

# Sodobna javna mobilna omrežja

**Boštjan Batagelj**

*Katedra za informacijske in komunikacijske tehnologije*

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija*

*E-pošta: bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si*

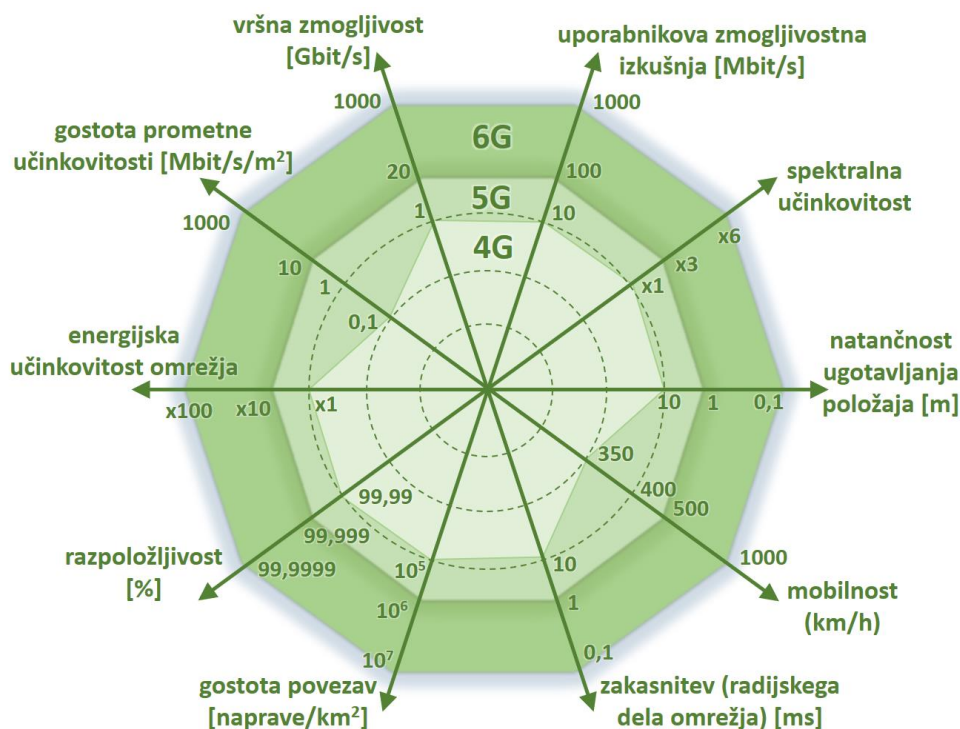
Zloglasna digitalizacija sodobne informacijske družbe ne bi bila možna brez vse bolj naprednih javnih mobilnih omrežij. Po več kot 40 letih od prve izvedbe celičnega radijskega omrežja je za slehernika postala nepogrešljiva komunikacijska infrastruktura, ki služi povezovanju vseh mobilnih naprav, tudi tistih stacionarnih, pri katerih je strošek žične povezljivosti previsok. V zadnji različici brezžičnih mobilnih javnih omrežij je to aktualna peta generacija (5G), ki po zmogljivosti lovi zahteve sodobnih uporabnikov in poleg mobilnosti prinaša še druge prednosti. Mobilno omrežje 5G nam verjetno ne bo ponudilo vsega, kar smo od njega pričakovali, veliko bo prinesla še naslednja generacija. Glede na razvoj dosedanjih petih generacij (1G–5G) lahko naslednjo, šesto generacijo (6G) pričakujemo okrog leta 2030, kar bo naslednji tehnološki korak. Tehnologija 6G, ki bo po vseh parametrih boljša od predhodnih, se razvija predvsem za dobrobit človeštva in nam bo kot dobro orodje služila tudi v spopadu s sodobnimi izzivi človeštva, kot so epidemije in naravne nesreče, saj bomo lahko spremljali, kako se ljudje gibljejo, in reševali življenja tudi brez kršitve uporabnikove zasebnosti.

---

## Zgodovina mobilnih omrežij

Z motivacijo povezovanja redko poseljenega skandinavskega podeželja se je v začetku 80. let prejšnjega stoletja začel uveljavljati prvi komercialni sistem mobilne telefonije NMT (Nordic Mobile Telephone), ki je zaradi izrazite prednosti v mobilnosti kmalu začel osvajati celotno Evropo. Tudi Slovenija je takoj po osamosvojitvi začela graditi svoje prvo komercialno radijsko celično omrežje, ki je omogočalo prenos analognega signala NMT. Digitalizacija telekomunikacijskega omrežja je že pred četrto stoletja omogočila prehod iz analogne prve generacije (1G) v prvo digitalno celično omrežje GSM, pojmovano kot druga generacija (2G), ki je nudilo tudi šifriranje pogovorov. Od prenosa govora, ki je bil osnova prvih dveh generacij in kratkih besedilnih sporočil SMS, ki jih je vpeljala druga generacija, je vodilno vlogo v poznejših generacijah prevzel prenos slikovnih in video širokopasovnih podatkovnih informacij. Prav zaradi vse večjih zahtev uporabnikov po brezžičnih in predvsem mobilnih podatkovnih storitvah so v desetletnih ciklihi slovenski operaterji mobilnega omrežja posodabljali svoja omrežja z novimi generacijami, od tehnološko neposrečene tretje (3G), imenovane UMTS, do uspešne četrte generacije (4G), imenovane LTE, ter danes aktualne zloglasne pete generacije (5G). Raziskuje pa se torej že nova, šesta generacija (6G) v evoluciji mobilne industrije, ki bo naslednji korak v digitalizaciji in izboljšavi kakovosti našega življenja.

Z večanjem potreb mobilnih uporabnikov se posledično razvija omrežje, ki omogoča vedno večji prenos podatkov, vendar je omenjena širokopasovnost samo ena od pomembnih lastnosti javnega mobilnega omrežja. Od sodobnih mobilnih omrežij pa uporabniki že danes poleg širokopasovnosti upravičeno pričakujemo tudi povečano odzivnost, stalno razpoložljivost, celovitost v delovanju in da bodo zaupanja vredna ter ekološka. Vsi ti parametri so mnogo boljši v optičnem dostopovnem omrežju, vendar vrvične optične komunikacije ne omogočajo mobilnosti, ki jo želi sodobni uporabnik, zato bodoča mobilna omrežja poskušajo s pomočjo številnih tehnoloških rešitev doseči ali se vsaj približati lastnostim optičnih omrežij. Pri tem morajo premagovati mnogo naravnih ovir in so posledično tudi vsaj tisočkrat bolj energetsko potratna kot optična omrežja. Zato moramo inženirji skrbeti, da vse, kar se ne premika, povezujemo z optičnim vlaknom, s čimer prihranimo radijski spekter za vse, kar se premika.



Slika 1: Okvirne razlike med 4G, 5G in 6G.

### Naraščajoče prometne zahteve

Zaradi naraščanja prometnih zahtev se je število celic z baznimi postajami v preteklih desetletjih povsod po svetu povečevalo. Tudi v Sloveniji je z začetnih zgolj 16 baznih postaj leta 1992 danes naraslo na skoraj 3.500. Posamezna celica je določena z radijskim pokrivanjem znotraj ene bazne postaje, pri čemer ta zagotavlja povezavo večjemu številu mobilnih uporabnikov, ki lahko med celicami tudi nemoteno prehajajo. Če operaterji mobilnega omrežja ne bi prehajali na vse novejšo tehnologijo, bi morali zaradi vse večje količine prenesenih podatkov in naraščajočega števila naprav, ki se povezujejo v omrežje, število baznih postaj z leti še bolj povečevati. V primeru vztrajanja pri tehnologiji 4G namesto prehoda na tehnologijo 5G bi se moralo število baznih postaj v obdobju štirih let povečati za približno 2,5-krat. S prehodom na spektralno učinkovitejšo tehnologijo 5G in nov frekvenčni prostor bo do nadaljnjega omogočeno nemoteno delovanje celičnega omrežja z enakim številom baznih postaj, kot jih imamo zdaj. Glavni razlog za začetek uvajanja tehnologije 5G torej ni bila želja po hitrejšem prenosu podatkov, temveč naraščanje količine podatkov, ki se prenaša v omrežju.

Zmogljivost prenosa informacij preko telekomunikacijske zveze, ki jo merimo v bitih na sekundo, podaja Shannonov izrek, kjer je poleg sistemskega razmerja med močjo signala in šuma (motnje) tudi razpoložljiva frekvenčna pasovna širina. K izboljšanemu razmerju med signalom in šumom prispevajo izboljšano kanalsko kodiranje in večje število anten, ki tvorijo večantenski sistem na bazni postaji (angl. multiple-input, multiple-output – MIMO). Antene se bodo v svoji najbolj prefinjeni različici s snopom usmerile zgolj proti uporabniški napravi. Kljub nenehnim izboljšavam pa je visokofrekvenčna tehnika v zadnjih 10 letih premalo napredovala, da bi zmogljivost prenosa naraščala s potrebami uporabnikov, zato je edina smiselna rešitev novih generacij mobilnega omrežja povečanje pasovne širine. Tako smo pri tehnologiji 5G priča povečanju pasovne širine frekvenčnih kanalov z 20 MHz, kar uporablja LTE, na 100 MHz ali celo 400 MHz.

Medtem ko je za uporabnika ključna zmogljivost povezave, ki jo podajamo v bit/s, je za operaterje glavni parameter spektralna učinkovitost (bit/s/Hz), saj morajo za pridobljen frekvenčni spekter plačevati državi. Danes razpoložljiva mobilna omrežja delujejo na različnih frekvenčnih področjih, pri čemer ima vsak frekvenčni pas svoje fizikalne lastnosti. Za pokrivanje večjih podeželskih geografskih območij z do 100 uporabniki na kvadratni kilometer je najprimernejši frekvenčni pas 700 MHz, ki ga je nekoč zasedala analogna prizemna televizija. Gostejše pokrivanje urbanega mestnega okolja z 10.000 uporabniki na kvadratni kilometer, ki potrebujejo večje zmogljivosti, je primerneje izvesti na frekvenčnem področju 3,5 GHz. Gosta mestna središča in pokrivanje znotraj stavb, kje gostota uporabnikov doseže tudi do 250.000 na kvadratni kilometer, pa je najprimerneje pokrivali s še višjimi frekvencami. Frekvence 26 GHz se lahko uporabijo tudi za usmerjene zveze za fiksni dostop do uporabnikov kot alternativa optičnim omrežjem, kadar gospodinjstvo še nima možnosti priklopa na fiksno omrežje.

### Frekvenčni spekter za mobilna omrežja

Ker je radijski spekter na nižjih frekvencah zasičen s komunikacijskimi sistemi, lahko v prihodnje pričakujemo, da se bodo mobilne komunikacije z dosedanjih področij okoli gigaherca selile na frekvenčna področja 5 GHz, 26 GHz in celo nad 60 GHz. Prav slednja – t. i. področja milimetrskih valov – bodo namenjena komunikaciji kratkega dosega znotraj majhnih celic. Celice mobilnega omrežja se bodo s tem približale velikosti pokrivanja lokalnega domačega omrežja WiFi. Trenutno ozko grlo komunikacij je namreč prav lokalno brezžično omrežje. Znotraj računalniških procesorjev se podatki obdelujejo s taktom v razredu nekaj GHz. Meddržavne optične povezave imajo zmogljivost tudi več kot 100 terabitov na sekundo, v lokalnih omrežjih pa je zmogljivost zgolj nekaj 100 Mbit/s. To ozko grlo, ki zdaj preprečuje pretočnost prometa od procesorjev osebnih naprav do oddaljenih vozlišč, je eden od glavnih izzivov raziskovalcev na področju komunikacijske infrastrukture.

Brez izjeme ima vsaka generacija mobilnega omrežja na razpolago več frekvenčnega spektra, ki ga z namenom enakomerne tehnološke in tržne razvitosti med operaterje v Sloveniji odgovorno deli Agencija za komunikacijska omrežja in storitve Republike Slovenije (AKOS). V lanskem letu je agencija izvedla kar dve uspešni frekvenčni dražbi za postavitev naprednih mobilnih omrežij, ki bodo v vseh segmentih bistveno prispevala k digitalizaciji Slovenije. Prva je bila podelitev frekvenc 2 x 3 MHz v pasu 700 MHz, namenjenih izgradnji omrežja za poslovno kritične komunikacije med napravami M2M (Machine to Machine). Druga, mnogo bolj obsežna, večfrekvenčna dražba pa je med drugim vključevala tudi vse pionirske 5G-frekvenčne pasove. Operaterji so za frekvence plačali skoraj 170 milijonov evrov, vendar se od njih pričakuje še večje izdatke za izgradnjo širokopasovnih omrežij novih generacij kot tudi namenskega omrežja M2M za poslovno kritične komunikacije.

V slovenskem prostoru imamo novega operaterja mobilnega omrežja in storitev – BeeIN. To je prvi operater za digitalizacijo industrij, ki je na dražbi pridobil frekvence za zagotavljanje poslovno kritičnih komunikacij M2M. Namenska omrežja bo začel vzpostavljati v frekvenčnem pasu 700 MHz. Največji kupec frekvenc na večfrekvenčni dražbi je bil Telekom Slovenije, ki je že v sredini leta 2020 kot prvi operater postavil komercialno delujoče 5G-omrežje v Sloveniji in tudi že intenzivno razvija rešitve za uporabnike iz različnih vertikal, kjer je bolj kot količina prenesenih podatkov pomembna visoka stopnja razpoložljivosti omrežja.

Čeprav milimetrski valovi v trenutnih omrežjih še niso pogosto uporabljeni, raziskovalci že iščemo možnosti uporabe višjega frekvenčnega spektra. Milimetrskim valovom naravno sledijo teraherčni valovi, ki pa se bodo zaradi velike absorpcije v ozračju in nezrelosti tehnologije najverjetneje preskočili. Vse več raziskovalnih naporov je usmerjenih v uporabo svetlobe v bodočih javnih mobilnih omrežjih. Pri tem ni mišljeno, da bi popolnoma nadomestili radijske povezave, temveč se jih najbolj razumno dojema kot dopolnitev obstoječih frekvenčnih pasov. Podobno kot danes ob zahtevi po širokopasovnem prenosu podatkov omrežje uporabi milimetrske valove in celo usmerjanje snopa, bo v bodoče uporabljalo vidno ali mogoče celo infrardečo svetlobo z usmerjenimi svetili.

## Zanesljivost

Za uporabnike sodobnih mobilnih omrežij je poleg velikih pasovnih širin in nizkih zakasnitev kritično pomembna tudi razpoložljivost omrežja, zagotovljena z omrežnimi elementi in povezavami. Sodobna mobilna omrežja so boljša od predhodnih, preprosto zato, ker razvoj napreduje in znamo danes narediti zanesljivejša omrežja z manj izpadi. Samo zanesljiva omrežja bodo nudila pravi doprinos k industriji, kjer se predvideva možnost vključevanja velikega števila naprav interneta stvari IoT (Internet of things). 5G obljublja vključitev milijon naprav na kvadratni kilometer, kar je 10-krat več kot pri 4G. 6G bo število naprav v primerjavi s 5G še podeseteril.

Že danes nekajurni izpad mobilnega omrežja povzroča kaotično stanje in gospodarske posledice. V prihodnosti, ko se bodo v omrežje povezovala tudi avtonomna vozila, bo zanesljivost še pomembnejša. Med tehnološko manj pismenim prebivalstvom 5G vzbuja strah pred še večjo odvisnostjo od tehnologije in kolapsom ob njeni morebitni odpovedi, vendar je vsaj bojazen pred izpadom neupravičena, saj so sprejeti mednarodni standardi visoke zanesljivosti. Od omrežja 5G se pričakuje razpoložljivost v 99,999 % časa (5 devetic), kar je 26,3 sekunde nedelovanja v enem mesecu, ali celo 99,9999 % (6 devetic), kar je zgolj 2,6 sekunde nedelovanja v enem mesecu.

Zanesljivost informacijsko-komunikacijskih tehnologij je kritično pomembna za nove uporabnike, ki v različnih vertikalah upravljajo kritično državno infrastrukturo, kot so elektroenergetska omrežja, javno zdravstvo, javni transport, oskrba z vodo in prehrano ter druge ključne funkcije, ki jih definira zakon o kritični infrastrukturi. Zanje je vsaka sekunda nedelovanja storitev ogromnega pomena, saj vpliva na varnost kritične infrastrukture in njenih uporabnikov.

## Večpotje

Podatkovni signal med bazno postajo in uporabniškim terminalom prenaša visokofrekvenčno elektromagnetno valovanje. Zasnova celičnega omrežja omogoča ponavljanje istega frekvenčnega spektra v območjih različnih baznih postaj. S tem se povečuje izkoriščenost teoretično brezkončnega frekvenčnega spektra, ki pa je zaradi tehnoloških ovir praktično naravno omejena dobrina. Posamezna celica je določena z radijskim pokrivanjem znotraj ene bazne postaje, pri čemer lahko ena bazna postaja oskrbuje več mobilnih uporabnikov, ki lahko med celicami tudi nemoteno prehajajo.

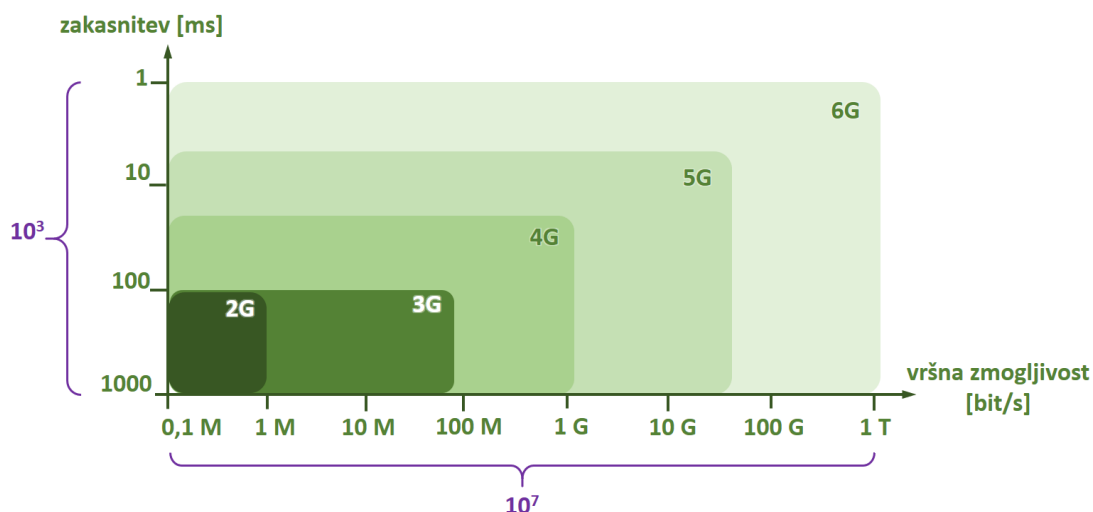
V idealnem praznem prostoru jakost elektromagnetnega valovanja upada s kvadratom razdalje od oddajne antene. V realnem podeželskem okolju, kjer so prisotni tudi odboji od tal, jakost upada s četrto, v urbanih okoljih pa celo s peto potenco. To, na prvi pogled za domet zveze neugodno hitro upadanje jakosti signala, je pravzaprav tisto, ki omogoča gradnjo ekonomsko smiselnih celičnih mobilnih omrežij, saj se lahko iste frekvence ponovno uporabijo v drugi celici. Operater lahko posamezno frekvenco v urbanem okolju ponovi pogosteje, kot bi to storil v primeru počasnejšega upadanja s kvadratom razdalje v praznem prostoru. Hkrati s tem zagotovi višjo zmogljivost celotnega omrežja.

Ker signal med bazno postajo in mobilnim terminalom potuje po več različnih poteh, pride na strani sprejemnika do konstruktivne ali destruktivne interference. Proti destruktivnemu seštevanju signalov zaradi večpotja, katerega posledica sta izpad radijske zveze in zmanjšana razpoložljivost, se v mobilnih omrežjih spopadamo z različnimi tehnikami. Borba proti škodljivemu presihu radijskega signala se je v mobilnih omrežjih skozi generacije razlikovala. 2G je posegel po tehnični rešitvi časovne raznolikosti z izravnalnim sitom, katerega odziv je maksimalno dosegal 4 bite. 3G je uporabljal razširjen spekter, kjer se je informacijski signal na oddajni in sprejemni strani množil z razpršitveno kodo. 4G je posegel po večtonskem delovanju v obliki ortogonalnega frekvenčnega multipleksiranja z dolžino reže 1 ms in razmikom podnosilnikov 15 kHz. 5G je uvedel povečanje razmika med podnosilniki in zmanjšanje dolžine reže, kar omogoča manjše zakasnitve na radijskem delu mobilnega omrežja.

## Odzivnost

V mobilnih omrežjih nove generacije je vse pomembnejša tudi odzivnost, na katero pa so bili vrsto let pozorni zgolj zahtevni uporabniki. Odzivnost, ki je najpomembnejša prednost novih generacij, definira zakasnitev prenosa podatkov, ki jo v praksi podajamo v milisekundah. Če v omrežju v realnem času prenašamo samo zvok, je ta zakasnitev lahko večja od 100 ms (večja od desetinke sekunde). Če želimo v

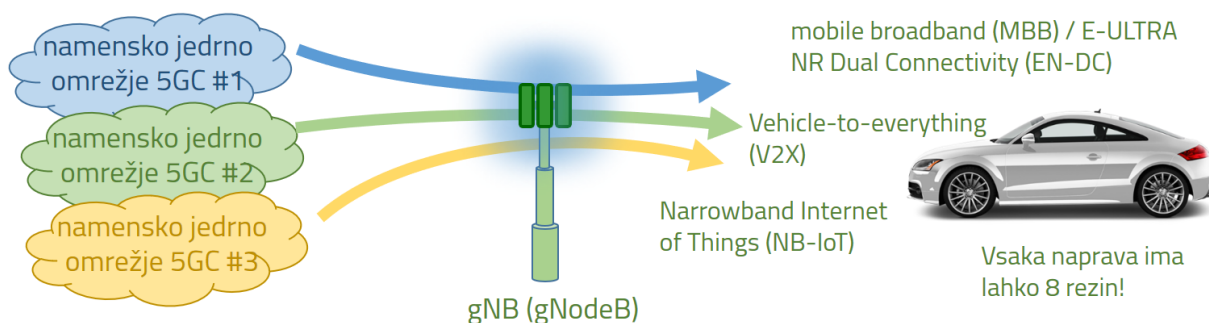
realnem času prenašati tudi video, mora biti zakasnitev reda nekaj 10 ms (danes v večini primerih dosegamo približno 20 ms). Če zmanjšamo zakasnitev na 1 ms, kar je cilj 5. generacije (trenutno smo pri 5 ms), pa bomo lahko krmilili naprave na daljavo in imeli pri tem občutek, da je naprava neposredno ob nas, omogočene nam bodo avtonomna vožnja in številne druge interaktivne storitve. Hitra odzivnost sodobnih mobilnih omrežij se pričakuje tudi v industrijskem okolju, kjer bi sicer industrijske objekte lahko opremili tudi z žičnimi povezavami, vendar je fleksibilnost proizvodnih procesov večja z uporabo ustrezne brezžične tehnologije. Podjetja zato z namenom pospešitve digitalizacije že začenjajo graditi visokoodzivna zasebna mobilna omrežja. Dobra primera prakse v Sloveniji sta podjetje Iskratel, ki je že maja 2020 uvedlo 5G v svoje proizvodne prostore, in Luka Koper, kjer omrežje 5G podjetja Internet institut, d. o. o. pomaga pri optimizaciji logističnih procesov.



Slika 2: Evolucija javnega mobilnega omrežja od 1G do 6G z deset milijonskim povečanjem vršne zmogljivosti in tisočino zakasnitve. V omrežju 3G na prenos dvournega filma čakaš ves dan, v omrežju 4G niti 10 minut, v omrežju 5G pa niti 10 sekund. Za prenos videa v realnem času mora biti zakasnitev reda nekaj 10 ms (danes v večini primerov dosegamo približno 30 ms). Če zmanjšamo zakasnitev na 1 ms, kar je cilj 5G (trenutno smo pri 5 ms), pa se odpirajo nove možnosti interaktivne uporabe.

## Rezinjenje

V nasprotju s prejšnjimi mobilnimi omrežji, ki so poskušali zagotoviti enovit sistem za vse uporabnike, naj bi sistem 5G zagotavljal optimizirano podporo za različne storitve, različne prometne obremenitve in različne skupnosti končnih uporabnikov. Sodobno mobilno omrežje bo osnovano kot množica virtualnih omrežij, ki jih imenujemo rezine. Vsaka od rezin na isti strojni opremi omogoča različne storitve za različne namene. Pri nesamostojnem načinu delovanja, kjer omrežje 5G sobiva z omrežjem 4G, je rezinjenje jedrnega omrežja 4G zagotovljeno z namenskim jedrnimi omrežji, kamor se povezujejo različne naprave. Pri samostojnem načinu delovanja 5G je rezinjenje zagotovljeno z novim namenskim atributom, ki unikatno definira rezino prek celotnega omrežja 5G. Pri tem ima vsaka rezina svojo zasnovo, upravljanje in varnost. Razdeljevanje omrežja na rezine je ena od glavnih prednosti tehnologije 5G, saj omogoča prilagajanje različnim vertikalnim. Vsaka naprava bo lahko povezana v 8 rezin. Vozilo bo tako lahko na primer povezano z drugim vozilom, s proizvajalcem vozil in servisom ter imelo širokopasovno povezavo za zabavo potnikov.



Slika 3: Sodobno mobilno omrežje s pomočjo rezinjenja na eni napravi omogoča osem rezin za zagotavljanje optimizirane podpore različnim storitvam, različnim prometnim obremenitvam in različnim skupnostim končnih uporabnikov.

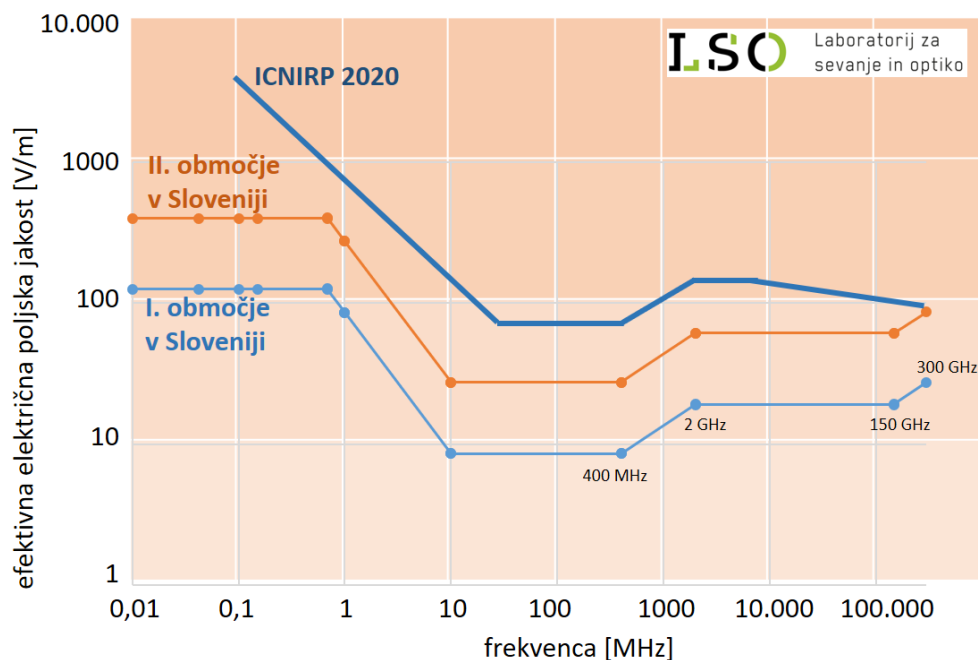
## Varnost

Prihod tehnologije 5G je v svetu ponovno odprl vprašanje varnosti, tako pred elektromagnetnim sevanjem kot tudi pred kibernetскими napadi. Čeprav sta elektromagnetno valovanje in njegov vpliv na človeka, živali in naravo popolnoma neodvisna od uporabljene tehnologije (bistveno je zgolj to, na katerih frekvencah deluje naprava in s kakšno energijo oziroma močjo oddaja), so znanstveniki s področja medicine opravili veliko neodvisnih študij vpliva elektromagnetnega sevanja. Na osnovi vseh teh študij je Mednarodna komisija za varstvo pred neionizirajočimi sevanji (ICNIRP) marca 2020 izdala najnovejše poročilo, ki obsega tudi omrežje 5G. Izkazalo se je, da so bili pomisleki glede vpliva na zdravje povsem neupravičeni, saj se radijski del spektra, kjer so in kjer bodo omrežja 5G, uporablja že desetletja. Sevanje tehnologije 5G v primerjavi s tehnologijo 4G ni drugačno, saj se radijski vmesnik za 5G bistveno ne razlikuje od 4G. Nekaj novosti je, vendar so vse usmerjene v čim manjšo porabo električne energije in posledično tudi manjše sevanje. Aparati, ki se vključujejo v 2G in 3G, oddajajo z maksimalno močjo 1 W, sodobni 5G-mobilni aparati pa le s petino – približno 200 mW.

Pri baznih postajah 5G se bistveno zmanjšanje sevanja obeta s hitrim procesiranjem mikrovalovnih signalov tudi v optičnih čipih, kar bo omogočilo usmerjanje radijskega snopa k vsakemu posameznemu mobilnemu uporabniku. Ker je izsevana energija tesno povezana s porabo električne energije, si vsi načrtovalci omrežja želimo oboje zmanjšati, saj bo le tako omrežje smiselno tudi za operaterje mobilnega omrežja. Bazne postaje 5G so se in se bodo tudi v prihodnje postavljale tako, da ne bodo škodile kakovosti življenja, bivanja in zdravja ljudi. Pri uvajanju v Sloveniji, ki ima celo precej strožje meje, kot jih priporoča mednarodna organizacija ICNIRP, morajo prav vsi slovenski operaterji upoštevati našo zakonodajo in tudi previdnostno načelo.

To, da imamo v Sloveniji zaostrene mejne vrednosti v primerjavi z drugimi evropskimi državami, je s stališča politike sicer dobrodošlo, saj želi prikazati, da varuje zdravje ljudi še bolj, kot to narekujejo mednarodni predpisi, vendar je s strokovnega vidika to popolnoma nepotrebno in vzbuja dvom pri ljudeh drugih držav (ko vidijo, da nimajo vse države enake ureditve).

Ko se razpravlja o varnosti, je na drugi strani kibernetična varnost, ki je zaradi gospodarske vojne med velesilami v obdobju zadnjih let postala tudi vse bolj politična tema. Z inženirskega stališča se je treba zavedati, da ima tehnologija 5G vgrajene sodobne varnostne mehanizme in ni kot taka nič bolj ranljiva od preostalih omrežij. Celo nasprotno, 5G je bolj varno omrežje kot predhodne generacije. Ker bodo v omrežju 5G celice manjše in locirane s centimetrsko natančnostjo, vsebuje mnogo tehničnih rešitev, ki varnost in zasebnost izboljšujejo, operaterji pa morajo poskrbeti, da bodo postopki transparentni in zaupanja vredni. Gledano strogo tehnično, se po mednarodnih standardih rešitve proizvajalcev opreme za 5G bistveno ne razlikujejo – tudi glede varnosti. Če želimo imeti izboljšano nacionalno varnost in poskrbeti za zasebnost uporabnikov, pa je ključno, da v Sloveniji uporabljamo celostne tehnične rešitve zaupanja vrednih svetovnih podjetij in slovenskih akterjev, ki so jih narekovali, implementirali in preizkusili naši strokovno usposobljeni IKT-inženirji.



Slika 4: Mejne vrednosti mednarodne komisije za varstvo pred neionizirnimi sevanji (ICNIRP) in slovenske uredbe o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju.

Omrežje 5G je zasnovano in standardizirano po sodobnih načelih za kibernetsko varnost in je bolj varno pred kibernetskimi napadi kot predhodne generacije, saj je prav tehnološki napredek povečal varnost pred nepooblaščenim manipuliranjem s podatki, ki jih omrežje prenaša. Pri tem moramo vedeti, da je omrežje 5G zgolj infrastruktura, ki skrbi za varen prenos podatkov, in je povsem neupravičen strah, da bo omrežje 5G tisto, ki bo omogočilo zbiranje podatkov in zmanjševalo zasebnost. Podjetja in države, ki želijo izkoristiti moč in vrednost podatkov, na žalost to počnejo tudi brez omrežja 5G. Res pa je, da bo zmogljivejše omrežje omogočilo prenos večjih količin zbranih podatkov in da bo omrežje 5G imelo več točk, ki jih hekerji lahko napadejo. Za uporabnike sta že danes pomembna ozaveščenost, da za njihovo varnost ne morejo v celoti poskrbeti ponudniki storitev, in pridobljeno znanje, da bodo lahko k svoji varnosti na spletu največ prispevali sami, z odgovornim vedenjem.

Medtem ko je v končnih napravah odprava varnostnih tveganj naloga proizvajalcev naprav in uporabnikov, morajo operaterji mobilnega omrežja poskrbeti za varen prenos podatkov in odpravljanje varnostnih lukenj v omrežnem sistemu. Pri tem je še zlasti pomembno, da se operaterji zavedajo kibernetske ranljivosti starih tehnologij in delujejo odgovorno na dolgi rok, saj se nobenih varnostnih ukrepov in sprememb, kljub vrhunskim strokovnim ekipam z različnimi nabori znanj o varnosti in zasebnosti, ne more izvesti čez noč.

Prisluškovanje na optičnih omrežjih je težko, saj bi nepridiprav moral poseči v kabelsko napeljavo med centralo in gospodinjstvom ter razbiti šifrirno tehniko. Pri javnem mobilnem omrežju nepridiprav lažje pride do signala, ker je ta prisoten povsod v prostoru, ki ga pokriva bazna postaja. Seveda tudi mobilna omrežja uporabljajo šifriranje podatkov, ki so iz generacije v generacijo bolj dovršena, vendar je varnost mobilnih omrežij posredno omejena s prisotnostjo starih generacij. Z drugimi besedami: čeprav je omrežje 5G grajeno po sodobnih varnostnih standardih, je toliko ranljivo, kot je močan njegov najšibkejši člen. To pa sta zaenkrat še vedno omrežje 2G in 3G, s katerima omrežje 5G sobiva. Prav zaradi zastarelosti in potencialno večjih kibernetskih tveganj ter energetske in spektralne neučinkovitosti se bo letos ugasnilo omrežje 3G (UMTS), 2G pa najverjetneje v petih letih ali pa se bo preoblikovalo v sodobnejše programske omrežje.

## Lociranje

Industrija si ob digitalizaciji želi tudi avtomatiziranih proizvodnih procesov in mobilnih robotov s centimetrsko natančnostjo ugotavljanja trenutnega položaja, še zlasti v zaprtih prostorih, kjer globalni satelitski navigacijski sistemi ne delujejo. Že omrežje 2G je poznalo celično identifikacijo, ki je določila položaj uporabnika glede na pokrivanje posameznega sektorja bazne postaje. Delovala je povsod, vendar je bila njena natančnost odvisna od velikosti celice oziroma sektorja. Večjo natančnost je mogoče dobiti že z merjenjem jakosti sprejete moči, pri čemer pa je treba poznati izgube signala na radijski poti. Iz tega se oceni oddaljenost uporabnika od bližnjih baznih postaj, nato pa se določi lega uporabnika s pomočjo presečišč navideznih krožnic, ki jih okrog baznih postaj tvorijo izračunane vrednosti razdalj. Ker je jakost sprejete moči odvisna od orientacije uporabniške naprave in okolja, kjer je uporabnik, je natančnost dobra samo v neposredni vidljivosti oziroma bližini bazne postaje. Pri 2G je že delovala tudi funkcija učasovanja, pri čemer bazna postaja uporabniškemu terminalu pošlje ukaz, na osnovi katerega nastavi pričakovano časovno zakasnitev pri sprejemu signala od uporabnika. V 5G in 6G se pričakuje ugotavljanje položaja uporabnika na en meter ali celo nekaj centimetrov. Pri tem bodo uporabljene nove tehnične rešitve, kot so določitev kota oddaje in sprejema, večcelična meritev časa potovanja signala in meritev razlike časov, ko uporabniške naprave zgolj sprejemajo signale, kot je značilno za sprejemnik satelitskega navigacijskega signala. Predvsem slednji način uporabniku omogoča, da ugotovi svoj položaj, ne da bi za to vedelo omrežje, saj pri tem ne izkorišča omrežnih virov.

## Varčna in inteligentna mobilna omrežja

Poleg stroškov ob nakupu frekvenc in opreme so za operaterja pomembni tudi operativni stroški, kjer velik delež predstavlja poraba električne energije. Zato je v novih generacijah mobilnih omrežij bistveno, da se prenos podatkov izvede varno, v čim krajšem času, s čim manjšo porabo frekvenčnega spektra in tudi električne energije. Prav pri slednjem sodobna omrežja obljublajo bistveno odstopanje od predhodnih, saj optimizirajo porabo električne energije in so posledično bolj ekološka. Od 5G se pričakuje 10- do 100-krat manjša poraba električne energije v primerjavi s 4G, 6G pa ima za cilj še dodatno 10-kratno povečanje energetske učinkovitosti.

Celotne informacijsko-komunikacijske tehnologije so pred 10 leti pustile približno 2 % ogljični odtis. Ta številka je v današnjem času narasla že na 4 %, in če se bo ta trend nadaljeval, bomo v naslednjih 10 letih dosegli 6 % ali, po pesimističnih napovedih, celo 8 % celotnega ogljičnega odtisa; seveda tudi na račun manjšega števila potovanj in vseh preostalih kvarnih okoljskih vplivov, ki jih odpravlja digitalizacija družbe. Prav energetska učinkovitost je bistvena prednost sodobnih mobilnih omrežij, in ker nam je mar za okolje, se je smiselno zavzemati za njihovo čimprejšnjo uvedbo in opustitev starih, energijsko potratnih omrežij, kot je 3G. To je tudi eden od bistvenih razlogov, da Telekom Slovenije letos jeseni umika mobilno omrežje 3G.

Za zmanjšanje porabe električne energije bodo v sodobnih mobilnih omrežjih na makro nivoju pripomogli ukrepi na področju topologije omrežja, kjer igrata ključni vlogi hierarhija celic in optimizacija njihove velikosti. Sodoben nadzor omrežja mora omogočati stanje hibernacije baznih postaj v manj prometnih časovnih obdobjih ali ko v celici ni uporabnikov ter neposredno povezljivost terminalnih naprav, ki je ključna pri komunikaciji med vozili. Že današnje mobilno omrežje pozna upravljanje oddajne moči, ki je vedno na meji prenosa podatkov z dovolj majhnim številom napak, da jih algoritmi za popraviljanje napak (FEC) še lahko popravijo. V prihodnje se poleg upravljanja moči in motenj pričakuje še dinamično in vzajemno upravljanje frekvenčnih spektrov, kar bo še za trikrat povečalo spektralno učinkovitost. Tudi elementi omrežja, kot so ojačevalniki, A/D- in D/A-pretvorniki, antene in filtri, so danes bolj učinkoviti kot pred desetletjem. Ne nazadnje je omrežje zgrajeno iz prilagodljivih oddajnikov in sprejemnikov, ki omogočajo prilagajanje modulacije, kodiranja, števila anten, števila podnosilnikov in drugih komunikacijskih parametrov.



Za brezhibno delovanje mobilnih omrežij nove generacije pa poleg radijskih parametrov poskrbi tudi izboljšano zaledno omrežje (fiksno omrežje optičnih kablov), na katero so priključene bazne postaje. Že danes je večina baznih postaj povezanih z optičnimi vlakni, saj fotonika za prenos informacije porabi do 1000-krat manj energije kot visokofrekvenčna tehnika in obenem ponuja tudi enormne širokopasovnosti. Ne nazadnje ne smemo pozabiti, da sodobna mobilna omrežja prinašajo tudi zlivanje informacijskih sistemov in telekomunikacijskih omrežij v enovito IKT-omrežje, ki bo vsebovalo tako radijsko kot optično tehnologijo, od katere pa se nedvomno pričakuje največ prednosti za poslovanje. Ker se število baznih postaj povečuje, se v upravljanje omrežja uvaja avtomatske postopke in umetno inteligenco. Inteligenca omrežja je nujna predvsem zaradi vse večjega števila naprav, ki jih človek ne more več obvladati. Človek pri upravljanju še vedno vnaša človeške napake.

---

**Boštjan Batagelj** je leta 2003 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani, kjer je trenutno izredni profesor na Katedri za informacijske in komunikacijske tehnologije. Poučuje strokovne predmete Satelitske komunikacije in navigacija, Tehnološke osnove multimedije, Optične komunikacije in Radijske komunikacije. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za sevanje in optiko, kjer se ukvarja s fizičnim nivojem prenosnih in dostopovnih telekomunikacijskih omrežij, zasnovanih na radijski in optični tehnologiji. Je avtor več kot 300 člankov, izumitelj pri desetih patentih in soustanovitelj dveh zagonskih podjetij, sodeluje pa tudi pri domačih in mednarodnih raziskovalnih projektih s področja radijskih in optičnih tehnologij