

# Metode za ocenjevanje vpliva elektromagnetnih polj tehnologije 5G na okolje

Tomi Mlinar

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko,  
Katedra za informacijske in komunikacijske tehnologije, Laboratorij za sevanje in optiko  
E-pošta: tomi.mlinar@fe.uni-lj.si

## Methods for assessing the environmental impact of 5G electromagnetic fields

*Abstract. This paper discusses 5G technology and its impact on the environment through electromagnetic fields (EMF). The 5G generation differs significantly in its technological characteristics from the existing 2G to 4G generations, and the methods for assessing the impact of electromagnetic fields on the environment are adapted accordingly. A good understanding of the technology is essential for assessing the environmental impact of 5G generation EMFs. The focus is on two measurement methods, namely the frequency selective method and the code selective method. It is expected that the latter will prevail.*

### 1 Uvod

Trenutno smo v obdobju, ko sobivajo mobilni sistemi treh generacij (2G-4G) in se vpeljuje nov sistem 5G. Z vidika obremenitve okolja z elektromagnetnimi polji (EMP) je seveda potrebno upoštevati vse vire, vendar se v tem prispevku osredotočamo predvsem na to, koliko (dodatne) obremenitve okolja z EMP bodo prinesla omrežja 5G oziroma kako sploh pravilno ovrednotiti ta vpliv. Pri ocenjevanju EMP sistemov 5G je potrebno natančno poznavanje delovanje same tehnologije in novih tehnik, ki sestavljajo omrežje 5G. Čeprav uporabljamo pri meritvah sodobne merilnike, ki samodejno detektirajo vse relevantne parametre signala, moramo dobro poznati tehnologijo, da lahko korektno ocenimo rezultat.

Poglavitni del prispevka je namenjen metodam in merilnim postopkom, ki naj bi se uporabljali za ocenjevanje vpliva elektromagnetnih polj sistemov 5G na okolje. Osnovni metodi sta frekvenčno selektivno in kodno selektivno merjenje. Dosedanja praksa je pokazala, da bo slednja primernejša, zato ji je namenjeno tudi več prostora.

### 2 Merjenje elektromagnetnih polj v omrežju 5G

Vsaj v začetnih nekaj letih bo zelo verjeten scenarij deljenje frekvenčnega spektra med sistemi 4G in 5G. Uporabljale se bodo obstoječe antene, ki pa nimajo možnosti uporabe tehnike oblikovanja antenskih snopov (ang. beamforming). Pri dinamičnem deljenju spektra bodo določeni okvirji namenjeni prenašanju podatkov 4G in določeni prenašanju podatkov 5G. Seveda izraba spektra ni tako učinkovita, kot bi bila, če bi bil

namenjen le 5G in bi uporabljal tehniko oblikovanja snopov. Ne glede na to se skupna izsevana moč povečuje, kar je treba ustrezno ovrednotiti.

#### 2.1 Generacije 2G–4G in EMP

Pri ocenjevanju vpliva obstoječih generacij (2G-4G) na okolje so se uporabljale drugačne predpostavke, kot pa so primerne za 5G. Po [1] je povzetih nekaj bistvenih predpostavk. V starejših generacijah so bile pri ocenjevanju obremenitve upoštevane precej večje moči, prav tako pa se ni upoštevalo tehnik za prilagajanje oddajne moči. Stopnje specifične absorpcije (SAR) za telo pri klasičnih terminalih so drugačne od lokalnih SAR pametnih telefonov. Pri 5G se uporabljajo drugačne tehnike prenosa in modulacije, kot v starejših generacijah. Pomembna razlika je tudi v tem, da pri 5G uporabljamo različne storitve različno dolgo na različni način, kar pomeni različne čase izpostavljenosti in tudi izpostavljenost različnim EMP.

Klasičen način ocenjevanja virov EMP je ta, da ocenimo ali gostoto pretoka moči  $S$  (v  $W/m^2$ ) ali električno poljsko jakost  $E$  (v  $V/m$ ). Obe veličini temeljita na meritvi moči (v dBm). Ko dodamo podatek o dobitku merilne antene, lahko iz meritve moči izpeljemo eno od prej omenjenih veličin ( $S$  ali  $E$ ).

Pri tehnologiji 4G se je pri meritvah uporabljalo podatke o sinhronizaciji v celici in drugi referenčni signali. Za točno oceno kanala so se po vsem spektru razširjale vedno prisotne referenčne informacije.

#### 2.2 5G in EMP

Podrobne tehnične značilnosti radijskega vmesnika 5G NR so zajete v tehničnem poročilu 3GPP [2]. Pomembna značilnost novega radijskega vmesnika 5G je ta, da je zelo prilagodljiv - prilagaja se vrsti storitve za katero se uporabi. Dostopanje do virov pri povezavi navzdol se izvaja s tehniko ortogonalnega frekvenčno-porazdeljenega sodostopa (OFDMA, Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), kar je podobno kot pri 4G. Prva prednost te tehnike je v vzporednem prenašanju podatkov v obliki med seboj pravokotnih nosilnikov, druga prednost pa je uporaba prilagodljivega razmika med nosilniki. Modulacija pri 5G NR je spremenljiva, spreminja se od binarne fazne modulacije in kvadrature fazne modulacije do kvadrature amplitudne modulacije višjih redov.

V 5G sta vpeljana dve bistveni spremembi: (1) povečanje maksimalne izhodne moči in (2) povečanje števila sevalnih elementov. Največja izhodna moč za makro bazne postaje 5G je 200 W, medtem ko je ta pri

baznih postajah 4G med 10 in 100 W. Z uporabo *masovnega MIMO* oz. prostorsko porazdelitvijo izsevane energije omogočimo prenos podatkov preko mnogo nekoreliranih poti. Pri *oblikovanju antenskega snopa* pa se izsevana moč posameznega antenskega elementa osredini na posameznega uporabnika. Smerni diagram antene sistema 5G se spreminja tako prostorsko kot časovno – prilagaja se trenutnim prometnim zahtevam in gibanju uporabnikov. Čeprav je energetska učinkovitost 5G na prenesen bit informacije precej boljša kot pri predhodnih generacijah, se skupna poraba energije, zaradi večjih količin prenesenih podatkov, vseeno povečuje. Vzorec obremenitve okolice je precej drugačen, tako časovno kot prostorsko. V [3] najdemo podatek, da je izpostavljenost sevanju bazne postaje 5G 4-krat nižja od maksimalne v 95 % vseh primerov. Pri tem je treba dodati, da je zelo majhna verjetnost, da bo vsa moč skoncentrirana v en sam ozek snop in da bo to trajalo več minut.

Klasične metode, ki veljajo za ocenjevanje vpliva obstoječih tehnologij, so za ocenjevanje vpliva tehnologije 5G manj uporabne, saj dajejo pretirane ocene. Za ocenjevanje vpliva tehnologije 5G na okolje so bolj primerni statistični modeli, ki dajo bolj realne ocene. Tak model ustrezno obdela vhodne podatke, kot so: izkoriščenost bazne postaje, vrsta dupleksa, čas delovanja, prostorska porazdelitev uporabnikov in podobno. Z upoštevanjem ustreznega statističnega modela je dejanska maksimalna moč približno 15 % tiste, ki bi jo dobili z upoštevanjem teoretično največjih vrednosti [4] in posledično se varno območje zmanjša za faktor 2,5.

Pri merjenju izpostavljenosti sevanjem baznih postaj sistema 5G, ki uporabljajo masovni MIMO in oblikovanje antenskega snopa, je potrebno ustrezno nastaviti sistem, da generira maksimalno moč v smeri merjene lokacije. Za to je potrebno dvoje: postavitev aktivnega terminala 5G v neposredno bližino merilne sonde in sodelovanje operaterja bazne postaje 5G. Novi radio 5G (5G NR) uporablja povsem nov pristop razširjanja podatkov, ki so lastni posameznim celicam. 5G NR razširja le minimalne podatke o celici z znano sekvenco, ki se jo da izmeriti z mobilnim terminalom 5G ali ustreznim merilnim sprejemnikom. Vsi ostali signali so lastni terminalni opremi. Informacije v časovni in frekvenčni domeni se nanašajo na podatkovni promet in jih lahko izmerimo le ob prisotnosti delujočega terminala.

### 2.3 Terminalna oprema 5G

Pri ocenjevanju vpliva EM polj na človeka ima uporabniški terminal pomembno vlogo. Pri ocenjevanju vpliva moramo poznati uporabniški profil, npr. kakšni so deleži uporabe posamezne storitve (merimo količino podatkov, ki se prenašajo na ali od terminala) oz. čas trajanja posamezne storitve (npr. govora, pretočnega videa, uporabe socialnih medijev in podobno).

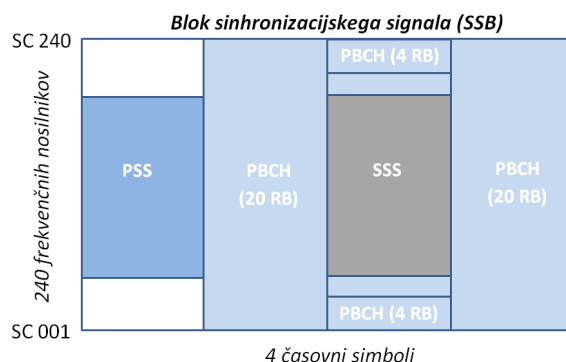
Pri ocenjevanju vpliva terminala 5G na človeka moramo za vsak trenutek vedeti več stvari, kot je le

podatek o SAR. Vedeti moramo katera povezljivost je v uporabi (5G, 4G ali Wi-Fi), katera frekvenca se v določenem trenutku uporablja (pod 1 GHz, med 1 in 6 GHz, nad 6 GHz) in kdaj se dogajajo prehodi med sistemi. Z uporabo različnih storitev (govor, gledanje videa, pošiljanje sporočil) so različni tudi načini uporabe terminala (enoročno, dvoročno, vertikalni ali horizontalni položaj). Od omenjenega je odvisna razdalja med terminalom in telesom. Pomembno je tudi v kakšnem okolju (urbano, podeželje) se uporabnik giblje.

Čeprav se v tem prispevku podrobno ne ukvarjamo z mobilnimi terminali 5G, moramo omeniti, da so meritve obremenitve okolice baznih postaj 5G precej bolj realne, če merimo v bližini mobilnega terminala 5G, prav tako pa zaradi bližine uporabe terminala pri določenih storitvah njegov vpliv ni povsem zanemarljiv.

### 3 Zgradba 5G NR – kaj merimo?

Meritve v fizičnem sloju 5G NR so podrobno opisane v specifikacijah 3GPP [5]. Edini signal, ki je v omrežju 5G vedno prisoten je blok sinhronizacijskega signala (SSB, Synchronization Signal Block) (slika 1). Vsak SSB zaseda 240 nosilnikov v frekvenčnem prostoru in 4 simbole v časovnem prostoru. Vsebuje primarne (PSS, Primary Synchronization Signal) in sekundarne (SSS, Secondary Synchronization Signal) sinhronizacijske signale in fizični oddajni kanal (PBCH, Physical Broadcast Channel). Tako pri 4G kot pri 5G vsebujeta PSS in SSS fizično identiteto celice (PCI, Physical Cell Identity). PBCH prenaša glavni blok z informacijami (MIB, Master Information Block) in nekaj drugih informacijskih bitov.

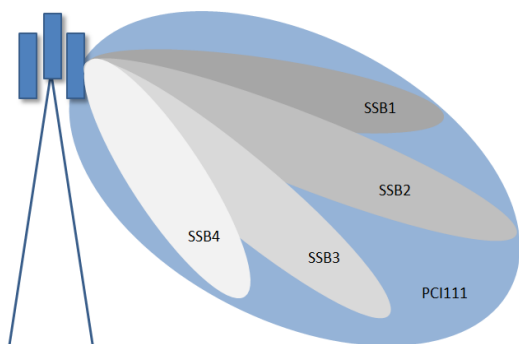


Slika 1. Blok sinhronizacijskega signala (SSB)

Mobilni terminali uporabljajo referenčne signale za demodulacijo (DM-RS, Demodulation Reference Signal) za ocenjevanje kanala, da lahko demodulirajo kanal PBCH. Razporeditev referenčnih signalov DM-RS v kanalu PBCH določa PCI. Vsaka celica v omrežju 5G NR ima svojo oznako PCI, ki jo razlikuje od drugih celic (slika 2).

Načrtovanje omrežja 5G vpliva na postopek sinhronizacije, demodulacijo in predajo zveze. Pri 5G NR imamo 1008 edinstvenih oznak celic (PCI). Vsaka celica oddaja občasno podatke o SSB. Organizacija

3GPP je določila pet prenosnih vzorcev, od A do E. Ti vzorci se razlikujejo po frekvenčnem območju, največjem številu prenosov SSB, razmiku med nosilniki in začetnih simbolih OFDM. SSB-ji so organizirani v rafale, od katerih je vsak sestavljen iz enega ali več SSB-jev. Parameter  $L_{max}$  označuje največje število SSB-jev, ki jih je mogoče oblikovati za različne primere. Za višja frekvenčna območja (nad 6 GHz) je ta številka višja ( $L_{max}=64$ ), za frekvence pod 1 GHz pa nižja ( $L_{max}=4$ ), kar se odraža v potrebi po več in manjših snopih v spektru mm-valov. Perioda trajanja SSB se lahko spreminja od 5 ms do 160 ms (5, 10, 20, 40, 80 in 160 ms). Daljše periode, kot npr. 80 ms in 160 ms, so primerne za SSB-je v omrežjih, ki delujejo na frekvencah mm-valov, ker to omogoča več časa za prenos večjega števila SSB-jev v prenosnih vzorcih D in E.



Slika 2. Celica omrežja 5G z oznako PCI111 in štirimi sinhronizacijskimi snopi SSB

## 4 Merilne metode

Pri merjenju elektromagnetnih polj virov 5G se pretežno uporabljata dva postopka [6]:

1. frekvenčno selektivne meritve,
2. kodno selektivne meritve.

Bazna postaja 5G NR oddaja le minimalne informacije o celici (npr. SSB). Velik del spektra je tako prezrt, saj se v drugih delih spektra lahko pojavljajo signali, ki so pomembni za terminalno opremo. Za oceno maksimalne izsevane moči na podlagi izmerjene moči SSB se zato uporabljajo različni načini ekstrapolacije.

### 4.1 Frekvenčno selektivne meritve

Meritve obstoječih mobilnih sistemov (2G–4G) se pretežno izvajajo na frekvenčno selektivni način. Osnovni merilnik je spektralni analizator. Meritve se povprečijo čez določeno periodo, običajno je to 6 minut, pri čemer se vračuna tudi časovno spremenljivo prometno obremenitev.

Frekvenčno selektivne meritve temeljijo izključno na meritvah močnostnega spektra. V primerjavi s kodno selektivnimi meritvami se prejeti signali ne dekodirajo in ne dodelijo nobeni tehnologiji, operaterju ali celici, upoštevajo pa se moč in motnje, značilne za merjeni signal. Ta metoda je zagotovo dobra glede določanja skupne prejete moči na določeni lokaciji, vendar naj

omenimo nekaj razlogov, zakaj je mogoče manj uporabna od kodno selektivnih meritev.

Močnostni spekter širokopasovnih signalov se časovno zelo hitro spreminja. Mogoče je sicer meriti ovojnico močnostnega spektra, vendar je to z uporabo izotropnih anten zelo težko. Izotropna antena zajema moč iz vseh smeri in vseh polarizacij. V času zajemanja signalov se močnostni spekter spreminja za 5 do 10 dB, odvisno od obremenitve merjene celice in drugih okoliščin.

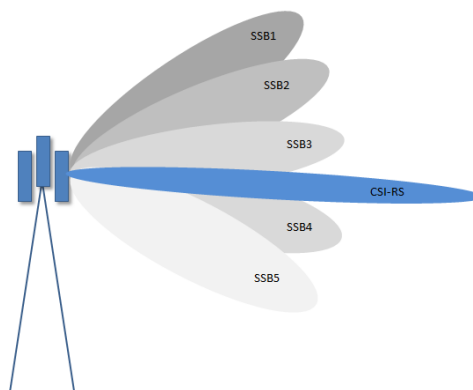
Običajna merilna oprema (sprejemniki) omogoča istočasno zajemanje največ 20 do 40 MHz spektra. Če je spekter širši, se mora sprejemnik vrniti na začetek in ponoviti meritev, medtem ko se močnostni spekter, zaradi živega prometa v celici, presihov signala in podobno ves čas spreminja. Posledično se močnostnega spektra ne zajame sočasno in ni mogoče zajeti pravega maksimuma sprejetega močnostnega spektra.

### 4.2 Kodno selektivne meritve

Pri kodno selektivnih meritvah se anteno usmeri v smer najmočnejšega signala. Kodno selektivni sprejemniki samodejno zaznajo centralno frekvenco nosilnika, merijo na znanih signalih in ločijo koristne signale od šuma. Rezultat meritve je ena sama vrednost sprejete moči referenčnega sinhronizacijskega signala (SS-RSRP, Synchronization Signal Reference Signal Received Power), kar je bolj točno in lažje za obravnavo kot stalno iskanje maksimalne vrednosti. Iz takšne meritve so razvidni tudi podatki, kolikšen je delež posameznih elementov v skupni sprejeti moči signala, kot npr. PCI in SSB. Parameter SS-RSRP je opredeljen kot linearno povprečje prispevkov moči (v W) vseh elementov vira, ki prenašajo SSS.

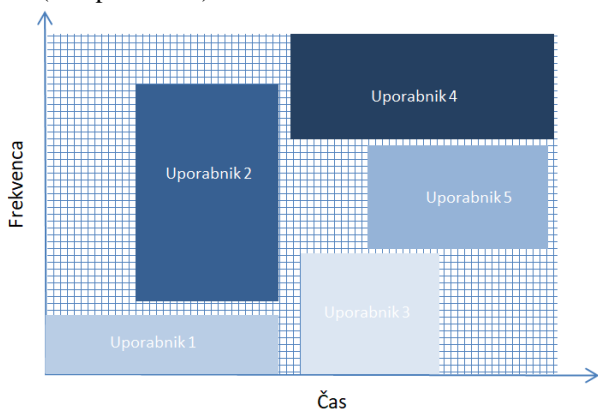
Ker pa dobimo iz meritev minimalno število podatkov o posameznih celicah je treba za zanesljive meritve EMP 5G NR uporabiti podobne ekstrapolacijske parametre. Osnovni parametri, ki se uporabljajo pri ekstrapolaciji so:

- i. Razlika med dobitkom sinhronizacijskega (SSB) in podatkovnega signala (slika 3) – predvidoma so uporabniški/podatkovni antenski snopi precej ožji in močnejši kot snopi sinhronizacijskih signalov. Te podatke je pred meritvijo potrebno pridobiti od operaterja merjenega vira.



Slika 3. Komponenta signala CSI-RS, ki je lastna terminalni opremi, se oddaja z večjo močjo in ima precej ožji snop

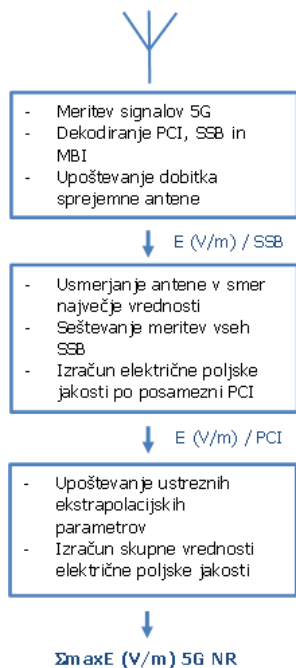
- ii. Razlika v močeh pri povezavi navzdol in navzgor (slika 4) – razmere pri komunikaciji navzdol in navzgor v načinu TDD močno vplivajo na izsevano moč bazne postaje sistema 5G. Če je npr. več oken rezerviranih za povezavo navzgor, se izsevana moč zmanjša. Podatek o tem ima operater, ki načrtuje omrežje. Izjema so kombinirana omrežja LTE/5G, kjer se nosilnik 5G uporablja le za povezavo navzdol (do uporabnika).



Slika 4. Prilagodljivo dodeljevanje virov, tako frekvenčno kot časovno.

- iii. Preslikava moči sinhronizacijskega signala na ves spekter – bloki sinhronizacijskih signalov (SSB) imajo pasovno širino od 3,6 do 56 MHz, kar je odvisno od uporabljene širine posameznih kanalov. Skupna pasovna širina kanala je lahko do 400 MHz. Podatek o tem poda operater, lahko pa se jo določi tudi z ustreznim mobilnim terminalom..

### 4.3 Merilni postopek



Slika 5. Primer merilnega postopka z uporabo kodno selektivne metode

Na sliki 5 so shematsko prikazani koraki meritve pri ocenjevanju obremenitve okolja bazne postaje omrežja 5G z EMP. Izbrana je kodno selektivna metoda, kjer merilni sprejemnik iz sprejetega signala razloči osnovne podatke, kot so PCI, SSB in MBI. Rezultat detekcije je izmerjena moč oz. električna poljska jakost po posameznem SSB. S seštevanjem polj posameznih SSB dobimo skupno moč v celici (PCI). Za dokončen izračun obremenitve izberemo ustrezne parametre, ki so opisani v poglavju 4.2 in naredimo ekstrapolacijo. Končen rezultat je skupna poljska jakost na merjeni točki.

## 5 Sklep

Pri ocenjevanju vpliva 5G na okolico predvidevamo, da bodo prevladovale kodno selektivne meritve. Pri določanju pravih vrednosti elektromagnetnih polj (EMP) pa moramo čim bolj natančno določiti ekstrapolacijske vrednosti, tudi zato, da določimo najslabši mogoči scenarij obremenitve. Za določanje ekstrapolacijskih vrednosti pa so pomembni podatki, ki jih izmerimo z merilnimi instrumenti. To so npr. vrednosti električne poljske jakosti ali moči, ki jih izločimo iz izmerjenih parametrov, kot sta SSB in PCI. Ko upoštevamo še dobitke sprejemne antene, dobimo pravi rezultat, ki ga primerjamo z mejnimi vrednostmi, ki veljajo v državi. Z ustrežno programsko opremo (tudi z aplikacijo na pametnem telefonu) lahko neposredno razberemo trenutno obremenitev z EMP različnih virov (po celicah, po operaterjih, po frekvenčnih območjih), varno območje okrog vira sevanja, možnost za dodajanje novih virov, in podobno.

## Literatura

- [1] Luca Chiaraviglio, Ahmed Elzanaty and Mohamed-Slim Alouini: Health Risks Associated with 5G Exposure: A View from the Communications Engineering Perspective, arXiv:2006.00944v1 [eess.SP], 1 Jun 2020
- [2] 3GPP TR 21.916 V16.0.0 (2021-06), 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 16 Description; Summary of Rel-16 Work Items (Release 16)
- [3] Helmut Keller: On The Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields Transmitted by 5G NR Base Stations, Health Physics 117(5):1, April 2019
- [4] Björn Thors, Anders Furuskär, Davide Colombi and Christer Törnevik: Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO, DOI 10.1109/ACCESS.2017.2753459, IEEE Access
- [5] 3GPP TS 38.215 V16.4.0 (2020-12), 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Physical layer measurements (Release 16)
- [6] Manuel Mielke: EMF Measurements in 5G NR, Rohde & Schwarz, White paper, Version 01.00, 2020