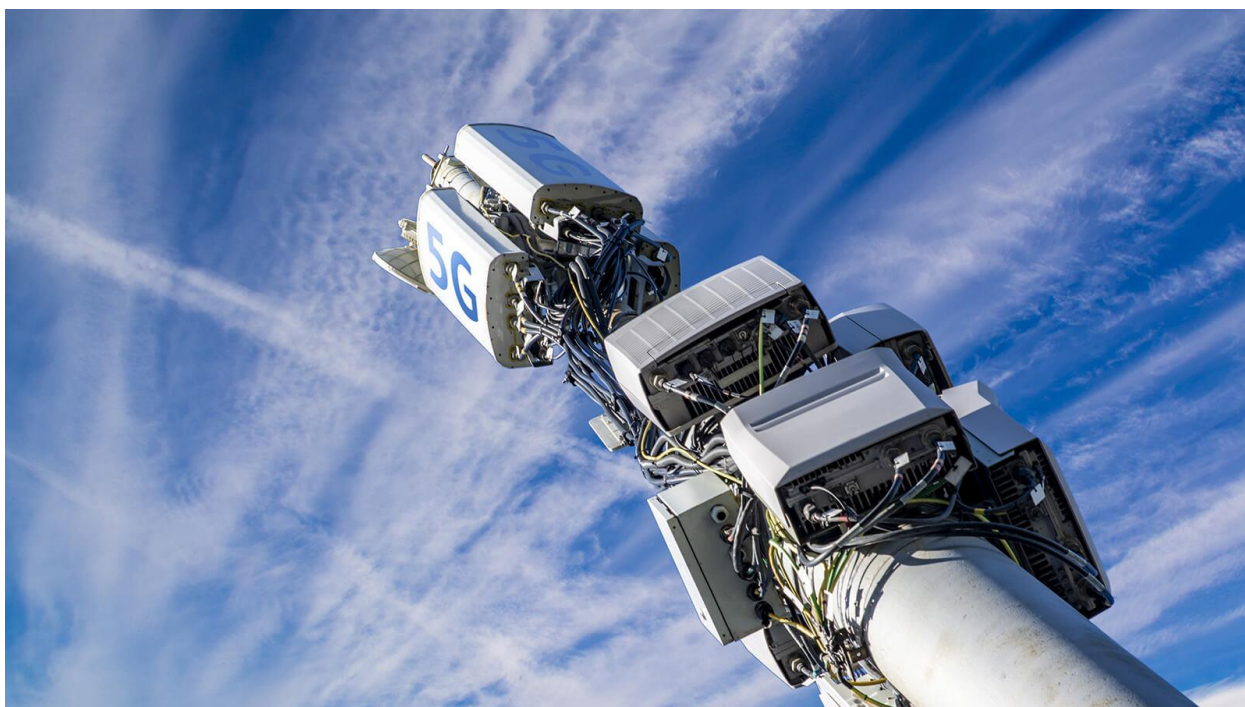




POROČILO O ŠTUDIJI

ŠTUDIJA O IZPOSTAVLJENOSTI ELEKTROMAGNETNIM SEVANJEM (EMS) V OKOLICI NOVIH BAZNIH POSTAJ 5G V LJUBLJANI



december 2023

ŠTUDIJA O IZPOSTAVLJENOSTI ELEKTROMAGNETNIM SEVANJEM (EMS) V OKOLICI NOVIH BAZNIH POSTAJ 5G V MESTNI OBČINI LJUBLJANA

Poročilo o študiji, december 2023

Avtorji

Tomaž Trček, Peter Gajšek, Blaž Valič

Izdajatelj

Inštitut za neionizirna sevanja
Pohorskega bataljona 215
1000 Ljubljana

Inštitut za neionizirna sevanja (www.inis.si) je kot neodvisna in nevladna organizacija registrirana za raziskave in razvoj na interdisciplinarnem področju problematike neionizirnih elektromagnetnih sevanj. V okviru INIS deluje skupina, ki je usposobljena za najzahtevnejše razvojno-raziskovalne naloge s področja tehniškega, administrativnega, pravnega in zdravstvenega nadzora nad neionizirnimi sevanji.

Ker smo mednarodno priznana institucija na področju varstva okolja in varovanja zdravja pred neionizirnimi elektromagnetnimi sevanji, smo s strokovnim kadrom, bogatimi mednarodnimi povezavami in sodobno laboratorijsko opremo vrhunsko usposobljeni, da odgovorimo na vsa vaša vprašanja glede problematike neionizirnih elektromagnetnih sevanj v bivalnem in delovnem okolju.

Inštitut za neionizirna sevanja je s strani Slovenske akreditacije akreditirani organ za izvajanje meritev elektromagnetnih sevanj v frekvenčnem območju od 0 Hz do 40 GHz ter optičnih sevanj v območju od 200 – 3000 nm. Je hkrati tudi pooblaščen za izvajanje prvih meritev in obratovalnega monitoringa za vire NF in VF elektromagnetnega sevanja s strani Ministrstva za okolje in prostor (Pooblastilo št. 35459-1/2014-2).

Sofinancerji:

- Projekt Forum EMS – www.forum-ems.si

Glede na predhodne analize in številne objave v literaturi lahko pričakujemo, da se bo obremenjenost naravnega in življenjskega okolja z visokofrekvenčnimi elektromagnetnimi sevanji (VF EMS) glede na Uredbo o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (UL RS 70/96) zaradi umeščanja novih baznih postaj 5G na lokacijah, kjer že obratujejo prehodne generacije mobilne telefonije, v skupnem smislu povečala.

Zato smo podrobno ovrednotili izpostavljenost ljudi v urbanem okolju različnim kombinacijam in možnostim sočasnega delovanja obstoječih in nove generacije (5G) mobilne telefonije na 10 različnih lokacijah ter ovrednotili izpostavljenost na njihovem vplivnem območju.

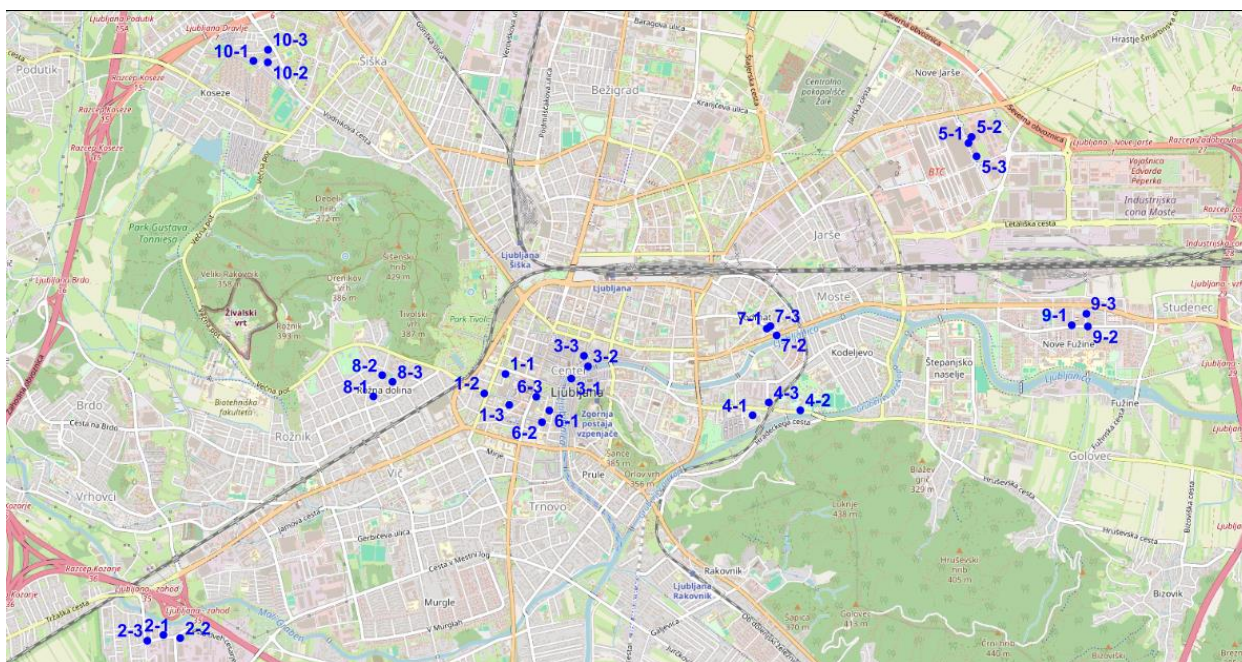
V študiji so obravnavani vsi predvideni parametri, ki odločilno vplivajo na izpostavljenost ljudi EMS. Pred izvedbo meritev smo zbrali in analizirali vse tehnične podatke o baznih postajah vključno s 5G. Ob upoštevanju mednarodnih standardov in literature smo natančno opredelili posamezne tehnične parametre, ki lahko pomembno vplivajo na vrednosti EMS v okolici baznih postaj 5G. Z razliko od obstoječih tehnologij 2G, 3G in 4G tehnologija 5G prinaša predvsem funkcionalnost beamforming, ki je z vidika obremenjevanja okolja izjemno pomembna. Zaradi usmerjenosti in s tem visokih dobitkov anten se lahko obremenitve v nekaterih okoljih povečajo. V tem kontekstu smo tudi analizirali prispevek tehnologije 5G k ostalim generacijam glede obremenitev okolja.

Meritve EMS smo izvedli v skladu z Uredbo o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju, Pravilnikom o prvih meritvah in obratovalnem monitoringu za vire EMS (UL RS 70/96) ter v skladu z enim ali več mednarodnimi standardi IEEE Std C95.3:1991, SIST EN 62232: 2019, SIST ENV 50166-2:1995, SIST IEC 61566:1999 in SIST EN 50492: 2009 in SIST EN 50492:2009/A1: 2014.

V študijo smo na podlagi predhodno ovrednotenih tehničnih parametrov vključili 10 različnih lokacij baznih postaj v Ljubljani. Na vsaki lokaciji smo opravili meritve na treh merilnih mestih. Meritve smo izvedli na človeku dostopnih lokacijah 1 m nad tlemi, čimbolj v smeri glavnih snopov anten na različnih oddaljenostih od bazne postaje. Na vsakem merilnem mestu smo izvedli meritve po 'sweep' protokolu, ki predvideva pregled vrednosti na določenem manjšem območju velikosti 1 x 1 m. Na pregledanem območju smo kot rezultat meritev shranili največjo izmerjeno vrednost. Meritve smo izvedli med 9. in 16. uro, ko so obremenitve okolja običajno najvišje, Meritve smo izvajali od meseca novembra 2022 do meseca januarja 2024.

T 1: Seznam lokacij meritev.

lokacija meritev	število meritev na lokaciji	število merilnih mest na posamezni lokaciji	skupno število merilnih mest
Ljubljana	10	3	30



S 1: Lokacije meritev prikazane na zemljevidu.

Na vseh merilnih mestih smo izvedli pasovno selektivne meritve in sicer v najpomembnejših frekvenčnih pasovih (FM radio, DAB radio, profesionalne zveze, DVB-T, GSM-R ter mobilna telefonija v frekvenčnih pasovih 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1500 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, 2300 MHz, 2600 MHz in 3500 MHz). Na vsakem merilnem mestu smo za vsak frekvenčni pas izmerili jakost električnega polja E [V/m]. Frekvenčno območje merjenih frekvenčnih pasov je podano v tabeli T 2.

T 2: Frekvenčni pasovi v katerih so bile izvedene meritve.

ime frekvenčnega pasu	frekvenčno območje [MHz]	primarna uporaba frekvenčnega pasu
FM	87 – 108	FM radio
DAB	174 – 230	digitalni prizemni radio
Zveze	380 – 470	profesionalne zveze (policija, gasilci,...)
DVB-T	470 – 694	digitalna prizemna televizija
700 MHz	738 – 788	4G, 5G mobilna telefonija
800 MHz	791 – 821	4G mobilna telefonija
GSM-R	920 – 925	Sistem GSM za železniško omrežje
900 MHz	925 – 960	2G, 3G, 4G mobilna telefonija
1500 MHz	1427 – 1518	4G mobilna telefonija
1800 MHz	1805 – 1880	2G, 4G mobilna telefonija
2100 MHz	2110 – 2170	3G, 4G mobilna telefonija
2300 MHz	2300 – 2400	4G mobilna telefonija
2600 MHz	2570 – 2690	4G mobilna telefonija
3500 MHz	3300 – 3800	5G mobilna telefonija

2.1 Merilna oprema

Meritve smo izvedli z najsodobnejšo merilno opremo za merjenje EMS - s selektivnim spektralnim analizatorjem Narda SRM-3006 s pripadajočima triosnima merilnima sondama za merjenje električnega polja v frekvenčnem področju od 27 MHz do 3 GHz in 420 MHz do 6 GHz. Razširjena merilna negotovost celotnega merilnega sistema znaša $\pm 2,7$ dB in $\pm 3,3$ dB. Merilni sistem je posebej prilagojen za merjenje baznih postaj mobilnih sistemov vseh generacij mobilne telefonije (GSM, UMTS, LTE in 5G) in drugih virov VFEMS.

Pri določanju razširjene merilne negotovosti, ki vpliva na točnost meritev, smo upoštevali vse pomembne vplivne veličine. Merilna negotovost uporabljene merilne opreme je podana v tabeli T 3.

T 3: Podatki o uporabljeni merilni opremi, kalibraciji in razširjena merilna negotovost.

zap. številka	oznaka	opis (ime in proizvajalec)	datum kalibracije	kalibracija veljavna do	razširjena merilna negotovost
1	MI 05-003 in MI 08-005	Spektralni analizator Narda SRM 3006 in 3D antena Narda 3501	17.09.2020	17.09.2024	$\pm 2,7$ dB
2	MI 05-003 in MI 08-006	Spektralni analizator Narda SRM 3006 in 3D antena Narda 3502	17.09.2020	17.09.2024	$\pm 3,3$ dB



S 2: Uporabljen instrument za merjenje elektromagnetnega sevanja Narda SRM-3006 in primer izvajanja meritev EMS.

2.1 Vrednotenje obremenitev

Izmerjene vrednosti električnega polja smo ovrednotili glede na mejne vrednosti, ki jih določa Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju. Mejne vrednosti so frekvenčno odvisne in so za I. in II. območje varstva pred sevanji podane v tabeli T 4.

T 4: Mejne vrednosti za električno polje za najpomembnejše visokofrekvenčne tehnologije oziroma vire.

ime frekvenčnega pasu in frekvenčno območje [MHz]	mejne vrednosti za električno polje [V/m]	
	I. območje	II. območje
87 – 108 (FM)	8,60	27,50
174 – 230 (DAB)	8,60	27,50
380 – 470 (Zveze)	8,60-9,32	27,50-29,70
470 – 694 (DVB-T)	9,32-11,33	29,70-36,09
738 – 788 (700 MHz)	11,68-12,07	37,22-38,46
791 – 821 (800 MHz)	12,09-12,32	38,53-39,25
920 – 925 (GSM-R)	13,04-13,08	41,55-41,67
925 – 960 (900 MHz)	13,08-13,32	41,67-42,45
1427 – 1518 (1500 MHz)	16,24-16,75	51,75-53,38
1805 – 1880 (1800 MHz)	18,27-18,64	58,20-59,40
1880 – 1900 (DECT)	18,64-18,74	59,40-59,72
2110 – 2170 (2100 MHz)	19,00	61,40
2300 – 2400 (2300 MHz)	19,00	61,40
2400 – 2484 (WiFi)	19,00	61,40
2570 – 2690 (2600 MHz)	19,00	61,40
3300 – 3800 (3500 MHz)	19,00	61,40
5150 – 5875 (WiFi)	19,00	61,40

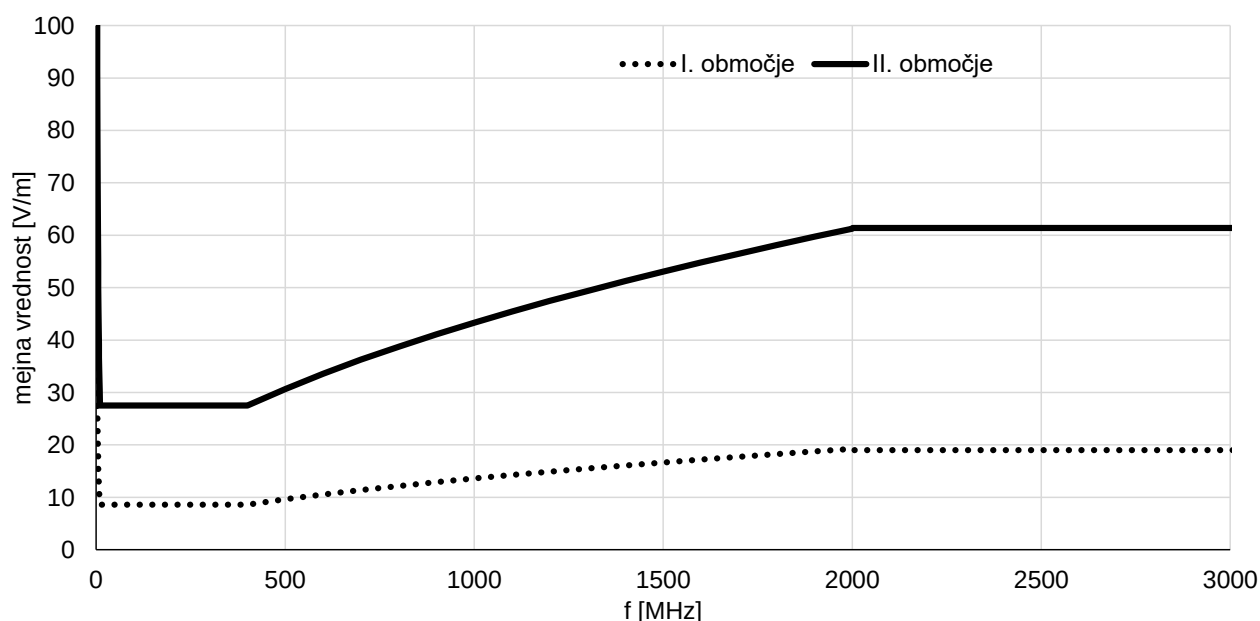
V I. območje varstva pred sevanji spadajo tista območja, ki so namenjena bivanju oziroma kjer se prebivalstvo zadržuje dalj časa (stanovanja, šole, bolnišnice...), zato tu veljajo strožje mejne vrednosti. II. območje pa predstavlja ostala območja (gozdovi, njive, transportna in industrijska območja...). Vse izmerjene vrednosti električnega polja so bile ovrednotene glede na mejne vrednosti za I. območje varstva pred sevanji.

Postopek določanja skupnih obremenitev okolja, ki upošteva prispevek vseh tehnologij oziroma virov na določeni lokaciji, je opredeljen v Prilogi 2 uredbe. Skupne obremenitve okolja se določajo s pomočjo enačbe E 1:

$$\text{E 1} \quad SI = \sum_i \left(\frac{E_i}{L_{E,i}} \right)^2 \quad 680 \text{ kHz} < f \leq 300 \text{ GHz},$$

kjer je:

- f – frekvenca signala,
- E_i – jakost električnega polja i tega vira oziroma i te frekvence in
- $L_{E,i}$ – i temu frekvenčnemu območju ustrezna mejna vrednost.

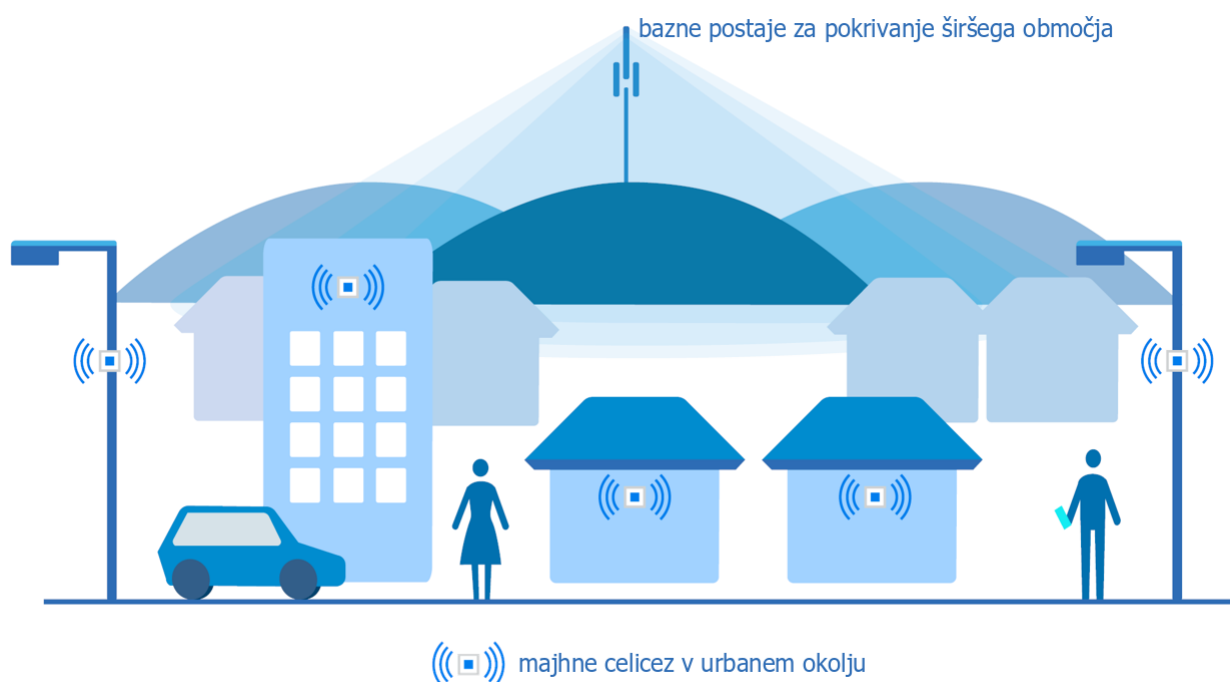


S 3: Prikaz mejnih vrednosti v območju do 3000 MHz, kjer delujejo brezžični sistemi.



3 Omrežje 5G

Omrežje 5. generacije mobilne telefonije (5G) je naslednja generacija sistemov brezžične tehnologije, ki zagotavlja večje hitrosti prenosa podatkov od vseh prejšnjih generacij. Pri testiranju tehnologije 5G hitrosti dosegajo od 700 do 3025 Mb/s, kar pomeni, da se na primer filmi, ki so za prenos z omrežjem 4G potrebovali nekaj minut, prenesejo v le nekaj sekundah. Čeprav pri uporabi omrežja 5G najprej pomislimo na pametne telefone in druge mobilne naprave, obstajajo številne druge aplikacije, ki bodo uporabljale tehnologijo 5G. Razvoj novih generacij mobilne telefonije se usmerja tudi v izboljšano podporo komunikaciji stroj-stroj oziroma tako imenovanemu internetu stvari (IoT), kar bo pospešilo razmah pametnih tehnologij, avtomatizacije in avtonomnih vozil.



S 4: Prikaz omrežja 5G z makro in majhnimi celicami.

Omrežje 5G bo poleg obstoječih celic vsebovalo tudi majhne celice, ki bodo omogočale velike prenosne hitrosti na posameznem manjšem območju. Število teh celic se bo z uporabo novih frekvenc in naprednih anten povečevalo. Čeprav omrežja, ki uporabljajo frekvenčne pasove pod 6 GHz, še vedno predstavljajo hrbtenico mobilnih komunikacij, bo za novo omrežje 5G potrebno zagotoviti dodatne frekvenčne pasove nad 6 GHz, saj so obstoječi spektri že zasedeni. Razvoj in širitev tehnologije v nove frekvenčne pasove (t. i. **milimetrski valovi**) odpira nova vprašanja glede izpostavljenosti, vplivov na okolje in zdravje, umeščanja v prostor in zagotavljanja skladnosti z mednarodnimi standardi.

3.1 Značilnosti omrežja 5G

5G prinaša višje frekvence in večje pasovne širine¹ od predhodnih generacij mobilne telefonije, kar bo omogočilo bistveno višje hitrosti prenosa podatkov. Zelo visoke frekvence nad 3 GHz omogočajo zelo veliko pasovno širino, zato so idealne za povezovanje velikih skupin uporabnikov, ki se pogosto oblikujejo v gosto naseljenih območjih, na množičnih prireditvah...

Pomembna novost so **pametne antene** (t.i. Massive MIMO), ki lahko oblikujejo usmerjene snope (t.i. beamforming) in tako usmerijo signal v tisto območje, kjer se nahajajo trenutno aktivni uporabniki. S tem se zagotovi optimalne poti signala do vsakega povezanega uporabnika. Te pametne antene bodo omogočile učinkovito delovanje omrežja, saj zmanjšajo motnje in povečajo možnosti, da signali v različnih pogojih dosežejo predvidenega prejemnika. Pametne antene ustvarjajo in usmerjajo signale le, kadar in kjer so potrebni. Če torej ni uporabnikov, denimo ponoči v spalnem naselju, oddajajo zgolj sinhronizacijski signal z močjo, ki je tudi do 1000-krat nižja od tiste, pri kateri deluje bazna postaja, ko je polno zasedena.

Po mnenju strokovnjakov za nizke izpostavljenosti je ključnega pomena dobra infrastruktura, saj mobilni telefon, ki ga nosimo pri sebi in ga imamo med telefoniranjem ali prenosom podatkov tik ob telesu/glavi, ob slabi pokritosti s signalom oddaja z večjo močjo, da njegov signal doseže bazno postajo in lahko zagotavlja dovolj kakovostno delovanje. Pričakovati je, da bodo mobilni operaterji pri iskanju lokacij za bazne postaje 5G bolj sodelovali, saj možnost uporabe iste lokacije vsem prinaša finančne prihranke pri investiranju v infrastrukturo. Glavno omejitev pri solokacijah pa predstavlja zakonsko določena najvišja vrednost skupne izpostavljenosti zaradi delovanja vseh virov hkrati na istem območju.

3.2 Kako deluje 5G

Sprva bodo omrežja 5G uporabljala obstoječo infrastrukturo. Bazne postaje 5G (makro celice) so podobne baznim postajam 2G, 3G in 4G ter so namenjene zagotavljanju pokritosti večjih območij. Nameščene bodo na antenske stolpe skupaj z obstoječimi antenami baznih postaj (glej sliko S 5). Višje frekvence pomenijo manjše antene, a **VF EMS** pri frekvencah nad 20 GHz imajo precej manjši doseg, med oddajno in sprejemno napravo pa ne sme biti ovire.



S 5: Prikaz antenskega stolpa na poslovni stavbi, kjer se na isti lokaciji nahajata bazna postaja obstoječega omrežja 2G, 3G in 4G ter nova bazna postaja omrežja 5G.

¹ Pasovna širina podaja frekvenčni razpon, ki v telekomunikacijah pove, kakšen je spekter frekvenc, ki se lahko prenaša preko prenosne poti. Pasovna širina je v premo sorazmerna s hitrostjo prenosa informacij.

3.3 Kaj dejansko novega prinaša 5G?

3.3.1 Visoke hitrosti prenosa podatkov

Omrežje 5G bo zagotavljalo bistveno večje hitrosti prenosa. Najvišja hitrost prenosa podatkov lahko doseže 20 Gbps v smeri do uporabnika (*download*) in 10 Gbps v smeri od uporabnika (*upload*). Ob tem je potrebno poudariti, da to ni hitrost, ki jo ima na razpolago sleherni uporabnik 5G (razen, če je v tistem trenutku edini povezan uporabnik na bazno postajo), temveč je to hitrost, ki jo delijo vsi trenutni uporabniki posamezne bazne postaje. Čeprav najvišje hitrosti prenosa podatkov za 5G zvenijo zelo impresivno, bodo tipične dejanske hitrosti nižje. Specifikacija zahteva hitrost prenosa v smeri do uporabnika vsaj 100 Mbps in od uporabnika vsaj 50 Mbps.

3.3.2 Minimalne zakasnitve

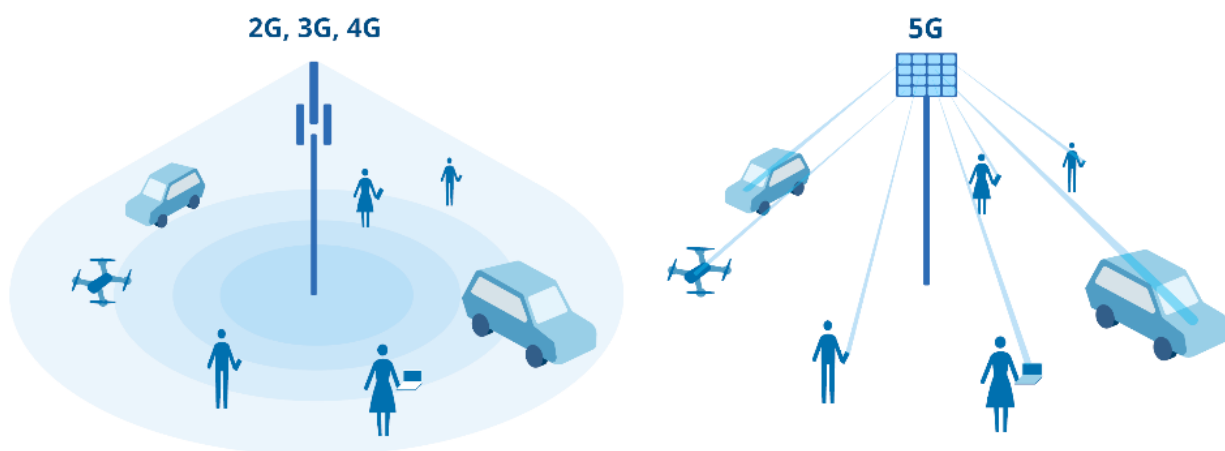
Zakasnitev ali latenca v mobilni telefoniji je čas, ki ga omrežje potrebuje, da se odzove na zahtevo po prenosu podatkov. Zakasnitev v omrežju 5G bo bistveno krajša kot v obstoječih mobilni omrežjih, v idealnih okoliščinah bo znašala največ 4 milisekunde, pri URLLC (*Ultra Reliable Low Latency Communications*) pa zgolj 1 milisekundo. To z vidika opravljanja klicev ni pomembna lastnost, je pa zelo pomembna pri komunikaciji različnih naprav med seboj (IoT), da lahko delujejo v realnem času.

3.3.3 Učinkovitost

Bazne postaje 5G morajo biti med uporabo tudi energetsko učinkovite in preklopiti na nizkoenergijski način, ko niso v uporabi. V idealnem primeru bi bazna postaja morala biti sposobna preiti v nizkoenergijsko stanje v 10 milisekundah po oddaji zadnjega signala/uporabniškega prometa. Razmerje med največjo oddajno močjo bazne postaje, ko je polno obremenjena, in oddajno močjo, ko ni obremenjena, je pri tehnologiji 5G bistveno večje. To razmerje je pri baznih postajah 3G približno 10, pri baznih postajah 4G približno 1.000 in pri baznih postajah 5G približno 10.000. To v praksi pomeni, da bazna postaja 5G takrat, ko ni obremenjena, seva bistveno manj kot obstoječe bazne postaje 2G, 3G in 4G.

3.3.4 Mobilnost

S tehnologijo 5G bodo bazne postaje podpirale uporabnike, ki se gibljejo s hitrostjo do 500 km/h. Tako bo prenos podatkov pri baznih postajah 5G dostopen tudi potnikom na hitrih vlakih. Čeprav je to v omrežjih 4G (LTE) enostavno zagotoviti, je takšna mobilnost izziv za nova omrežja 5G, ki delujejo v milimetrskem frekvenčnem območju.



S 6: Običajne antene omrežja 2G, 3G in 4G (levo) zagotavljajo pokrivanje podobno kot reflektor, ki osvetljuje široko območje. Pametne antene omrežja 5G (desno) pa so kot ozko umerjen snop svetlobe, ki zagotavlja pokrivanje le tam, kjer je to potrebno, in s tem zmanjšuje neželene signale; ko ni prenosa, tudi ni potrebe po oddajanju in s tem visokofrekvenčna EMS.

3.3.5 Množična povezava različnih naprav

Tehnologija 5G bo imela možnost podpirati veliko več povezanih naprav kot v omrežju 4G (LTE). Standardna omrežja 5G naj bi bila sposobna omogočiti en milijon povezanih naprav na kvadratni kilometer. To je ogromno število, več kot zadostno za množično povezanost naprav, ki jih bo omogočil internet stvari (IoT).

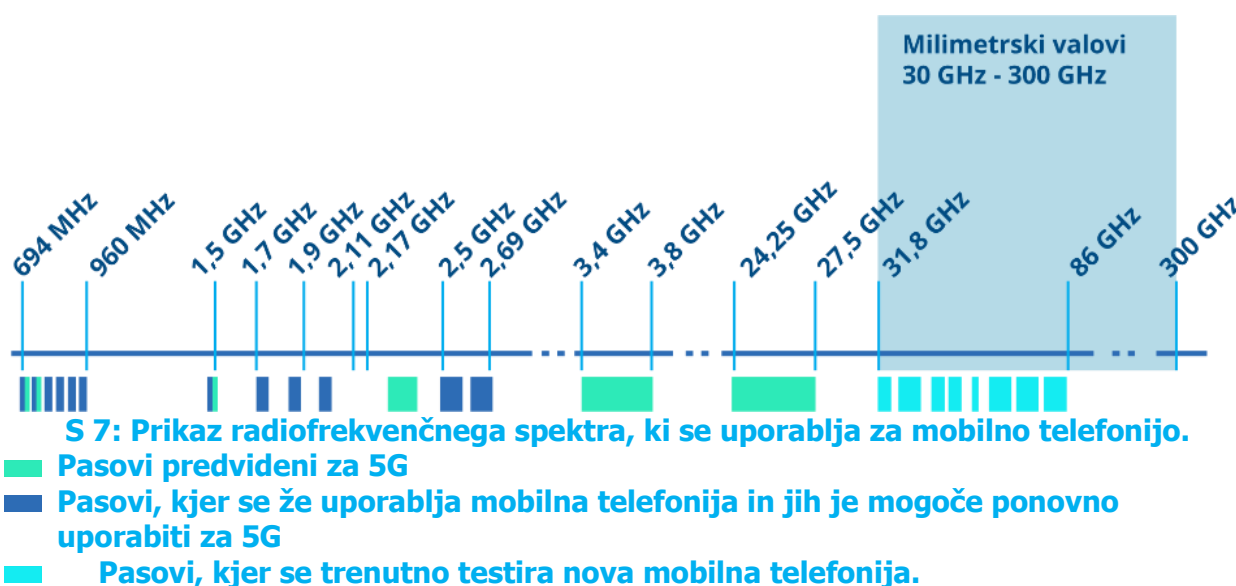
3.4 Kateri frekvenčni pasovi so dodeljeni 5G?

Leta 2016 je Evropska komisija izdala akcijski načrt 5G za Evropo, v katerem je določila več ukrepov za uvedbo 5G, vključno s predlaganim časovnim razporedom in frekvenčnimi pasovi. Države članice pa je pozvala, naj omogočijo dostop do radiofrekvenčnega spektra za 5G, saj je le-ta naravna dobrina, ki jo v vsaki posamezni državi upravlja regulator. V skladu s politiko EU so predvideni trije frekvenčni pasovi za novo omrežje 5G:

- 700 MHz in 3,6 GHz - uporaba teh radiofrekvenčnih pasov ni nova. Pas 3,6 GHz se trenutno že uporablja za mobilno telefonijo in WiMAX, medtem ko so se frekvence okrog 700 MHz vrsto let uporabljale za oddajanje analogne televizije, po ukinitvi analognih televizijskih oddajnikov in njihovi nadomestitvi z DVB-T oddajniki pa je ta frekvenčni pas postal prost;
- 26 GHz - ta visokofrekvenčni pas se trenutno še ne uporablja. Te frekvence naj bi se uporabljale za omrežje 5G v gosto naseljenih urbanih območjih. Uporabni doseg pri tej frekvenci je zelo kratek (nekaj sto metrov), zato na redko poseljenih območjih in podeželju bržkone ne bo v uporabi. Glavna pomanjkljivost signalov pri teh frekvencah je, da lahko pokrivajo zelo majhno območje in so zelo omejeni tudi pri razširjanju znotraj zgradb.

Za 5G se bodo uporabili tudi obstoječi frekvenčni pasovi 800 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz in 2,6 GHz. Že danes namreč obstaja tehnologija, ki omogoča hkratno delovanje 4G in 5G na istem frekvenčnem pasu (DSS funkcionalnost). V prihodnje, ko se bo večina prometa preselila na 5G, pa je pričakovati, da se bodo tudi ti frekvenčni pasovi sproščali za uporabo 5G.

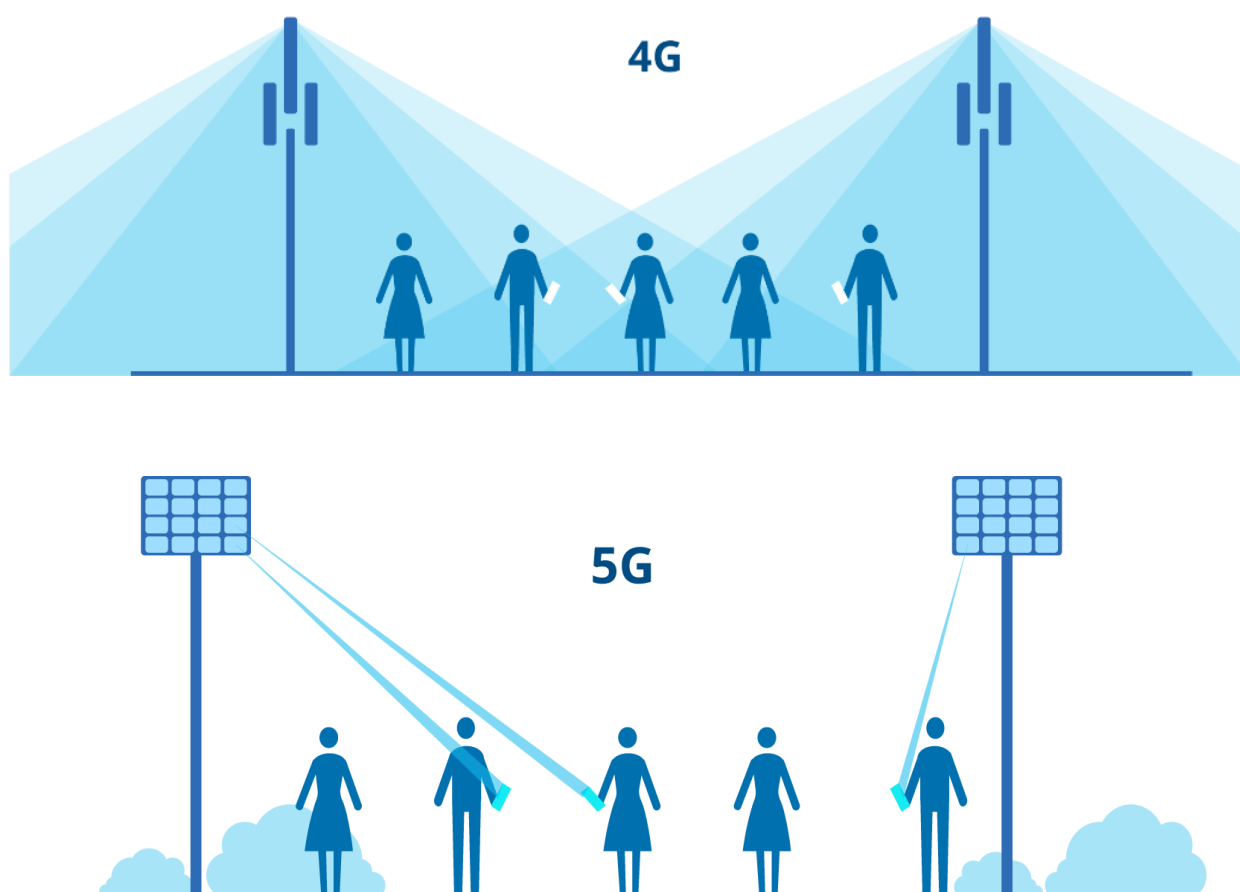
Omrežja 5G bodo v prvi fazi delovala na frekvenčnih pasovih 700 MHz in 3,6 GHz. VF pas 26 GHz se bo uporabljal za zagotavljanje velikih prenosnih zmogljivosti na manjših območjih, kjer bo to potrebno (npr. gosto naseljena območja, mestna središča, množične prireditve ...). Postopoma se bodo v prihodnosti poleg VF pasu 26 GHz lahko uporabljale tudi višje frekvence v področju milimetrskih valov nad 30 GHz (slika S 7).



3.5 Kaj so milimetrski valovi?

S pojmom milimetrski valovi (t.i. mmWaves) poimenujemo EMS, ki imajo valovno dolžino manjšo od 10 mm in frekvenco nad 30 GHz (slika S 7). Izraz se uporablja tudi za označevanje VF pasu okrog 26 GHz, ki je predviden za tehnologijo 5G. Ta del spektra uporablja do 10-krat višje frekvence, kot jih uporabljajo mobilna omrežja 2G, 3G in 4G. Prav uporaba teh višjih frekvenc je povzročila veliko zaskrbljenost javnosti, vendar se podobne visoke frekvence (milimetrski valovi) že vrsto let uporabljajo za radarje, mikrovalovne povezave, medicinske naprave, letališke varnostne skenerje in drugo.

Obstoječi tehnologiji 3G in 4G v glavnem uporabljata **makro celice** (bazne postaje), ki ponujajo dosege od 2 do 15 kilometrov ali več in zato pokrivajo večje območje, vendar lahko pride v primeru prevelikega števila sočasnih uporabnikov do prezasedenosti bazne postaje in posledično do težav v delovanju. Dodatno pa se uporabljajo še **majhne celice** (t.i. femto, piko in mikro) za lokalno pokrivanje območij, kjer je potreben velik prenos podatkov ali so slabo pokrita s signalom klasičnih baznih postaj – npr. znotraj večjih objektov, v garažnih hišah in podobno.



S 8: Običajne antene 4G (zgoraj) zagotavljajo pokrivanje večjega območja. Pametne antene 5G (spodaj) oddajajo signal le tja, kjer je uporabnik. Pametne antene tako povečajo zmogljivost in izboljšajo učinkovitost, hkrati pa so povprečne izpostavljenosti nižje.

V 5G omrežjih se bo uporaba majhnih celic, ki bodo nameščene blizu uporabnikom v urbanih okoljih, npr. na drogu javne razsvetljave, prometnem znaku ali znotraj nakupovalnih središč in drugih poslovnih stavb, zelo povečala. Majhne celice 5G imajo doseg od 20 do nekaj 100 metrov. Doseg 20 metrov pomeni, da je za pokrivanje enega kvadratnega kilometra potrebnih približno 800 majhnih celic. Vendar se majhne celice ne bodo uporabljale za pokrivanje celotnih območij, temveč le tam, kjer bo to potrebno.



S 9: Primer namestitve anten majhne celice 5G na drogu javne razsvetljave.

T 5: Izvedbe majhnih celic omrežja 5G z njihovimi lastnostmi. V tabeli so navedeni področje rabe, število uporabnikov, oddajna moč in območje pokrivanja. Za primerjavo je naveden tudi podatek za naprave Wi-Fi in mobilni telefon.

izvedba	področje uporabe	število uporabnikov	oddajna moč	pokrivanje
femto celica	stanovanja in pisarne	4 - 32	0 – 100 mW (indoor) 0.2 – 1 W (outdoor)	nekaj 10 m
piko celica	javne površine, letališča, nakupovalna središča, postaje ...	64 - 128	00 – 250 mW (indoor) 1 – 5 W (outdoor)	do 100 m
mikro celica	urbana območja - podpora pokrivanju z makro baznimi postajami	128 - 256	5 – 10 W (outdoor)	nekaj 100 m
za primerjavo				
naprave Wi-Fi	stanovanja in pisarne	< 50	20 – 100 mW (indoor) 0.2 – 1 W (outdoor)	nekaj 10 m
mobilni telefon	Povsod	1	2 W GSM 0,2 W LTE	teoretično do 30 km

4 Rezultati meritev

Meritve smo opravili na desetih lokacijah v večjih slovenskih mestih. Na vsaki lokaciji smo opravili meritve na treh merilnih mestih v okolici bazne postaje, ki je imela poleg ostalih sistemov mobilne telefonije nameščen tudi sistem mobilne telefonije 5G. Kot merilni rezultat smo za vsak frekvenčni pas vzeli največjo izmerjeno vrednost po 'sweep' protokolu.

Vse rezultate meritev smo zbrali in jih analizirali. Najprej smo na podlagi vseh 30 meritev za vse merjene frekvenčne pasove določili minimalne, maksimalne in povprečne vrednosti ter mediano izmerjenih vrednosti električnega polja, ki so podani v T 6.

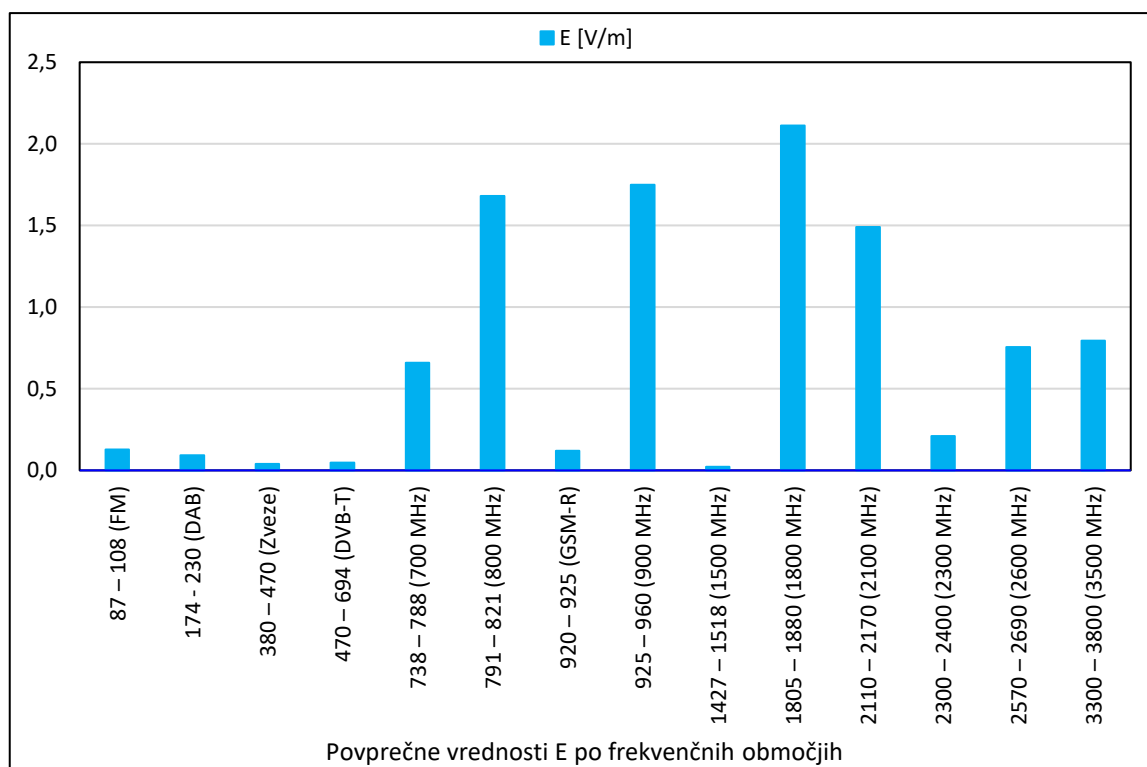
T 6: Minimalne, maksimalne in povprečne vrednosti ter mediana izmerjenih vrednosti električnega polja po frekvenčnih pasovih za vseh 30 merilnih mest ter izračunan indeks izpostavljenosti za maksimalne in povprečne vrednosti za I. območje varstva pred sevanji.

frekvenčni pas	E_{min} [V/m]	E_{maks} [V/m]	E_{povp} [V/m]	E_{median} [V/m]	SI_{maks} [%]	SI_{povp} [%]
87 – 108 (FM)	0,04	0,31	0,13	0,11	0,13	0,03
174 – 230 (DAB)	0,04	0,22	0,09	0,07	0,06	0,02
380 – 470 (Zveze)	0,03	0,09	0,04	0,03	0,01	0,00
470 – 694 (DVB-T)	0,04	0,08	0,05	0,05	0,01	0,00
738 – 788 (700 MHz)	0,03	3,44	0,66	0,41	8,67	0,76
791 – 821 (800 MHz)	0,38	6,49	1,68	1,41	28,79	2,94
920 – 925 (GSM-R)	0,01	0,60	0,12	0,07	0,21	0,02
925 – 960 (900 MHz)	0,60	4,85	1,75	1,27	13,74	2,53
1427 – 1518 (1500 MHz)	0,02	0,04	0,02	0,02	0,00	0,00
1805 – 1880 (1800 MHz)	0,62	4,47	2,11	1,73	6,00	1,78
2110 – 2170 (2100 MHz)	0,24	4,95	1,49	1,33	6,79	0,90
2300 – 2400 (2300 MHz)	0,04	2,52	0,21	0,05	1,76	0,08
2570 – 2690 (2600 MHz)	0,05	5,08	0,75	0,14	7,15	0,60
3300 – 3800 (3500 MHz)	0,09	2,08	0,80	0,71	1,20	0,25
SKUPAJ					49,67	9,93

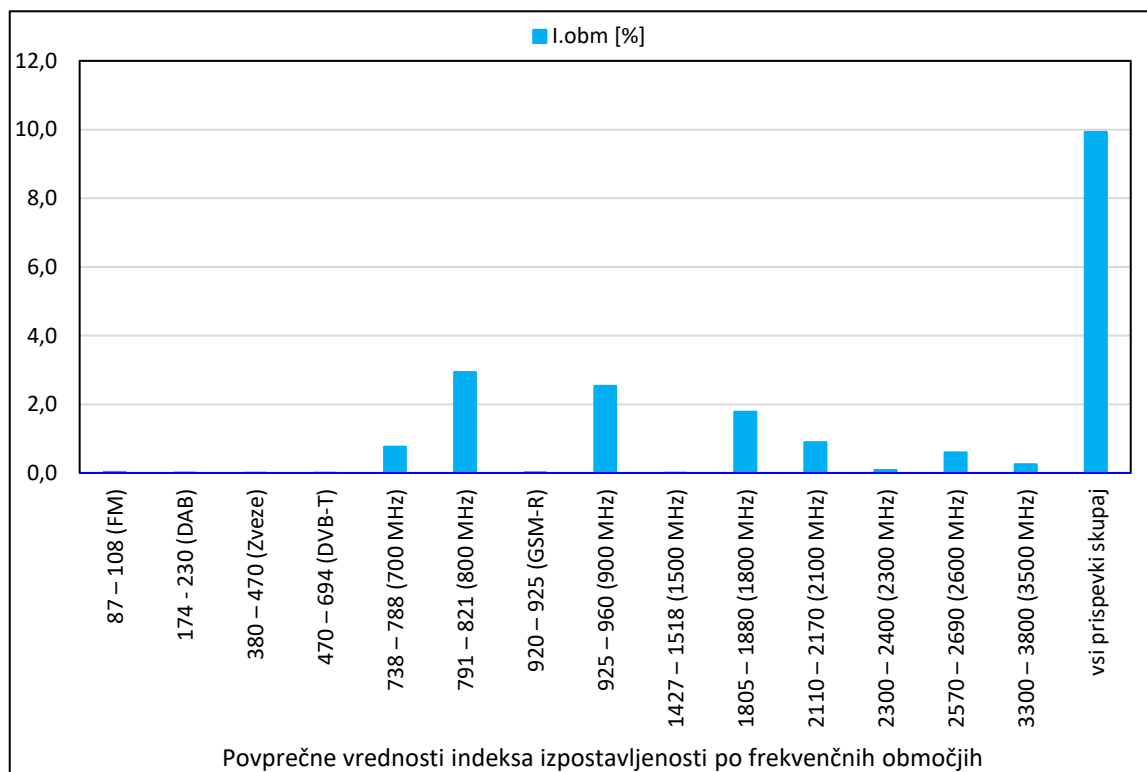
Najbolj zanimive so maksimalne in povprečne vrednosti in sicer kot indeks izpostavljenosti (SI) oziroma v odstotkih glede na mejne vrednosti, ki jih določa Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (UL RS 70/96) za I. območje varstva pred sevanji. Povprečne vrednosti električnega polja in indeksa izpostavljenosti so podane tudi grafično na slikah S 10 in S 11.

Maksimalni skupni indeks izpostavljenosti je znašal 49,7 odstotka mejne vrednosti, ki jo določa Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (UL RS 70/96) za I. območje varstva pred sevanji. Izmerjen je bil izmerjen na 2. merilnem mestu na lokaciji BTC v Ljubljani na strehi parkirne hiše. Najvišji indeks izpostavljenosti za posamezen frekvenčni pas je znašal 28,8 odstotka mejne vrednosti in sicer za frekvenčni pas 800 MHz. Izmerjen je bil ravno tako na 2. merilnem mestu na lokaciji BTC v Ljubljani na strehi parkirne hiše. To je pričakovan rezultat, saj je frekvenčni pas 800 MHz precej razširjen in zaseden, poleg tega pa v tem frekvenčnem pasu veljajo tudi nižje (bolj stroge) mejne vrednosti kot v višjih frekvenčnih pasovih. Maksimalni indeks izpostavljenosti za nov frekvenčni pas 3500 MHz, kjer delujejo samo bazne postaje sistema 5G je znašal 1,2 odstotka mejne vrednosti. Izmerjen je bil ravno tako na 2. merilnem mestu na lokaciji BTC v Ljubljani na strehi parkirne hiše. Maksimalni indeks izpostavljenosti za nov frekvenčni pas 700 MHz, kjer delujejo pretežno bazne postaje sistema 5G

je znašal 8,7 odstotka mejne vrednost. Izmerjen je bil na 1. merilnem mestu na lokaciji Ljubljana Koseze.



S 10: Povprečne vrednosti električnega polja po frekvenčnih pasovih.



S 11: Povprečne vrednosti indeksa izpostavljenosti po frekvenčnih pasovih.

Povprečni skupni indeks izpostavljenosti znašal 9,9 odstotka mejne vrednosti, ki jo določa Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (UL RS 70/96) za I. območje varstva pred sevanji. Najvišji povprečni indeks izpostavljenosti za posamezen frekvenčni pas je znašal 2,9 odstotka mejne vrednosti in sicer za frekvenčni pas 800 MHz. To je iz enakih razlogov kot za maksimalni indeks izpostavljenosti posameznega frekvenčnega pasu dokaj pričakovan rezultat. Povprečni indeks izpostavljenosti za frekvenčni pas 3500 MHz je znašal 0,25 odstotka mejne vrednosti, povprečni indeks izpostavljenosti za frekvenčni pas 700 pa 0,76 odstotka mejne vrednosti.

Tako maksimalne izmerjene vrednosti kot povprečne vrednosti ter maksimalni in povprečni indeks izpostavljenosti nakazujejo, da bazne postaje sistema 5G zaenkrat še niso zelo razširjene. Čeprav so bile bazne postaje sistema 5G prisotne na vseh merjenih lokacijah, so le te delovale z nizkim prometom, v bližnji okolici pa ni bilo drugih baznih postaj sistema 5G. Bodo pa v frekvenčnem pasu 3500 MHz predvsem zaradi sistema beamforming, ki ustvari bistveno bolj usmerjen in prostorsko spreminjajoč se sevalni snop, zlasti maksimalne vrednosti lahko povišane v prihodnosti.

Če pogledamo prispevke posameznega frekvenčnega pasu k skupnemu povprečnemu indeksu izpostavljenosti, ugotovimo, da k povprečnemu indeksu izpostavljenosti največji delež prispevata frekvenčna pasova 800 MHz in 900 MHz in sicer 30 odstotkov in 25 odstotkov. Sledi frekvenčni pas 1800 MHz z 18 odstotki. Prispevki ostalih frekvenčnih pasov so nižji od 10 odstotkov. Prispevek novega frekvenčnega pasu 3500 MHz z baznimi postajami sistema 5G znaša le 2,6 odstotka. Prispevek novega frekvenčnega pasu 700 MHz kjer pretežno delujejo bazne postaje sistema 5G pa znaša 7,7 odstotka. Razlog za višji prispevek frekvenčnega pasu 700 MHz od frekvenčnega pasu 3500 MHz je predvsem v bistveno nižji mejni vrednosti za frekvenčni pas 700 MHz v primerjavi z mejno vrednostjo za frekvenčni pas 3500 MHz. Prispevki posameznih frekvenčnih pasov k skupnemu povprečnemu indeksu izpostavljenosti so podani v tabeli T 7.

T 7: Prispevek posameznega frekvenčnega pasu v odstotkih k skupnemu povprečnemu indeksu izpostavljenosti.

frekvenčni pas	prispevek k SI_{povp} [%]
87 – 108 (FM)	9,3
174 – 230 (DAB)	0,1
380 – 470 (Zveze)	0,0
470 – 694 (DVB-T)	0,1
738 – 788 (700 MHz)	6,4
791 – 821 (800 MHz)	40,0
920 – 925 (GSM-R)	0,4
925 – 960 (900 MHz)	15,8
1427 – 1518 (1500 MHz)	0,0
1805 – 1880 (1800 MHz)	15,4
2110 – 2170 (2100 MHz)	7,6
2300 – 2400 (2300 MHz)	0,0
2570 – 2690 (2600 MHz)	2,2
3300 – 3800 (3500 MHz)	2,8
SKUPAJ	100,0

V nadaljevanju smo izmerjene vrednosti analizirali po merilnih mestih. Indeks izpostavljenosti za vsako merilno mesto je podan v T 8. Za vsako merilno mesto je podan skupni indeks izpostavljenosti ter indeks izpostavljenosti samo za 5G (frekvenčni pas 3500 MHz), kjer delujejo samo bazne postaje sistema 5G. Dodatno je v zadnjem stolpcu naveden indeks izpostavljenosti

za vsako merilno mesto za primer polno zasedene bazne postaje sistema 5G, ki bi delovala z največjo oddajno močjo in snopom antene usmerjenim v merilno mesto (SI za ekstrapoliran 5G).

Pri izračunu ekstrapoliranih vrednosti se izmeri nosilni signal. Na podlagi tehničnih podatkov o viru, kot so moč nosilnega signala, celotna oddajna moč, način delovanja, usmerjenost in dobitnik sevalnega diagrama, ki jih zagotovi lastnik oziroma upravljalet vira, se za vsako celico bazne postaje izračuna faktor K . Najvišja vrednost se nato izračuna po enačbi $E_{MAX} = E_{nosilca} \times K$, kjer je E_{MAX} najvišja vrednost električnega polja in $E_{nosilca}$ izmerjena vrednost električnega polja nosilnega signala.

T 8: Indeks izpostavljenosti po lokacijah oziroma merilnih mestih.

Zap. št	del mesta	merilno mesto	skupni SI [%]	SI za 5G (pas 3500 MHz) [%]	SI za 5G (pas 700 MHz) [%]	SI za ekstrapoliran 5G 3500 [%]	SI za ekstrapoliran 5G 700 [%]
1	Center	1	7,6	0,02	3,69	15,64	0,73
2		2	7,2	0,03	1,59	6,65	1,28
3		3	4,6	0,00	1,63	0,54	0,52
4	Vič	1	2,1	0,00	0,02	1,54	0,15
5		2	2,2	0,32	0,13	2,51	0,44
6		3	7,0	0,47	0,33	0,88	0,90
7	Center	1	10,6	0,28	0,12	2,71	/
8		2	2,5	0,11	0,07	0,23	/
9		3	1,0	0,05	0,03	0,31	/
10	Poljane	1	15,6	0,32	0,36	0,29	0,02
11		2	4,7	0,25	0,16	6,50	0,45
12		3	2,9	0,01	0,50	0,05	0,17
13	BTC	1	21,9	0,31	0,08	58,34	1,48
14		2	49,7	1,20	1,04	12,99	11,25
15		3	23,5	0,85	3,37	2,45	1,18
16	Center	1	1,3	0,13	0,01	0,62	0,05
17		2	3,0	0,04	0,04	0,17	0,60
18		3	3,6	0,15	0,16	1,61	0,01
19	Moste	1	2,3	0,01	0,00	0,42	/
20		2	6,4	0,09	0,01	3,55	/
21		3	1,9	0,02	0,00	0,41	/
22	Rožna dolina	1	10,9	0,33	0,00	0,96	/
23		2	1,8	0,22	0,00	0,55	/
24		3	1,7	0,14	0,00	1,08	/
25	Fužine	1	10,9	0,08	0,20	3,16	/
26		2	25,4	0,02	0,02	1,34	/
27		3	3,5	0,12	0,02	3,00	/
28	Koseze	1	31,5	0,63	8,67	17,31	/
29		2	17,0	0,31	0,18	0,00	/
30		3	13,6	1,07	0,47	2,80	/

Primerjava skupnega indeksa izpostavljenosti in indeksa izpostavljenosti za frekvenčni pas 3500 MHz kaže, da je indeks izpostavljenosti frekvenčnega pasu 3500 MHz znatno nižji od skupnega indeksa izpostavljenosti, kar pomeni, da bazne postaje 5G zaenkrat povzročajo nizke obremenitve okolja v primerjavi z obstoječimi obremenitvami. Podobno sliko kaže tudi primerjava skupnega indeksa izpostavljenosti in indeksa izpostavljenosti za frekvenčni pas 700 MHz, le da je ta celo nekoliko večji, kar pa je v večji meri posledica nižjim mejnim vrednostim pri nižjih frekvencah. Ekstrapoliran indeks izpostavljenosti za bazne postaje 5G za najneugodnejši primer pa hkrati pokaže, da je le ta lahko tudi precej višji od izmerjenega skupnega indeksa izpostavljenosti oziroma obstoječih skupnih obremenitev.

Najvišji izračunan ekstrapoliran indeks izpostavljenosti za 5G 3500 MHz je znašal 58 odstotka mejne vrednosti, ki jo določa Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (UL RS 70/96) za I. območje varstva pred sevanji, najvišji izračunan ekstrapoliran indeks izpostavljenosti za 5G 700 MHz pa 11 odstotkov mejne vrednosti.

5 Zaključek

V letu 2023 smo na območju Ljubljane na desetih lokacijah, skupno na tridesetih merilnih mestih (tri merilna mesta na lokacijo) opravili meritve VF EMS v vseh najpomembnejših frekvenčnih pasovih. Meritve smo opravili tudi v novo dodeljenem frekvenčnem pasu 3500 MHz, ki je namenjen samo baznim postajam mobilne telefonije sistema 5G. In novem frekvenčnem pasu 700 MHz, ki je namenjen pretežno sistemu 5G. V frekvenčnem pasu 3500 MHz mobilna telefonija sistema 5G prinaša novost, to je sistem beamforming. Pametne antene (t. i. Massive MIMO) lahko oblikujejo usmerjene snope (t. i. beamforming) in tako usmerijo signal v tisto območje, kjer se nahajajo trenutno aktivni uporabniki. S tem se zagotovi optimalne poti signala do vsakega povezanega uporabnika. Te pametne antene bodo omogočile učinkovito delovanje omrežja, saj zmanjšajo motnje in povečajo možnosti, da signali v različnih pogojih dosežejo predvidenega prejemnika. Pametne antene ustvarjajo in usmerjajo signale le, kadar in kjer so potrebni. Če torej ni uporabnikov, denimo ponoči v spalnem naselju, oddajajo zgolj sinhronizacijski signal z močjo, ki je tudi do 1000-krat nižja od tiste, pri kateri deluje bazna postaja, ko je polno zasedena. Zaradi usmerjenosti in s tem visokih dobitkov anten pa se lahko največje obremenitve okolja v primeru polne zasedenosti bazne postaje na nekaterih območjih povečajo. Trenutno so bazne postaje 5G razmeroma malo zasedene, to kaže precejšnja razlika med indeksom izpostavljenosti za trenutne vrednosti (stolpec *SI* za 5G (pas 3500 MHz) [%] v tabeli T 8) ter za ekstrapolirane vrednosti (stolpec *SI* za ekstrapoliran 5G 3500 [%] v tabeli T 8). Pričakovati je, da se bo promet prek baznih postaj 5G v prihodnje bistveno povečal, kakšna pa bo dejanska njegova rast, pa je nemogoče napovedati. Obenem pa je v povezavi z rastjo prometa pomembno, da so obremenitve okolja zaradi beamforminga, veliko hitrejšega prenosa podatkov ter manjše oddajne moči v mirovanju v omrežju 5G kot v predhodnih omrežjih 2G-4G obremenitve okolja v omrežju 5G pri enakem prometu v povprečju nižje, kot so v obstoječih omrežjih 3G-4G.

Rezultati meritev kažejo, da je največji skupni indeks izpostavljenosti znašal 49,7 odstotka mejne vrednosti, ki jo določa Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (UL RS 70/96) za I. območje varstva pred sevanji. Maksimalni skupni indeks izpostavljenosti je bil izmerjen na 2. merilnem mestu na lokaciji BTC v Ljubljani na strehi parkirne hiše. Na strehi parkirne hiše so antene nameščene le nekaj metrov nad samo streho. Maksimalni indeks izpostavljenosti za nov frekvenčni pas 3500 MHz, kjer delujejo samo bazne postaje sistema 5G je znašal 1,2 odstotka mejne vrednosti, maksimalni indeks izpostavljenosti za frekvenčni pas 700 MHz pa 8,7 odstotka mejne vrednosti.

Povprečni skupni indeks izpostavljenosti, ki predstavlja povprečje indeksov izpostavljenosti na posameznih merilnih mestih je znašal 10 odstotka mejne vrednosti, ki jo določa Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (UL RS 70/96) za I. območje varstva pred sevanji. Povprečni indeks izpostavljenosti za frekvenčni pas 3500 MHz je znašal 0,25 odstotka mejne vrednosti, povprečni indeks izpostavljenosti za frekvenčni pas 700 MHz pa je znašal 0,75 odstotka mejne vrednosti.

Največji prispevek k skupnemu povprečnemu indeksu izpostavljenosti je doprinesel frekvenčni pas 800 MHz, kjer delujejo bazne postaje sistema 4G, in sicer 30 odstotkov. Prispevek frekvenčnega pasu 3500 MHz je znašal 2,5 odstotka, prispevek frekvenčnega pasu 700 MHz pa 7,7 odstotka.

Rezultati meritev kažejo, da bazne postaje sistema 5G trenutno povzročajo nizke obremenitve okolja v primerjavi z obstoječimi obremenitvami. Je pa izračunan ekstrapoliran indeks izpostavljenosti za bazne postaje sistema 5G 3500 MHzb znašal kar 58,3 odstotka mejne vrednosti, ki jo določa Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju (UL RS 70/96) za I. območje varstva pred sevanji. Ekstrapolirana vrednost pomeni maksimalno vrednost za primer polno zasedene bazne postaje, ki oddaja z največjo oddajno močjo in snopom antene usmerjenim v merilno mesto.

Izvedene meritve kažejo, da so obstoječe obremenitve okolja zaradi sistema 5G zaenkrat nizke. Nizke obremenitve okolja zaradi sistema 5G so predvsem posledica sorazmerno majhnega



prometa in tudi manjše gostote baznih postaj sistema 5G. Vsekakor pa gre v prihodnosti pričakovati intenziven razvoj omrežja 5G in s tem tudi višanje obremenitev okolja. Vrednost indeksa izpostavljenosti za najneugodnejše razmere polne zasedenosti bazne postaje 5G in uporabe beamforminga je že sedaj nakazal, da lahko sistem 5G doseže tudi več kot 50% dovoljenih vrednosti.

Pri umeščanju baznih postaj sistema 5G je zaradi večjih dobitkov antene potrebno njihovo namestitve skrbno načrtovati. V primeru nižje namestitve anten sistema 5G so za najneugodnejše razmere polne obremenjenosti baznih postaj 5G možne tudi prekoračitve mejnih vrednosti za I. območje varstva pred sevanji na posameznih lokacijah. Pričakovane povprečne vrednosti obremenitev okolja zaradi sistema 5G pa bodo najverjetneje ostale primerljive obstoječim obremenitvam okolja zaradi delovanja obstoječih sistemov mobilne telefonije 2G-4G. Pri tem je pomembno, da se z uvajanjem nove generacije mobilne telefonije 5G opuščajo obstoječe tehnologije 2G in 3G. Tehnologija 3G je v večji meri danes že popolnoma opuščena.

6 Literatura

- [1] Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju, UL RS 70/1996.
- [2] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics 74: 494-522, 1998.
- [3] SIST EN 62232: 2019 - Določitev RF poljske jakosti, gostote moči in SAR v okolici radiokomunikacijskih baznih postaj za namene ocenjevanja izpostavljenosti ljudi
- [4] Gajšek P, Valič B, Trček T. Meritve izpostavljenosti visokofrekvenčnim elektromagnetnim sevanjem brezžičnih sistemov v različnih mikrookoljih v Sloveniji. Inštitut za neionizirna sevanja, 2017.
- [5] Peter Gajšek, Blaž Valič. Elektromagnetna sevanja – 5G in zdravje. Forum EMS, 2020.