

5G – ali res predstavlja tveganje za zdravje?

Tomi Mlinar¹

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Katedra za informacijske in komunikacijske tehnologije, Laboratorij za sevanje in optiko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
tomi.mlinar@fe.uni-lj.si

5G – Is there a health risk?

Abstract. This article discusses 5G technology and its impact on the environment and human health. The most important changes in the 5G radio interface that might have different impact on the environment as older technologies are the following: antenna beamforming and user tracking, massive MIMO, advanced channel coding, scalable OFDM-based 5G NR radio interface, and extended use of frequency spectrum. The second chapter discusses influence of electromagnetic fields on living organisms. The final conclusion is that 5G has no significant technical innovations compared to previous generations. The recommended limit values, which are in force from before, also apply to 5G technology. Procedures for the safe placement of 5G technology in the environment and methods for assessing the impact of electromagnetic fields are described in details in many documents and partially covered in this paper.

1 Uvod

Tehnologija 5G je samo še korak od rabe v vsakdanjem življenju. V prvi fazi pričakujemo večjo uporabnost v industrijskih okoljih, kjer se trenutno tudi največ preizkuša, čez leto ali dve pa jo lahko pričakujemo tudi v naših domovih. Prve aplikacije bodo povezane z visokimi podatkovnimi hitrostmi, ki so nujne za storitve navidezne ali obogatene resničnosti in za grafično zahtevne igre, pa tudi za podatkovno nezahtevne storitve s področja interneta stvari, kot na primer krmiljenje in nadzor pametnega doma.

Približno leto po vpeljavi bo omrežje 5G delovalo v kombinaciji z obstoječim omrežjem 4G, šele pozneje pa tudi samostojno, dokler ne bo povsem nadomestilo prejšnje generacije omrežij. Standardizacija 5G poteka v vseh pomembnejših organizacijah (ITU-R, ECC, ETSI, 3GPP) in je že v sklepnih fazah.

Omrežje 5G bo lahko delovalo na vseh obstoječih frekvenčnih območjih, ki jih že zdaj uporabljajo operaterji (0,8 GHz, 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz in 2,6 GHz), nova frekvenčna območja, namenjena predvsem 5G, pa so 3,4–3,8 GHz in 24,25–27,5 GHz [1]. Širina frekvenčnega spektra na operaterja se povečuje - z zdajšnjih nekaj 10 MHz na prihodnjih nekaj 100 MHz. Pomembnejši parametri so zajeti v preglednici 1 [2]. Omrežja 5G uporabljajo napreden radijski vmesnik in drugačno arhitekturo jedrnega omrežja. Radijski vmesnik pri 5G je zelo učinkovit in deluje tako, da so oddajne moči minimalne, s tem pa tudi poraba energije.

Smernice mednarodnih in nacionalnih institucij za ravnanje z vplivi elektromagnetnih polj sistemov 5G na

okolje in človeka se že uporabljajo. Standardizirane so tudi metode preskušanja in ocenjevanja vpliva neionizirnih sevanj na okolje in človeka.

Preglednica 1. Povečevanje zmogljivosti skozi generacije

	3G	4G	5G
Pasovna širina	2 MHz	200 MHz	> 1 GHz
Zakasnitve	100–500 ms	20–30 ms	<10 ms
Povprečna hitrost	0,144 Mb/s	25 Mb/s	200–400 Mb/s

2 Tehnološke novosti 5G

Pri tehnologiji 5G najdemo novosti na naslednjih področjih [3]:

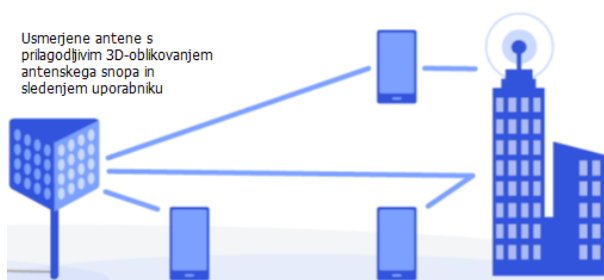
- nova arhitektura omrežja, ki so namenjena podpiranju raznovrstnih storitev,
- programsko nastavljivo omrežje z virtualiziranimi omrežnimi funkcijami,
- omrežje je razrezano na rezine, ki so prilagojene potrebam uporabnikov po hitrosti, pokrivanju in varnosti,
- ločevanje med uporabniško in kontrolno ravnino,
- nov radijski vmesnik (5G NR) in vpeljava majhnih celic.

Pri ocenjevanju vpliva tehnologije 5G na okolje se moramo najprej vprašati, kateri novi tehnološki dejavniki ali spremembe imajo vpliv na okolje. Izmed prej naštetih je to delno prenovljen radijski vmesnik, zato se mu v nadaljevanju posvečamo bolj podrobno. Pomembnejše spremembe v radijskem vmesniku 5G so naslednje:

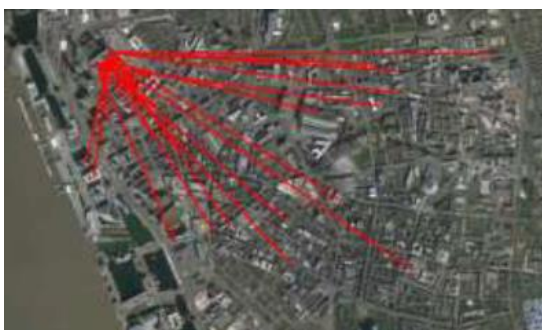
- oblikovanje antenskega snopa in sledenje uporabniku,
- uporaba masovnega MIMO,
- napredno kanalsko kodiranje,
- skalabilnost radijskega vmesnika 5G NR,
- razširjen frekvenčni spekter.

2.1 Oblikovanje antenskega snopa in sledenje uporabniku

Oblikovanje antenskega snopa (slika 1) je primerno za zgoščena omrežja, kjer se ista frekvenca ponavlja na razdaljah od 150 do 200 m [3]. Za to tehniko je značilno hitro usmerjanje antenskega snopa v smeri proti uporabniku (slika 2) in preklapljanje med snopi znotraj ene dostopovne točke. Posamezni antenski snopi so zelo ozki (2° in manj), kar pomeni, da je dobitok lahko tudi 50 dB (preglednica 2) [4]. Ta tehnika je predvsem namenjena za uporabo na frekvenčnem spektru pod 6 GHz, lahko pa se uporablja tudi na višjih frekvencah. Poraba energije je ciljna, s tem pa tudi manjša kot pri klasičnih antenah s širokim antenskim diagramom.



Slika 1. Antene s prilagodljivim 3D-oblikovanjem antenskega snopa



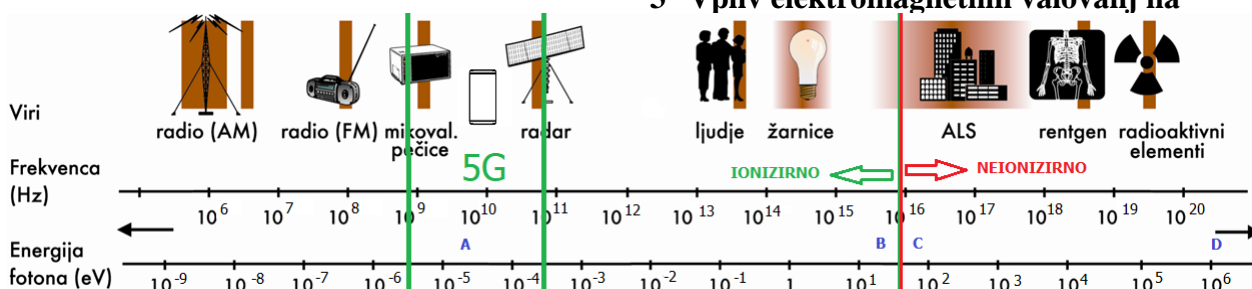
Slika 2. Uporaba zelo ozkih antenskih snopov, t. i. "pencil beams"

Preglednica 2. Širina posameznega snopa antene z oblikovanjem diagrama in njegov dobitek

Širina posameznega snopa	Dobitek
2°	38 dB
1°	43 dB
0,5°	50 dB

2.2 Masovni MIMO

Radijski vmesnik 5G (5G NR) je oblikovan za optimalno delovanje sistemov s časovnim dupleksom (TDD, Time Division Duplex). Uporablja referenčni signala (UL SRS, Uplink Sounding Reference Signal), da daje bazni postaji povratno informacijo o stanju zveze. 5G NR ima izboljššan mehanizem za poročanje o stanju v kanalu (CSI-RS, Channel State Information Reference Signal). Kodna knjiga z veliko prostorsko razločljivostjo podpira sestavo masovnega MIMO z do 256 anten. Poraba energije je ciljna, izgube v kanalu so manjše.



Slika 3. Elektromagnetni spekter in energija [6]

2.3 Napredno kanalsko kodiranje

5G uporablja kanalsko kodiranje ME-LDPC (Multi-Edge Low Density Parity Check). ME-LDPC ima do 5-krat večji dobitek v primerjavi s Turbo-kodami, ki se uporabljajo v prejšnjih generacijah omrežij. To velja predvsem pri obdelavi večjih blokov podatkov, zato je nova oblika kodiranja primerna predvsem za skupino storitev mobilnega širokopasovnega dostopa. Na sprejemni strani je omogočena vzporedna uporaba dekoderjev. Učinkovito kodiranje skrajša prenosni čas pri večji prepustnosti, kar se odraža v manjših zakasnitvah. Na porabo energije ima ta parameter manjši vpliv.

2.4 Skalabilnost radijskega vmesnika

Radijski vmesnik 5G NR je zasnovan tako, da ima prilagodljivo številčenje [3, 5], kar omogoča optimalno dodeljevanje radijskih virov in s tem optimalno porabo energije. Najmanjši razmik med podnosilniki (Δf) je 15 kHz. Razmik se prilagaja razpoložljivemu spektru, namenu uporabe (zunanje krovno pokrivanje, majhne celice, notranje širokopasovno pokrivanje) in vrsti storitve. Spreminja se po izrazu $\Delta f = 2^n \cdot 15$ kHz. Tako npr. uporabimo razmik 15 kHz na frekvenčnem območju 700 MHz, kjer so nosilniki široki 1, 5, 10 in 20 MHz, na frekvenčnem območju 28 GHz, kjer imamo na razpolago npr. 400 MHz spektra, pa izberemo razmik 120 kHz. Poznavanje načina delovanja OFDM je pomembno pri ocenjevanju obremenitve okolja.

2.5 Razširjen frekvenčni spekter

Po splošno sprejetem dogovoru se frekvenčni spekter za uporabo v 5G deli na dve skupini: FR1 in FR2 [1]. V skupino FR1 spadajo deli spektra pod 6 GHz (410–7125 MHz) in v skupino FR2 deli spektra med 24 in 60 GHz (24,25–52,60 GHz). Na frekvencah FR1 že delujejo obstoječe generacije mobilne telefonije (npr. LTE), frekvence iz skupine FR2 pa se uporabljajo npr. v radioastronomiji za daljinsko zaznavanje, v vojaške namene, kot orožje za onesposabljanje nasprotnikov, za skeniranje blaga in ljudi na letališčih, v policijskih radarjih za merjenje hitrosti, v industriji za natančno merjenje debeline materialov, v medicini za zdravljenja bolezni.

3 Vpliv elektromagnetnih valovanj na

3.1 Splošno o vplivih elektromagnetnih valovanj

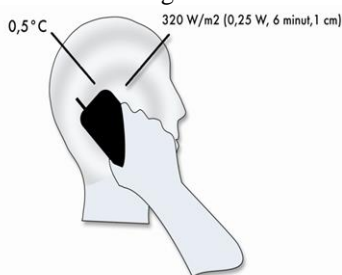
Pri vsaki radijski tehnologiji, pa tudi 5G, imamo dve vrsti vpliva elektromagnetnih valovanj (EMV) na okolico:

- vpliv na druge naprave in
- vpliv na žive organizme.

Poznamo termične in netermične učinke EMV na žive organizme. Večina raziskav in podlag za izdajo priporočil se ukvarja s termičnimi učinki električnih polj, magnetnih polj in elektromagnetnega valovanja na žive organizme [6].

Pri uporabi 5G raziskujemo vpliv EMV v frekvenčnem območju med približno 0,7 in 100 GHz. Na sliki 4 [6] vidimo, da ima EMV v tem delu spektra premalo energije, da bi povzročalo ionizacijo (izbijanje elektrona iz atoma), zato ga imenujemo neionizirno. Vezana energija elektrona v vodikovem atomu je 13,6 eV (slika 3, točka B), kar je meja za ionizacijo. Za primerjavo zapišimo, da je energija valovanja v spektru, ki ga uporablja 5G, okrog 0,000004 eV (slika 3, točka A), energija ultravijoličnega valovanja okrog 41 eV (slika 3, točka C) in energija valovanja pri jedrski eksploziji med 0,3 in 3 MeV (slika 3, točka D). Pri 5G torej nimamo enakih učinkov na organizme, kot jih povzročajo npr. radioaktivni elementi, računati pa moramo na t. i. termične učinke, ki pomenijo segrevanje organizma.

Vsak organizem je sestavljen iz pomembno velikih količin vode. Molekula vode (H₂O) se pod vplivom EMV začne vrteti in zato segrevati.



Slika 4. Segrevanje tkiva pri uporabi mobilnega terminala [6]

Na sliki 4 vidimo primer uporabe mobilnega terminala, ki ga držimo prislonjenega na uho, ki je približno 1 cm oddaljen od glave. Če se pogovarjamo 6 minut in terminal deluje z močjo četrta vata, se nam tkivo v okolici ušesa segreje za pol stopinje.

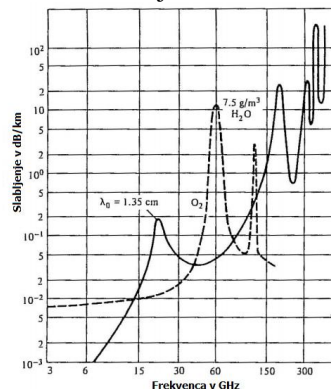
Preglednica 3. Vdorna globina EMV v tkivo

Frekvenca (GHz)	Relativna dielektričnost	Prevodnost (S/m)	Vdorna globina (mm)
6	36	4,0	8,10
10	33	7,9	3,90
30	18	27	0,92
60	10	40	0,49
100	7,3	46	0,35
300	5,0	55	0,23

Pri višjih frekvencah, ki jih uporablja 5G, se pojavi t. i. kožni pojav (ang. skin effect), kar pomeni, da se energija valovanja absorbira le na površini kože, v tkivo pa jo prodre zelo malo. V preglednici 3 so zbrane

vdorne globine v kožo pri različnih frekvencah EMV. Višja kot je frekvenca, manjša je vdorna globina.

Pri višjih frekvencah mm-valov moramo računati še z zelo velikim slabljenjem zaradi padavin in vodne pare v ozračju [7]. Še posebno veliko je slabljenje na frekvenci 60 GHz (slika 5), kjer se signal oslabi tudi do 15 dB na kilometer, kar pomeni, da so te frekvence primerne le za komunikacijo na zelo kratke razdalje.



Slika 5. Slabljenje elektromagnetnega valovanja na višjih frekvencah zaradi padavin in vodne pare

3.2 Mejne vrednosti

Mednarodne organizacije, pa tudi Slovenija, posvečajo vprašanju vpliva EMV na okolje posebno pozornost že več desetletij. Javnost je postala bolj občutljiva za ta vprašanja od devetdesetih let prejšnjega stoletja, ko se je začela razvijati mobilna telefonija, z njo pa tudi množiti bazne postaje.

Po številnih raziskavah so organizacije, ki se ukvarjajo z vplivom EMV na okolje, že pred časom sprejele priporočene mejne vrednosti, ki se v skoraj treh desetletjih veljave niso spremenile. Nekaj od teh je zajetih v preglednici 4. Mednarodna komisija za zaščito pred neionizirnimi sevanji ICNIRP je lansko leto ponovno pregledala ta priporočila in objavila ugotovitve, iz katerih izhaja, da so mejne vrednosti, ki so bile postavljene leta 1998, ustrezne [8]. Tem priporočilom sledi tudi slovenska Uredba [9]. So pa v zadnjih letih nastali dokumenti, ki bolj natančno opisujejo postopke ugotavljanja obremenitve okolja z EMV in preventivne ukrepe, ki se jih morajo držati mobilni operaterji oziroma drugi postavljalci virov EMV. Nekaj od tega je zbrano v priporočilih ITU-T [10].

Preglednica 4. Mejne vrednosti EMV

	400 < f < 2000 MHz	f > 2000 MHz
ICNIRP 2020 "delavci"	S = f/40 W/m ² E = 3f ^{1/2} V/m (f v MHz)	S = 50 W/m ² E = 137 V/m
ICNIRP 2020 "splošna populacija"	S = f/200 W/m ² E = 1,37 f ^{1/2} V/m (f v MHz)	S = f/200 W/m ² E = 61 V/m
SLO UL 70/96 "I. območje"	S = f/2000 W/m ² E = 0,43f ^{1/2} V/m (f v MHz)	S = 1 W/m ² E = 19 V/m
SLO UL 70/96 "II. območje"	S = f/200 W/m ² E = 1,37f ^{1/2} V/m (f v MHz)	S = 10 W/m ² E = 61,4 V/m

3.3 Vpliv 5G na okolje

Za izračun vpliva tipične bazne postaje 5G na okolje vzamemo vhodne podatke, ki izhajajo iz prejšnjih poglavij. V priporočilih ITU [11, 12, 13] so zbrane enačbe in metodologija za ocenjevanje obremenitve okolice virov EMV.

Gostoto pretoka moči S izračunamo po enačbi (1).

$$S = \frac{P \cdot G_{\theta, \varphi}}{4\pi \cdot d^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

kjer je P moč oddajnika, $G_{\theta, \varphi}$ dobitek oddajne antene v smeri (θ, φ) in d razdalja od oddajnika.

Če ocenjujemo gostoto pretoka moči v smeri največjega dobitka (kar vedno velja za antene z usmerjanjem snopa), potem velja enačba (2).

$$S = \frac{EIRP}{4\pi \cdot d^2} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

kjer je $EIRP$ efektivna izsevana moč oddajnika in so vključene tudi izgube na priključnih kabljih in konektorjih.

Oceno, kakšna je gostota pretoka moči na razdalji d od antene, naredimo tako, da primerjamo izračunano ali izmerjeno vrednost z referenčno po enačbi (3).

$$\frac{S}{S_{ref}} < 1 \quad (3)$$

kjer je S izračunana/izmerjena vrednost in S_{ref} mejna vrednost iz priporočil.

Za primer 1 vzemimo *malo celico 5G*, ki deluje na frekvenčnem območju 28 GHz. Moč oddajnika P_{Tx} je 6 W (37,78 dBm), dobitek antene G_{Tx} je 7 dBi. Upoštevamo še slabljenje na priključnih kabljih, ki je na teh frekvencah približno 1,5 dB/m.

Za primer 2 vzemimo *makro celico 5G*, ki deluje na frekvenčnem območju 3,5 GHz. Moč oddajnika P_{Tx} je 200 W (53 dBm), dobitek antene G_{Tx} je 25 dBi. Upoštevamo še slabljenje na priključnih kabljih, ki je na teh frekvencah približno 0,15 dB/m.

Izračunane vrednosti primerjamo z mejnimi vrednostmi po priporočilih. Rezultati so zbrani v preglednici 5. V obeh primerih smo računali, da je antenski snop usmerjen točno proti uporabniku in da oddajnik deluje z vso razpoložljivo močjo.

Preglednica 5. Nekaj izračunov varne razdalje pri različni konfiguraciji baznih postaj 5G

	ICNIRP "delavci"	ICNIRP "splošna populacija"	SLO I.	SLO II.
	Varna razdalja od antene 5G			
Mala celica	0,1 m	0,2 m	0,6 m	0,2 m
Makro celica	9,0 m	20,1 m	63,7 m	20,1 m

Izračun je upošteval najbolj neugodne razmere. Natančne rezultate dobimo z meritvami, kjer moramo upoštevati priporočila, ki so specifična za vsako tehnologijo. Pri 5G se uporablja tehnika OFDM, ustrezne smernice, kako nastaviti spektralni analizator ali ustrezen dekodler, pa najdemo v [11, 12].

4 Sklep

Tehnologija 5G se bistveno ne razlikuje od 4G, vseeno pa vpeljuje nekatere tehnološke novosti. Uporaba višjih delov frekvenčnega spektra zahteva zgostitev mreže baznih postaj, njihovo približevanje uporabnikom in posledično zmanjševanje oddajnih moči. Mehanizem oblikovanja antenskega snopa pomembno zmanjšuje vpliv EMV na okolje. Napreden način "spanja" naprav v času manjšega prometa poleg manjše porabe energije vpliva tudi na manjšo obremenitev okolja. Predvidena je delitev infrastrukture med operaterji – vpliv na okolje v primeru delitve je manjši, kot je seštevek vplivov dveh ločenih infrastruktur. Neposredno po vpeljavi 5G se zaradi vzporednega delovanja več tehnologij predvideva nekoliko večji vpliv na okolje, pozneje pa se bo ustalil na zdajšnjih ravneh ali pa celo znižal. Za tehnologijo 5G veljajo isti standardi kot do zdaj – obstoječi mednarodni in nacionalni standardi niso odvisni od uporabljene tehnologije. Stopnja izpostavljenosti EMV se ne spreminja – oddajniki 5G, ki bodo postavljeni blizu uporabnikom, bodo imeli podobne lastnosti kot domači Wi-Fi. Postopki za varno umeščanje 5G v prostor in ocenjevanje vpliva EMV na okolje so postavljeni in zbrani v smernicah ITU [10] in drugih mednarodnih direktivah.

Literatura

- [1] ETSI TS 138 104 V15.5.0, 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception, 2019-05
- [2] Tomi Mlinar: 5G in okolje, Občni zbor Slovenskega društva za elektronske komunikacije, November 2019
- [3] Making 5G NR a Commercial Reality, A unified, more capable 5G air interface, Qualcomm, March 2019
- [4] Daniel Ephraty, 5G Fixed Wireless in mmWave, e-zbornik referatov, Seminar radijske komunikacije SRK 2020, Februar 2020
- [5] Valentin Starciuc, NG Private Networks, e-zbornik referatov, Seminar radijske komunikacije SRK 2020, Februar 2020
- [6] J. Budin, S. Eggert, L. Gregorač, L. von Klitzing, T. Mlinar, Elektromagnetna sevanja, Inštitut za telekomunikacije, 2004
- [7] Recommendation ITU-R P.676-10, Attenuation by atmospheric gases, 09/2013
- [8] ICNIRP guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz), Health phys 118(5): 483–524; 2020
- [9] Uredba o elektromagnetnem sevanju v naravnem in življenjskem okolju, Uradni list RS št. 70/96
- [10] ITU-T Recommendations on Human Exposure to Electromagnetic Fields: <https://www.itu.int/net/ITU-T/lists/standards.aspx?Group=5&Domain=40>
- [11] Recommendation ITU-T K.100, Measurement of radio frequency electromagnetic fields to determine compliance with human exposure limits when a base station is put into service, 07/2019
- [12] ITU-T K-series Recommendations, Supplement 9, 5G technology and human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 05/2019