2009 18:15:12	00:01:0
5166603766226	21901	15490	3859						12.2009 18:41:24	00:00:7
5166603766226	21901	15488	3859						12.2009 19:20:28	00:01:7
5166603766226	21901	15163	3859						12.2009 08:46:55	00:00:0
5862701258535	21901	20765	3859						12.2009 11:16:04	00:01:0
5166603766226	21901	15051	3859						12.2009 11:16:45	00:00:7
5717301209390	21901	15488	3859						12.2009 11:45:46	00:00:0
5483002123660	21901	22234	3859						12.2009 11:59:57	00:00:0
5166603766226	21901	15161	3859						12.2009 12:00:19	00:00:0

Slika 7.5.5. Primjer zamjene broja mreže nazivom mreže

Međutim, strana mreža, u ovom primjeru **BiH HT-ERONET**, poslala je i brojeve svojih baznih postaja. U ovom slučaju radi se o T-Mobile ispisu i svi drugi brojevi u CellID stupcima odgovaraju baznim postajama T-Mobile, osim brojeva u ispisu koji uz sebe imaju podatke HT Eronet, Network stupac.

Od stranog operatora ne možemo dobiti podatke o tim baznim postajama, a da ti brojevi ne bi ometali automatsko ubacivanje podataka o baznim postajama T-Mobile sustava, najbolje je te brojeve zamijeniti nekim jedinstvenim znakom koji označava zemlju i operatora.





Slika 7.5.7. Zamjena Network podataka stranih operatora nazivom zemlje i mreže – logička struktura

### 7.5.3.3. Lokacijski podatci o baznim postajama i kretanje korisnika

Svaka bazna postaja u ispisu označena je brojem te je potrebno ustanoviti koliko različitih brojeva ima i za svaki od njih zatražiti podatke od operatora čiji je ispis.

Korištenjem funkcije *copy* moguće je kopirati sve podatke za ACellID i BCellID, zatim ih na nekom novom listu složiti u jedan stupac i sortirati po veličini. Da ih ne bismo ručno brojili, možemo u C programskom jeziku napraviti brojač koji će nam pobrojiti koliko kojih brojeva ima u stupcu i o tome dati podatak.

Analiza svih baznih postaja koje se javljaju u ispisu prikazana je u tablici 7.6.

Tablica 7.6. Učestalost pojavljivanja baznih postaja u ispisu



CellID	Koliko se puta javlja u ispisu
15161	93
15162	93
15163	1175
15164	1
26207	1
.....	
.....	
.....	
.....	
.....	
33641	2
40142	12
40212	2
40760	2
40761	3
40762	1
43761	3
64490	1
64930	3
65220	4
BiHEronet	25

Tablica u našoj ilustraciji je skraćena, a obično se radi o nekoliko stotina baznih postaja za ispis standardne duljine od četiri do pet tisuća komunikacija.

Ovisno o postavljenim ciljevima forenzične analize može se za promatrane osobe opisanim postupkom provesti analiza učestalosti komuniciranja po baznim postajama. Na taj način možemo egzaktno utvrditi s kojih se baznih postaja promatrani korisnik najčešće javlja ili preko kojih najučestalije komunicira. Također, u analizu se mogu ubaciti i ciljana vremena, na primjer večernji sati. Ovakva analiza može biti od interesa u istražnim postupcima kada se može dogoditi da promatrana osoba kupi novi mobilni uređaj s novom SIM karticom. Promatrajući i analizirajući prethodne komunikacijske navike promatrane osobe, možemo po ispisima koji su vezani uz određenu baznu postaju vrlo brzo zaključiti o novom mobilnom uređaju i broju kojim se promatrana osoba koristi.

Za sve ispise određenog operatora (MSISDN ili IMEI) potrebno je izvesti postupak te je na kraju potrebno ponovno prebrojiti sve brojeve BP-a iz svih tablica kako bi se dobio jedinstven popis baznih postaja i kako bi se dobio konačan popis u kojem se podatci neće ponavljati.

Popis baznih postaja potrebno je uputiti operatoru da za njega dostavi podatke. Operator može taj ispis iz svoje baze podataka sastaviti na različite načine, no što više podataka zatražite, to je poslije lakše odrediti mikrolokaciju promatrane osobe. Operatoru ste obvezni poslati zahtjev u pismenom obliku, a dobro ga je poslati i u elektroničkom obliku, kako biste mu olakšali rad i smanjili mogućnost pogreške zbog krivog očitavanja broja BP-a.

Ove podatke morate zatražiti u elektroničkom obliku kako biste mogli s njima strojno raditi.

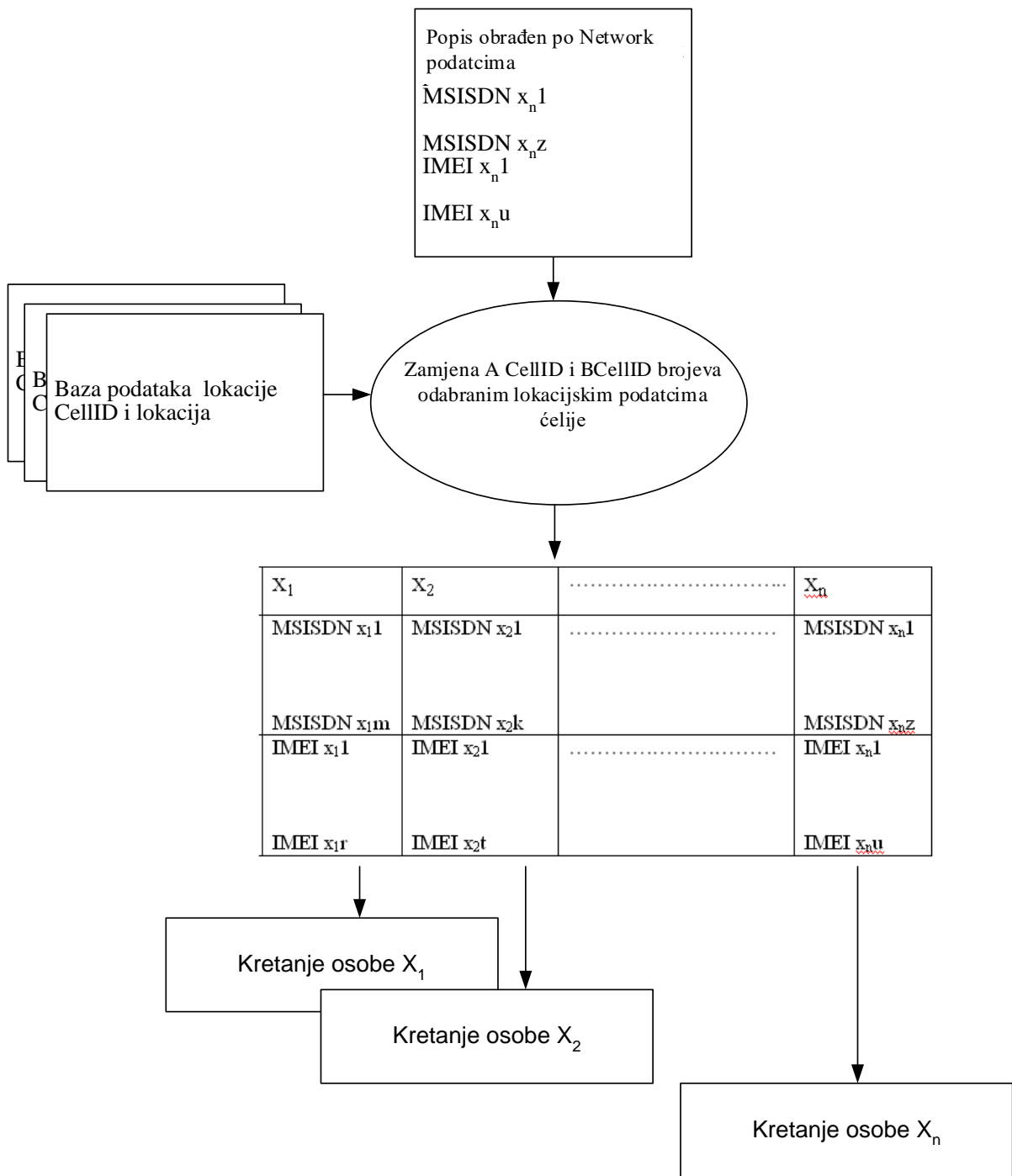
Kada od operatora dobijete podatke o baznim postajama, tada možete korištenjem Accessa ili nekog drugog programa s istim mogućnostima izvršiti automatsku zamjenu podatka o broju ćelije u ispisima s odgovarajućim lokacijskim podatkom o ćeliji koji je od interesa (jedan ili više njih).

Ako imate ispise od triju operatora, postupak je potrebno napraviti za sve ispise i sve operatore.

Temeljem navedenog postupka mogu se napraviti ispisi kretanja u vremenskom slijedu po svakom MSISDN ili IMEI broju, a potom ih za pojedinog korisnika treba objediniti, kao što je to prikazano u primjeru na slici 7.5.8.

38595xxxxxx1 x1	35179903yyyyyyy	ZAG862 Bregana-COW Bregana-COW 3 Greenfield Bregana 10432 ZAG 15 41 38.00 45 50 25.00 120 0	27.12.10. 12:41
38595xxxxxx1 x1	35179903yyyyyyy	ZAG862 Bregana-COW Bregana-COW 3 Greenfield Bregana 10432 ZAG 15 41 38.00 45 50 25.00 120 0	27.12.10. 12:41
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Mobitel Slovenija	27.12.2010 13:09:28
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Mobitel Slovenija	27.12.2010 13:09:28
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Mobitel Slovenija	27.12.2010 14:23:02
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Mobitel Slovenija	27.12.2010 14:23:02
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Mobitel Slovenija	27.12.2010 15:26:40
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Mobitel Slovenija	27.12.2010 15:26:40
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Tuš mobil Slovenija	27.12.2010 16:11:08
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Tuš mobil Slovenija	27.12.2010 16:11:08
38595xxxxxx1 x1	35179903yyyyyyy	ZAG862 Bregana-COW Bregana-COW 3 Greenfield Bregana 10432 ZAG 15 41 38.00 45 50 25.00 120 0	27.12.10. 16:14
38595xxxxxx1 x1	35179903yyyyyyy	ZAG862 Bregana-COW Bregana-COW 3 Greenfield Bregana 10432 ZAG 15 41 38.00 45 50 25.00 120 0	27.12.10. 16:17
38595xxxxxx1 x1	35179903yyyyyyy	ZAG862 Bregana-COW Bregana-COW 3 Greenfield Bregana 10432 ZAG 15 41 38.00 45 50 25.00 120 0	27.12.10. 16:20
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Tuš mobil Slovenija	27.12.2010 16:21:45
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Tuš mobil Slovenija	27.12.2010 16:21:45
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Tuš mobil Slovenija	27.12.2010 16:24:42
38599xxxxxx1 x2	1254400zzzzzzzz	Tuš mobil Slovenija	27.12.2010 16:24:42
38599xxxxxx1 x2	0	Tuš mobil Slovenija	27.12.2010 16:24:55
38595xxxxxx1 x1	35179903yyyyyyy	ZAG862 Bregana-COW Bregana-COW 3 Greenfield Bregana 10432 ZAG 15 41 38.00 45 50 25.00 120 0	27.12.10. 16:26
38595xxxxxx1 x1	35179903yyyyyyy	ZAG862 Bregana-COW Bregana-COW 3 Greenfield Bregana 10432 ZAG 15 41 38.00 45 50 25.00 120 170	27.12.10. 16:28
38595xxxxxx1 x1	35179903yyyyyyy	ZAG165 Buzin Buzin 3 Cebini 28 Zagreb 10000 ZAG 15 59 43.00 45 44 49.00 120 0	27.12.10. 16:41

Slika 7.5.8. Tablični prikaz kretanja korisnika napravljen temeljem ispisa poziva od različitih operatora



Slika 7.5.9. Logički proces izrade liste kretanja promatranih osoba

#### 7.5.3.4. Analiza A i B strane ispisa poziva i grafički prikaz međusobnih komunikacija promatranih osoba

U analizi poziva vrlo je značajna analiza A i B strane. Ona uključuje analizu svih onih koji su generirali poziv prema promatranoj osobi i broj poziva koje je generirala promatrana osoba (to je takozvana A strana) te analizu svih brojeva koje je zvala promatrana osoba i analizu ukupnog broja primljenih poziva (takozvana analiza B strane).

Dakle, ako imamo ispis poziva po MSISDN broju promatrane osobe, onda se taj MSISDN broj nalazi u svakom redu ispisa poziva ili kao pozivatelj, dakle na A strani, ili kao pozvani, dakle na B strani. Bit analize svodi se na prebrojavanje brojeva (koliko se puta na A ili B strani ponavlja jedan te isti broj).

Pogledajmo primjer rezultata jednog takva ispisa.

Ispis obuhvaća vrijeme od 12. 6. 2010. 18:01:50 do 31. 7. 2010. 13:47:53.

Promatrana osoba s broja 9159089xx POx2 zove 12 puta i prima pozive od drugih brojeva:

##### A strana

9159089xx PO1 <sub>2</sub>	12	PO1 <sub>2</sub> generira 12 poziva
----------------------------	----	-------------------------------------

##### Oni koji pozivaju PO1<sub>2</sub>

9159089xx PO1 <sub>2</sub> Brojevi koji zovu	Broj poziva koje prima PO1 <sub>2</sub>	Napomena
99AB75408	4	Nema podataka o pozivatelju
91CD78779	1	Nema podataka o pozivatelju
99EF52935	1	Nema podataka o pozivatelju
98GH9159	2	Pozivatelj je XY, stanuje u ulici U i gradu G.
1IJ68091	1	Treća promatrana osoba PO3 <sub>1</sub>
91KL71710	1	Nema podataka o pozivatelju
382MN041564	1	Druga promatrana osoba 1

##### B strana

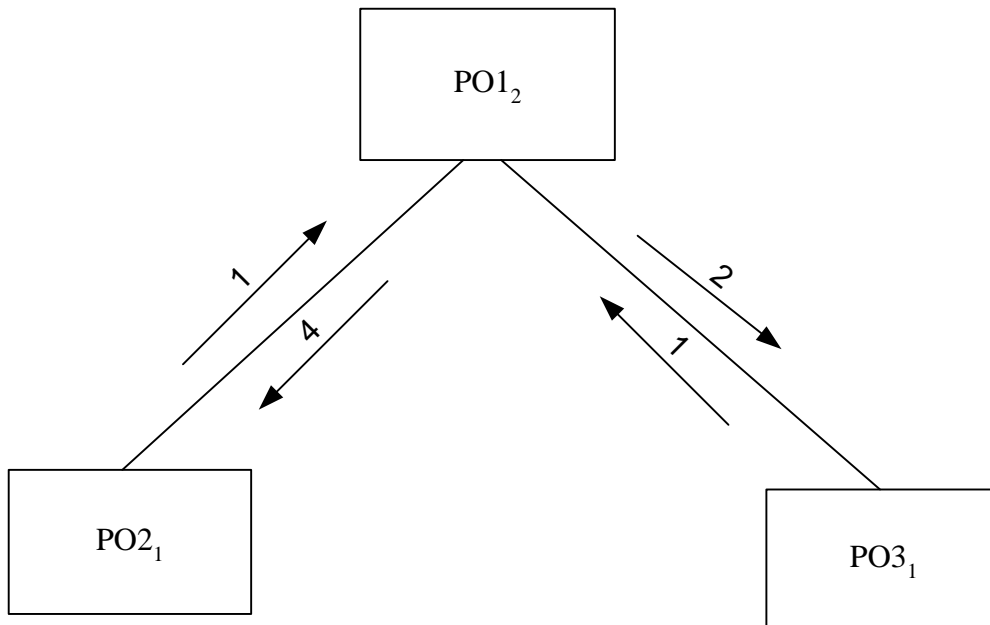
9159089xx PO1 <sub>2</sub>	11	prima 11 poziva
----------------------------	----	-----------------

##### Oni koji su pozivani od PO1<sub>2</sub>

915908970 PO1 <sub>2</sub>	Brojevi koje zove PO1 <sub>2</sub>	Napomena vještaka
----------------------------	------------------------------------	-------------------

91OP5908970	6	Nema podataka
1IJ68091	4	Treća promatrana osoba PO3 <sub>1</sub>
382MN041564	2	Druga promatrana osoba PO2 <sub>1</sub>

Temeljem takvih analiza možemo nacrtati dijagram međusobne komunikacije promatranih osoba!



Slika 7.5.10. Grafički prikaz komunikacije između promatranih osoba 1, 2 i 3 temeljem analize ispisa A i B strane (analize poziva) za MSISDN PO1<sub>2</sub>

Obično u analizu ulazi veći broj ispisa MSISDN i IMEI brojeva, a za svaki je broj potrebno napraviti analizu A i B strane te zaseban grafički prikaz koji se nakon toga spaja u jedinstven grafički prikaz (pri tome je potrebno voditi računa da se u brojenju ukupnih komunikacija podatci ne dupliciraju jer će isti podatci o komunikaciji PO1<sub>2</sub> i PO3<sub>1</sub>, koji su proizašli iz analize broja PO1<sub>2</sub>, proizaći i iz analize PO3<sub>1</sub>).

Ako su MSISDN brojevi PO1<sub>2</sub> i PO3<sub>1</sub> brojevi različitih operatora, ti će se podatci donekle razlikovati i u vremenu. Razlika u vremenu može ići od nekoliko sekunda pa skoro do minute.

Takve ispise treba međusobno spojiti, na primjer jedan poziv koji je zabilježen kod različitih operatora i koji se je pojavio u dvama ispisima.

Ispis PO1<sub>2</sub> operatora I

A Number	AcelID	B Number	BcelID	Start time	End time
PO1 <sub>2</sub>	X1	PO3 <sub>1</sub>		t1	t2

Ispis PO3<sub>1</sub> operatora II

A Number	AcellID	B Number	BcellID	Start time	End time
PO1 <sub>2</sub>		PO3 <sub>1</sub>	Y1	t1±Δt	t2±Δt

Takve ispise ručno stavljamo u jedan da bismo objedinili lokacijske podatke CellID koji se ne prenose iz mreže u mrežu.

A Number	AcellID	B Number	BcellID	Start time	End time
PO1 <sub>2</sub>	X1	PO3 <sub>1</sub>	Y1	t1 ili t1±Δt	t2 ili t2±Δt

Važno je, ako se može, za svaki poziv utvrditi lokaciju jedne i druge promatrane osobe.

Analiza A i B strane mogla bi se izvršiti i ručno, prebrojavanjem po ispisu, no puno je jednostavnije, brže i točnije upotrijebiti neki program brojača koji će automatski prebrojiti koliko je kojih brojeva na A i na B strani.

Kada radimo uređene k-torke iz skupa od n elemenata, iz kombinatorike je poznato da je mogući broj

kombinacija  $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ . Dakle, ako imamo skup  $X \Leftrightarrow \{x_1, \dots, x_n\}$  od n promatranih osoba, zanima

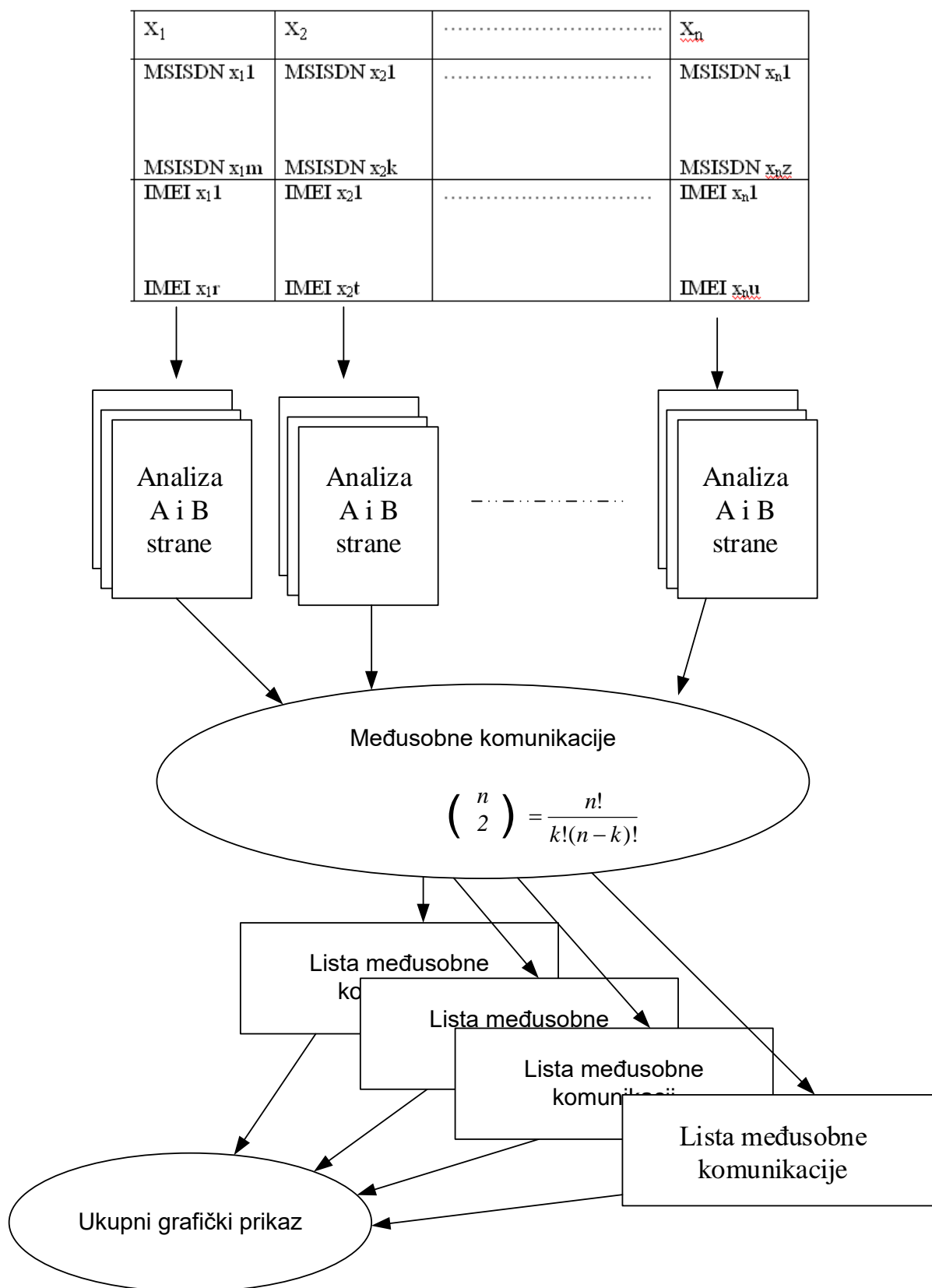
nas koliko uređenih parova možemo napraviti ( $k = 2$ ). Ukupan broj uređenih parova određen je izrazom

$$\binom{n}{2} = \frac{n!}{2!(n-2)!}$$

Međutim, rijetko kad ćemo imati slučaj da baš svaka promatrana osoba komunicira sa svakom. Unutar organiziranog kriminala najčešće postoji hijerarhijska organizacija koja se odlikuje topološkom strukturom stabla. Obično postoji uža rukovodna grupa, dvije do tri osobe, od koje se topološki širi struktura stabla.

Na temelju analize međusobnih komunikacija značajno je upravo izraditi grafički prikaz iz kojeg je takva organizacija u cijelosti razvidna. Dogodit će se ponekad da se među promatranim osobama nađe i osoba koja nema nikakve socijale kontakte s ostalim promatranim osobama ili kontaktira samo s jednom osobom na nižim razinama. To je bitno istaknuti jer se na taj način može utvrditi da netko nije bio uključen u poslove grupe ili, ako je bio, da je njegova funkcija u cijelosti periferna i sporadična.

Logička shema navedenog postupka prikazana je na slici 7.5.11.



Slika 7.5.11. Analiza A i B broja i međusobne komunikacije promatranih osoba

## Literatura

- [1] Winton Afrić, Damir Vakante, «Mobilni komunikacijski sustavi» Skripta, Veleučilište u Splitu, 2002.
- [2] Gunnare Heine, «GSM Networks: Protokols, Terminology, and Implementation, Artec House Boston-London 1998.
- [3] Jhong Sam Lee, Leonard E. Miller, «CDMA System Engineering Handbook» Artec House Boston-London 1998.
- [4] Siegmund M. Redl, Matthias K. Weber, Malcolm W. Oliphant, «GSM and Personal Communications Handbook» Artec House Boston-London 1998.
- [5] Asha Mehrotra, «GSM System Enfinering» Artec House Boston-London 1996.
- [6] Siegmund M. Redl, Matthias K. Weber, Malcolm W. Oliphant, «An Introduction to GSM» Artec House Boston-London 1995.
- [7] Ramjee Prasad, Wernwr Mohr, Walter Konhauser, «2Third Generation Mobile Communication System» Artec House Boston-London 2000.
- [8] Ramjee Prasad, «UniversalWireless Personal Communication» Artec House Boston-London 1998.
- [9] Mirko Brand, dipl.ing. «GSM»  
[http://info.biz.hr/Typo3/typo3\\_01/dummy-3.8.0//index.php?id=628](http://info.biz.hr/Typo3/typo3_01/dummy-3.8.0//index.php?id=628)
- [10] Što je 5G? – Sve o mobilnim mrežama pete generacije <https://mob.hr/sto-je-5g-sve-o-mobilnim-mrezama-pete-generacije/>
- [11] Cell Phone Generations 1G, 2G, 3G and now 4G <http://forums.techeblog.com/others-cell-phone/1205-cell-phone-generations-1g-2g-3g-now-4g.html>
- [12] Effects of 5G wireless communication on human health. Author: Miroslava Karaboytcheva  
Members' Research Service  
PE 646.172 – March 2020. European Parliament
- [13] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP); Gudelines for Limiting Expouse to Time-Varying, Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), Health Physics, Vol. 74, No. 4 (1998) 494-522
- [14] Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja NN 204/2003
- [15] Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja NN 105/99
- [16] Emanuele PiuZZi, Paolo Bernardi, Marta Cavagnaro, Stefano Pisa and James C. Lin: Analysis of Adult and Child Exposure to Uniforme Plane Waves at Mobile Communication Systems Frequencies (900 MHz-3GHz), 2010 IEEE
- [17] ICNIRP GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC, MAGNETIC AND ELECTROMAGNETIC FIELDS (UP TO 300 GHZ), INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, ICNIRP PUBLICATION – 1998
- [18] Mendelski Vedran; „Analiza silazne veze LTE mobilnog sustava“ Master's thesis / Diplomski rad 2019 Degree Grant. Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek
- [19] HACOM: 5G Mreža u Hrvatskoj  
<https://www.hakom.hr/hr/5g-mreza-u-hrvatskoj/392>
- [20] HACOM: 5G Mreža u Hrvatskoj, „Javna dražba za dodjelu prava uporabe radiofrekvencijskog spektra u frekvencijskim pojasevima 700 MHz, 3600 MHz i 26 GHz Dražbovna dokumentacija“