Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

telecom

MDPI

Recenzia

Prehľad a návod na meranie elektromagnetického poľa (EMF) v 5G

Keze Li *,†, Olaoluwa Popoola† a Yusuf Sambo†

James Watt School of Engineering, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, Spojené kráľovstvo; olaoluwa.popoola@glasgow.ac.uk (OP); yusuf.sambo@glasgow.ac.uk (YS)

* Korešpondenčná adresa: 2357761l@student.gla.ac.uk

† Títo autori prispeli k tejto práci rovnakou mierou.

Abstrakt

Meranie elektromagnetického poľa (EMF) v 5G je náročnejšie ako meranie v predchádzajúcich generáciách bunkových sietí, pretože 5G New Radio využíva duplexné vysielanie s časovým delením, flexibilné šírky pásma, rozptyl lúča, masívne MIMO a užívateľsky špecifické prevádzkové lúče. V dôsledku toho nameraná úroveň synchronizačného signálového bloku (SSB) alebo PBCH-DMRS nemusí priamo predstavovať maximálnu expozíciu produkovanú prenosom dát. To motivuje k kombinovanému tutoriálu a štruktúrovanému prehľadu existujúcich štúdií a postupov merania EMF v 5G. Tento článok prehľadáva literatúru o meraní EMF v 5G klasifikáciou existujúcich metód na frekvenčne selektívne meranie, kódovo selektívne meranie, hodnotenie skutočnej expozície, extrapoláciu maximálnej expozície a hodnotenie založené na sieťovom počítadle. Reprezentatívne terénne štúdie, správy o verejných meraniach a štúdie založené na sieťových údajoch sú porovnávané podľa ich scenárov merania, cieľov expozície a obmedzení. Článok ďalej rozoberá kľúčové zdroje neistoty vrátane posunu lúča/zisku, pracovného cyklu TDD, extrapolácie šírky pásma, variácie prevádzky, priestorového vzorkovania a neistoty súvisiacej so zariadením. Nakoniec sa diskutuje o otvorených výzvach súvisiacich s meraniami milimetrových vĺn FR2 a rekonfigurovateľnými prostrediami šírenia. Kombináciou tutoriálu so štruktúrovaným prieskumom tento článok objasňuje postupy merania 5G EMF, extrapoláciu maximálnej expozície, zdroje neistoty a problémy s meraním milimetrových vĺn FR2.

Kľúčové slová:mobilná komunikácia 5G; antény; základňové stanice; zdravie a bezpečnosť; MIMO

1. Úvod

Rýchle zavádzanie mobilných sietí piatej generácie (5G) zvýšilo dopyt po spoľahlivom meraní elektromagnetického poľa (EMF) a hodnotení expozície. Podľa správy GSMA Intelligence Mobile Economy 2026 globálny mobilný ekosystém podporuje približne 8,8 miliardy bezdrôtových pripojení a 5,8 miliardy unikátnych mobilných predplatiteľov, čo zodpovedá približne 70 % svetovej populácie [1S pokračujúcim rozširovaním sietí 5G sa rozmiestnenie základňových staníc (BS) stáva hustejším a heterogénnejším, čo podporuje vylepšené mobilné širokopásmové pripojenie, masívnu komunikáciu strojového typu a ultraspoľahlivé služby s nízkou latenciou. Tento vývoj zlepšuje komunikáciu. kapacitu a flexibilitu služieb, ale zároveň robia posúdenie súladu s EMF technicky náročnejším, pretože emisie BS sa menia v závislosti od prevádzkového zaťaženia, rozloženia používateľov, konfigurácie antény a časovo premenlivej prevádzky siete [2–4].

Check for updates

Akademický redaktor: Michael Hempel

Prijaté: 28. mája 2026

Revidované: 30. júna 2026

Schválené: 8. júla 2026

Publikované: 20. júla 2026

Autorské práva:© 2026 autori. Držiteľ licencie MDPI, Bazilej, d. Švajčiarsko. Tento článok je článok s e otvoreným prístupom distribuovaný podľa podmienokLicencia Creative na Comm Attribution (CC BY).

https://doi.org/10.3390/telecom7040091

V kontexte súladu s EMF tieto architektonické zmeny prinášajú nové výzvy v oblasti merania: vyžarovaný výkon zostupného kanála je vysoko dynamický kvôli tvarovaniu/rozptylu lúča, plánovaniu závislému od prevádzky a konfigurácii duplexného vysielania, takže najhorší prípad expozície nemožno spoľahlivo odvodiť z jedného statického vysielacieho merania bez vhodnej extrapolácie. Táto nová generácia využíva variabilnú numerológiu, prevádzkový režim časového delenia duplexu (TDD), flexibilnú šírku pásma a vysokú flexibilitu pri implementácii technológie viacerých antén na maximalizáciu využitia geografických a časových zdrojov poskytovaných komunikačným kanálom [5]. Na zabezpečenie všadeprítomného pokrytia je potrebné rozsiahle nasadenie základňových staníc (BS), ktoré budú existovať koexistujúco so súčasnými mobilnými systémami [6]. Zdôrazní sa teda aj vystavenie širokej verejnosti elektromagnetickým poliam. Hoci neexistuje priama súvislosť medzi vystavením elektromagnetickým poliam z mobilných komunikačných systémov a zdravotnými rizikami, WHO vyzvala na ďalší výskum s cieľom lepšie pochopiť interakciu medzi elektromagnetickými poliami a ľudským telom [7].

Vystavenie verejnosti elektromagnetickým poliam z mobilných komunikačných systémov je regulované medzinárodnými a národnými smernicami o vystavení. Smernice Medzinárodnej komisie pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP) poskytujú základné obmedzenia a referenčné úrovne na obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam od 100 kHz do 300 GHz [8], zatiaľ čo niekoľko krajín uplatňuje dodatočné alebo prísnejšie národné požiadavky [9]. Hoci sa vo všeobecnosti uvádza, že vystavenie elektromagnetickým poliam z mobilných komunikačných sietí je pod regulačnými limitmi [10], spoľahlivé meranie zostáva nevyhnutné pre preukázanie súladu, audit siete a verejnú komunikáciu. Pri praktickom hodnotení BS je dôležité rozlišovať medzi skutočnou expozíciou, ktorá predstavuje úroveň poľa za skutočných podmienok zaťaženia siete, a maximálnou alebo extrapolovanou expozíciou, ktorá odhaduje úroveň poľa, ktorá by mohla nastať za definovaných najhorších alebo takmer najhorších podmienok prenosu.

V predchádzajúcich generáciách mobilných telefónov bolo hodnotenie maximálnej expozície pomerne jednoduché, pretože ako meracie kotvy sa mohli použiť stabilné vysielacie alebo referenčné signály [11–13]. Napríklad, základňové stanice GSM používali kanál riadenia vysielania (BCCH) [11], systémy UMTS používali spoločný pilotný kanál (CPICH) [12] a systémy LTE používali referenčné signály špecifické pre bunku (CRS) [13]. Tieto referenčné signály boli nepretržite vysielané so známymi vzťahmi k maximálnemu výkonu sektora, čo umožnilo extrapoláciu nameraných úrovní poľa pomocou relatívne jednoduchých a deterministických faktorov [11–13]. Preto by frekvenčne selektívne alebo kódovo selektívne merania mohli často poskytnúť priamy základ pre odhad maximálnej úrovne poľa v okolí základňových staníc GSM, UMTS a LTE.

V 5G New Radio (NR) sa problém merania stáva zložitejším, pretože referenčný signál meraný v danom mieste nemusí nevyhnutne predstavovať maximálnu úroveň poľa, ktorú môžu produkovať prevádzkové kanály. 5G NR zavádza flexibilnú numerológiu, široké šírky pásma nosných, prevádzku s časovým delením duplexu (TDD), masívny systém s viacerými vstupmi a viacerými výstupmi (MIMO), aktívne anténne systémy, rozptyl lúča a užívateľsky špecifické prevádzkové lúče [14–17]. Blok synchronizačného signálu (SSB), vrátane primárneho synchronizačného signálu (PSS), sekundárneho synchronizačného signálu (SSS), fyzického vysielacieho kanála (PBCH) a referenčného signálu demodulácie PBCH (PBCH-DMRS), sa bežne používa ako praktická meracia kotva pre 5G NR [18 rokov,19Merania založené na SSB alebo PBCH-DMRS si však vyžadujú dodatočnú extrapoláciu, aby sa zohľadnilo obsadenie celej šírky pásma nosnej, pracovný cyklus downlinku TDD a rozdiely v lúči/zisku medzi lúčmi SSB a lúčmi údajov špecifických pre používateľa [19–22].

Existujúce štúdie navrhli niekoľko prístupov na hodnotenie expozície EMF z 5G základňových staníc, vrátane teoretických extrapolačných postupov, metód merania in situ pre masívne MIMO základňové stanice, experimentálnej analýzy efektov duplexovania a formovania lúča, hodnotenia expozície na základe sieťových počítadiel a kampaní na meranie v teréne [19–28Tieto štúdie vo všeobecnosti uvádzajú úrovne expozície pod medzinárodnými limitmi, ale líšia sa v

scenár merania, frekvenčný rozsah, množstvo expozície, dopravné podmienky, stratégia extrapolácie, konfigurácia zariadenia a prístup k informáciám špecifickým pre operátora. Preto sa tento prieskum a tutoriál zameriavajú na to, ako sa vykonávajú merania 5G EMF, ako aj na to, ako sa rôzne prístupy k meraniu interpretujú, porovnávajú a spájajú s neistotou pri hodnotení maximálnej expozície.

Rozdiel medzi frekvenčným rozsahom 1 (FR1) a frekvenčným rozsahom 2 (FR2) ďalej zvyšuje potrebu štruktúrovaného prehľadu metód merania elektromagnetického žiarenia 5G. Nasadenia FR1 sú bližšie k predchádzajúcim frekvenčným pásmam mobilných telefónov a v skorých štúdiách meraní 5G sa im venovala najväčšia pozornosť. Naproti tomu nasadenia FR2 fungujú v milimetrovom frekvenčnom rozsahu, kde vyššie straty dráhy, užšie lúče, silnejšia priestorová variabilita a expozičné veličiny založené na hustote výkonu predstavujú ďalšie výzvy pri meraní [14,15,29–34]. Preto meranie FR2 nemožno považovať len za rozšírenie hodnotenia FR1 o vyššie frekvencie; vyžaduje si starostlivé zváženie nastavenia lúča, priestorového priemerovania, podmienok blízkeho/vzdialeného poľa a výberu meracej antény.

Pre objasnenie rozsahu článku je táto práca štruktúrovaná ako tutoriál aj prehľad. Tutoriál predstavuje expozičné veličiny, regulačné limity a funkcie 5G NR, ktoré sú potrebné na pochopenie merania EMF. Tieto časti vysvetľujú pojmy ako SAR, hustota dopadajúceho a absorbovaného výkonu, SSB, PBCH-DMRS, prevádzka TDD, masívne MIMO a tvarovanie lúča. Článok tiež skúma štúdie a postupy merania 5G EMF, ktoré sú klasifikované, porovnané a diskutované z hľadiska cieľa merania, metódy extrapolácie, zdroja neistoty, použiteľnosti FR1/FR2 a praktických obmedzení. Časti tutoriálu preto poskytujú technické pozadie potrebné na pochopenie problému merania, zatiaľ čo časti prehľadu kriticky organizujú a porovnávajú existujúcu literatúru o hodnotení expozície 5G EMF. Hlavné príspevky a organizácia tohto článku sú nasledovné:

- Sekcia2poskytuje prehľad expozičných veličín, mechanizmov interakcie a regulačných limitov relevantných pre posudzovanie elektromagnetického žiarenia v mobilných komunikačných systémoch. Zhrňuje veličiny blízkeho a vzdialeného poľa vrátane špecifickej miery absorpcie (SAR), hustoty výkonu, intenzity elektrického poľa a hustoty dopadajúceho výkonu a vysvetľuje ich úlohu pri hodnotení verejnej a pracovnej expozície.
- Sekcia3predstavuje funkcie 5G NR, ktoré priamo ovplyvňujú meranie EMF, vrátane flexibilnej numerológie, prenosu SSB, PBCH-DMRS, prevádzky TDD, masívneho MIMO, formovania lúča a rozptylu lúča. Táto časť vysvetľuje, prečo je hodnotenie expozície 5G zložitejšie ako postupy merania používané pre GSM, UMTS a LTE.
- Sekcia4skúma existujúce metódy merania 5G elektromagnetických polí a organizuje ich do taxonómie zahŕňajúcej frekvenčne selektívne meranie, kódovo selektívne meranie, hodnotenie skutočnej expozície, extrapoláciu maximálnej expozície a hodnotenie založené na sieťovom počítadle. Taktiež porovnáva reprezentatívne štúdie a správy podľa ich scenárov, cieľov expozície, metód a obmedzení.
- Sekcia5analyzuje hlavné zdroje neistoty pri meraní EMF 5G, vrátane ofsetu zisku SSB voči dátovému lúču, pracovného cyklu TDD, extrapolácie šírky pásma, variácie zaťaženia prevádzkou, priestorového vzorkovania a neistoty súvisiacej so zariadením.
- Sekcia6rozoberá praktické obmedzenia a budúce výzvy vrátane merania nezávislého od operátora, konzervatívnych predpokladov extrapolácie, merania milimetrových vĺn FR2 a rekonfigurovateľných prostredí šírenia s pomocou RIS.
- Nakoniec, sekcia7uzatvára článok a sumarizuje budúce smery výskumu pre spoľahlivé, transparentné a neistotu uvedomujúce meranie 5G EMF.

2. Pokyny a limity pre vystavenie elektromagnetickým poliam

This section presents the regulatory framework for limiting exposure to EMF in mobile communication systems. It introduces the main exposure quantities used in compliance assessment, the distinction between occupational and general-public exposure limits, and the frequency-dependent transition from SAR-based restrictions to power-density-based restrictions.

2.1. Purpose and Scope

The purpose of the ICNIRP guidelines is to limit human exposure to EMFs in order to protect against established adverse health effects. The guidelines cover the frequency range from 100 kHz to 300 GHz and provide the main international basis for evaluating public and occupational exposure from radio communication systems, including mobile network BSs [8]. In this framework, exposure limits are derived from scientific evidence on biological and physiological effects of EMF exposure. For each established effect, ICNIRP identifies an adverse health effect threshold and then applies conservative reduction factors to define exposure restrictions suitable for practical compliance assessment.

The ICNIRP first published guidelines for human exposure to time-varying EMF in 1998 [35], and the radiofrequency part was updated in 2020 [8]. The updated guidelines consider acute and long-term exposures, as well as continuous and discontinuous EMF signals. Based on the evidence reviewed by ICNIRP, exposure below the prescribed restriction levels is not expected to produce adverse health effects. Nevertheless, the International Agency for Research on Cancer classifies RF EMF as Group 2B, indicating that possible risks continue to require scientific monitoring [36]. Other reviews have also discussed reported adverse effects associated with wireless radiation [37], while Karipidis et al. [34] specifically reviewed biological and physiological studies of EMF above 6 GHz at exposure levels below the ICNIRP occupational limits.

A key frequency dependent consideration is that the penetration depth of EMF into the body decreases as frequency increases. Therefore, higher-frequency fields are absorbed more superficially than fields used by earlier mobile communication technologies [38]. This frequency dependence is important for 5G exposure assessment because 5G systems operate across both sub-6 GHz (FR1) and millimetre-wave bands (FR2). As a result, the relevant compliance quantities change with frequency, moving from internal quantities such as SAR at lower radiofrequencies to surface-related quantities such as absorbed power density at higher frequencies.

V usmerneniach sa rozlišuje medzi osobami vystavenými žiareniu v práci a širokou verejnosťou. Tí, ktorí sú v rámci svojho zamestnania klasifikovaní ako osoby vystavené žiareniu v práci, sú vystavení žiareniu v kontrolovanom prostredí, absolvovali školenie o možných nebezpečenstvách vyplývajúcich z elektromagnetických polí a o tom, ako ich zmierniť, a majú na to kognitívne a behaviorálne schopnosti. Pojem „široká verejnosť" sa vzťahuje na kohokoľvek v akomkoľvek veku alebo zdravotnom stave vrátane plodov, ako aj na obzvlášť citlivé skupiny alebo jednotlivcov, ktorí si môžu byť málo vedomí svojho vystavenia elektromagnetickým polím alebo ho môžu len málo kontrolovať.

2.2. Množstvá, jednotky a mechanizmy interakcie

Elektromagnetické polia (EMP) sa skladajú z oscilujúcich elektrických a magnetických polí, kde termín „frekvencia" označuje počet kmitov za sekundu a meria sa v hertzoch (Hz). Pole prenáša energiu zo zdroja, keď sa od neho vzďaľuje, a táto energia sa meria vo wattoch (W), čo zodpovedá jednému joulu (J) energie za jednotku času. Keď je biologické telo vystavené EMP, časť energie odráža od seba, zatiaľ čo zvyšok absorbuje. V dôsledku toho majú charakteristiky EMP, ako aj fyzikálne vlastnosti a rozmery tela významný vplyv na komplexné vzorce EMP, ktoré sa v tele vyvíjajú.

Elektrické pole je hlavnou zložkou elektromagnetického poľa, ktorá má vplyv na organizmus [39]. Indukované elektrické polia (V_{ind}, merané vo voltoch na meter; V m^{-1}) sú elektrické polia, ktoré sú prítomné vo vnútri tela a môžu mať množstvo účinkov, ktoré môžu negatívne ovplyvniť zdravie [40].

Z hľadiska zdravotného rizika je množstvo absorbovanej energie EMF v biologickom tkanive vo všeobecnosti znepokojujúce, pretože je väčšinou zodpovedné za tepelné účinky [8]. Pri frekvenciách pod približne 6 GHz sa na opis výkonu absorbovaného na jednotku hmotnosti používa termín „špecifická miera absorpcie“ (SAR). Nad 6 GHz by sa expozícia mala opisovať z hľadiska hustoty absorbovaného výkonu ($S_{brušné\ svaly}$) nad plochou (Wm^{-2}), kde sa EMF absorbuje povrchnejšie. Pre lepšie zohľadnenie špecifických škodlivých vplyvov na zdravie sa SAR definuje pre viacero hmotností; SAR_{10g} je výkon absorbovaný na kilogram na hmotnosť 10 g, zatiaľ čo priemerný SAR pre celé telo je výkon absorbovaný na kilogram na celé telo [28].

V súlade s tým v tejto analýze rozlišujeme medzi (i) základnými obmedzeniami súvisiacimi s SAR alebo hustotou absorbovaného výkonu, ktoré priamo súvisia so stanovenými tepelnými účinkami, a (ii) merateľnými referenčnými veličinami, ako je intenzita elektrického poľa alebo hustota dopadajúceho výkonu, používanými pri praktických meraniach zhody na mieste, kde sa na odhad najhoršieho prípadu expozície používa extrapolácia.

Dva kľúčové prvky, ktoré ovplyvňujú smer a dosah elektromagnetického žiarenia z antény, sú vysielací výkon a smerovosť. Všesmerové antény vyžarujú výkon rovnomerne vo všetkých smeroch, zatiaľ čo smerové antény smerujú väčšinu svojej energie jedným smerom v závislosti od zisku antény. V porovnaní s všesmerovou anténou, smerová anténa s vyšším ziskom produkuje silnejší signál v zamýšľanom smere [41].

Vo všetkých vysielacích anténach tvoria elektrické a magnetické polia dve zóny na základe vzdialenosti od antény: blízke pole a vzdialené pole. Keďže oblasti blízkeho a vzdialeného poľa majú odlišné vyžarovacie diagramy a rýchlosti rozpadu, elektromagnetické žiarenie v týchto dvoch oblastiach sa analyzuje s použitím rôznych expozičných veličín. V praktickom hodnotení expozície sa SAR bežne používa pri nižších frekvenciách a pri hodnotení zariadení blízkeho poľa, zatiaľ čo veličiny založené na hustote výkonu sa stávajú relevantnejšími pri vyšších frekvenciách a pri hodnotení expozície vzdialeného poľa. V tejto recenzii, $S_{vrátane}$ označuje hustotu dopadajúceho výkonu použitú ako merateľná referenčná veličina, zatiaľ čo $S_{brušné\ svaly}$ označuje absorbovanú hustotu výkonu používanú ako základná obmedzujúca veličina. Elektromagnetické žiarenie blízkeho poľa ovplyvňuje najmä uplink mobilných komunikačných systémov, zatiaľ čo downlink je spojený najmä s expozíciou vzdialenému poľu, pretože mobilné zariadenia vysielajú s relatívne nízkym výkonom, ale blízko používateľov, zatiaľ čo BS vysielajú na väčšie vzdialenosti so stredným až vysokým výkonom [42,43].

2.2.1. Blízke pole a špecifická miera absorpcie (*SAR*)

Oblasť blízkeho poľa, ktorá sa delí na reaktívne blízke pole a radiačné blízke pole, sa vzťahuje na oblasti, ktoré sú bližšie k anténe. Vlnová dĺžka λ tiež ovplyvňuje označenia reaktívneho a radiačného blízkeho poľa [44]. Od antény do určitej vzdialenosti začína reaktívna zóna blízkeho poľa na $\lambda/2\pi$ V reaktívnom blízkom poli je súvislosť medzi intenzitami elektrických polí (V) a magnetické polia (H) je často príliš zložité na analýzu a ťažko merateľné. V dôsledku toho sa tieto dve veličiny často hodnotia nezávisle [45]. V reaktívnej zóne blízkeho poľa je stratená energia ľahko absorbovaná ľudským telom, čo predstavuje väčšinu expozície žiareniu blízkeho poľa [46Keďže pozorovací bod je dostatočne ďaleko od vysielacej antény, podmienku expozície možno aproximovať ako podmienku vzdialeného poľa a účinky blízkeho poľa možno zanedbať. Aj keď sa jeho magnetické a elektrické zložky líšia od zložiek vzdialeného poľa, energia v radiačnom blízkom poli je plne radiačná. Sila elektrického poľa je úmerná inverznej tretej mocnine vzdialenosti ($1/vzdialenosť^3$), zatiaľ čo sila

Zložka magnetického poľa, ktorá je vo fázovej kvadratúre s elektrickým poľom, je úmerná inverznej štvorcu vzdialenosti (1/*vzdialenosť*2) [47].

Vystavenie elektromagnetickému žiareniu v oblasti blízkeho poľa počas časového intervalu (*t*) sa často hodnotí pomocou špecifickej miery absorpcie (*SAR*), čo možno matematicky zapísať ako:

$$\mathrm{SAR} = \frac{d}{dt}\left(\frac{dZ}{dm}\right) = \frac{d}{dt}\left(\frac{dZ}{\rho dV}\right).$$

kde δZ je časová derivácia prírastkovej spotreby tepelnej energie absorbovanej prírastkovou hmotnosťou (δm) obsiahnutý v prvku objemu (δV) konkrétnej hmotnostnej hustoty tkaniva (kg m^{-3}, ρ) [48].

Pre rôzne časti tela s rôznou mierou absorpcie SAR sa metrika SAR ďalej delí na nasledujúce kategórie.

(1) Priemerne pre celé telo *SAR* (*wbaSAR*): Toto je pomer celkového absorbovaného výkonu telom až po celú jeho hmotnosť. Bol vybraný ako štandard pre monitorovanie elektromagnetického žiarenia [8]. Pre dodržiavanie predpisov podľa smerníc ICNIRP 2020 sa priemerná hodnota SAR pre celé telo spriemeruje počas 30 minút, zatiaľ čo lokálna hodnota SAR a hustota absorbovaného výkonu sa spriemerujú počas 6 minút. *wbaSAR* sa skladá takto:

$$wbaSAR = \frac{1}{M_R}\int SAR\,\delta m = \frac{1}{M_R}\int \sigma |E|^2 \delta V$$

kde *M* predstavuje celkovú hmotnosť tela, *R* označuje oblasť tela a *V*. je model celkového objemu tkaniva pre telo [48].

(2) Orgánovo-špecifické priemerovanie *SAR* (*osaSAR*): Toto ilustruje, ako konkrétne časti tela absorbovať EMF výpočtom hmotnostného priemerného SAR v danom orgáne alebo tkanive:

$$osaSAR = \frac{1}{M_{orgán}}\int SAR\,\delta m = \frac{1}{M_{orgán}}\int \sigma |E|^2 \delta V$$

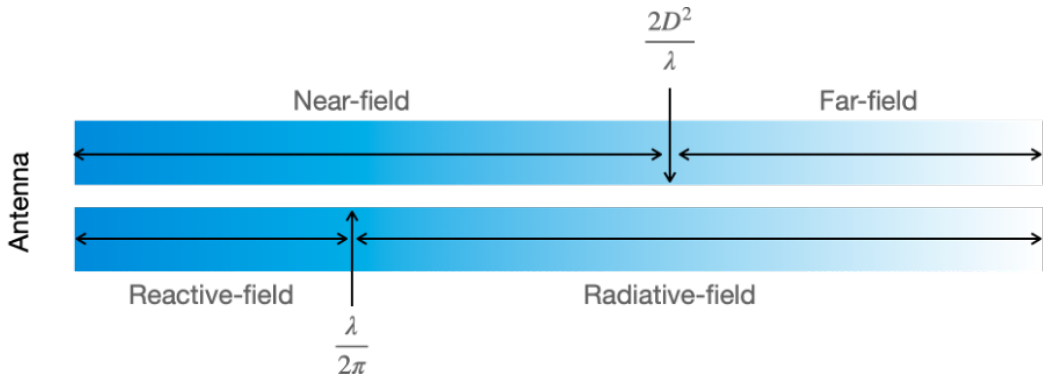
kde *Morgan* predstavuje hmotnosť hodnoteného orgánu alebo tkaniva [48].

(3) Vrcholovo-priestorová priemerná hodnota SAR (*psaSAR*): Toto je najväčší miestny *SAR* spriemerované počas dané množstvo tkaniva, typicky 10 g, v priebehu šiestich minút [48].

Pred udelením licencie alebo používaním elektronických zariadení *SAR* vyhodnocuje sa súlad všetkých mobilných zariadení. *SAR* Meranie vyžaduje elektrolyty, figuríny, špecializované laboratórne vybavenie a hodnotené zariadenie vysielajúce na maximálny výkon, zatiaľ čo robotická sonda hľadá *SAR* Vypočítané *SAR* suma sa potom porovná so zákonnými obmedzeniami [41].

2.2.2. Hustota dopadajúceho výkonu vo vzdialenom poli ($S_{vrátane}$) a hustota absorbovaného výkonu ($S_{brušné\ svaly}$)

Vzdialené pole je oblasť, kde sa elektromagnetické žiarenie správa približne ako šíriaca sa rovinná vlna [49]. V tejto oblasti sú zložky elektrického a magnetického poľa úzko prepojené, takže na odvodenie zodpovedajúcej hustoty výkonu možno použiť jednu veličinu poľa. Ako je znázornené na obrázku 1, zóna vzdialeného poľa začína vo vzdialenosti väčšej ako $2D^2/\lambda$ z vysielacej antény, kde *D* je najväčší rozmer antény a λ je vlnová dĺžka. Vzhľadom na nedostatok použiteľných frekvencií pod 6 GHz bolo pásmo milimetrových vĺn (mmWave) identifikované ako možné spektrum pre mobilnú komunikáciu 5G [50]. SAR sa bežne používa na posúdenie expozície pod 6 GHz, zatiaľ čo nad 6 GHz sa relevantné expozičné veličiny posúvajú smerom k metrikám založeným na hustote výkonu kvôli menšej hĺbke prenikania EMF do tela [8,33].



Obrázok 1. Polia elektromagnetického žiarenia.

Je dôležité rozlišovať medzi hustotou dopadajúceho výkonu a hustotou absorbovaného výkonu. Hustota dopadajúceho výkonu, $S_{\text{vrátane}}$, je merateľná referenčná veličina mimo tela a možno ju odvodiť z nerušenej RMS elektrického poľa vo vzduchu ako:

$$S_{\text{vrátane}} = V_{\text{RMS}} H_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{RMS}}^2}{Z_0} = \frac{V_{\text{RMS}}^2}{377}$$

kde $Z_0 \approx 377\,\Omega$ je vnútorná impedancia voľného priestoru [8]. Ekvivalentne, ak V_0 označuje vrcholovú amplitúdu sínusového elektrického poľa, časovo spriemerovaná hustota dopadajúceho výkonu je:

$$S_{\text{vrátane, priemer}} = \frac{V_0^2}{2Z_0}$$

Faktor 1/2 sa preto objaví pri použití špičkovej amplitúdy poľa, zatiaľ čo pri použití efektívnej hodnoty intenzity poľa je už zahrnutý.

Naproti tomu hustota absorbovaného výkonu, $S_{\text{brušné svaly}}$, je dozimetrická základná obmedzujúca veličina používaná v smerniciach ICNIRP 2020 pre frekvencie nad 6 GHz. Predstavuje výkon absorbovaný na jednotku plochy na povrchu tela, a preto priamo súvisí s ohrevom tkaniva viac ako s hustotou dopadajúceho výkonu. V ICNIRP 2020, lokálne $S_{\text{brušné svaly}}$ je spriemerovaná na štvorci 4 cm^2 plocha povrchu tela s dodatočným 1 cm^2 obmedzenie nad 30 GHz. Toto rozlíšenie je dôležité, pretože neskoršia tabuľka limitov expozície uvádza $S_{\text{brušné svaly}}$ ako základné obmedzenie, zatiaľ čo praktické merania v teréne často používajú $S_{\text{vrátane}}$ alebo intenzita elektrického poľa ako referenčné veličiny.

2.3. Pokyny na obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam

Základné obmedzenia sa vzťahujú na tieto úrovne expozície, ktoré súvisia s fyzikálnymi veličinami spojenými so zdravotnými problémami spôsobenými rádiofrekvenciou. Telesné teplo spôsobené elektromagnetickými políčkami musí byť udržiavané pod kontrolou a na bezpečnej úrovni. Je dôležité poznamenať, že súčasné predpisy o expozícii elektromagnetickým políčkam sú založené na obmedzení nárastu teploty vyvolaného absorpciou elektromagnetického poľa, a nie na priamej kontrole absolútnej teploty tkaniva. Z toho vyplýva, že hodnotenie súladu sa zameriava na expozičné veličiny, ktoré súvisia s ohrevom indukovaným rádiofrekvenciou, ako je SAR a hustota absorbovaného výkonu, a nie na konečnú teplotu tkaniva, ktorá závisí aj od faktorov, ako je teplota okolia, metabolizmus, prekrvenie a termoregulácia [8 Dospelí ľudia potrebujú expozície, ktorých výsledkom je priemerná dávka pre celé telo SAR približne 6 W kg^{-1} v celom frekvenčnom rozsahu 100 kHz až 6 GHz po dobu najmenej jednej hodiny za termoneutrálnych podmienok (28 °C, nahý, v pokoji), aby sa dosiahol nárast telesnej teploty o 1 °C. U detí je schopnosť odvádzať teplo zvyčajne väčšia ako u dospelých, preto potrebujú väčšiu SAR na dosiahnutie tohto zvýšenia teploty [51]. Vzhľadom na nedostatok údajov z meraní však ICNIRP zvolila opatrný prístup a stanovila úroveň expozície EMF na 4 W kg^{-1}.

v priemere za 30 minút, čo zodpovedá zvýšeniu telesnej teploty o 1 °C. ICNIRP*SAR*a obmedzenia expozície hustoty výkonu sú uvedené v tabuľke1.

Tabuľka 1.Základné obmedzenia pre vystavenie elektromagnetickému poľu od 100 kHz do 300 GHz podľa ICNIRP 2020. Intervaly priemerovania závisia od množstva expozície: priemerná hodnota SAR pre celé telo sa priemeruje počas 30 minút, zatiaľ čo lokálna hodnota SAR a hustota absorbovaného výkonu sa priemerujú počas 6 minút [8]. Tu „NA“ znamená, že sa neuplatňuje; hustota absorbovaného výkonu je špecifikovaná ako základné obmedzenie iba pre frekvencie nad 6 GHz, zatiaľ čo SAR sa používa pri frekvenciách do 6 GHz.

Scenár expozície	Frekvenčný rozsah	Celé telo Priemerná SAR (W kg^{-1})	Miestne Hlava/Trup SAR (W kg^{-1})	Lokálna končatina SAR (W kg)$^{-1}$)	Miestne$S_{\text{brušné svaly}}$ (W m^{-2})
Pracovné	100 kHz až 6 GHz	0,4	10	20	NA
	>6 až 300 GHz	0,4	NA	NA	100
Široká verejnosť	100 kHz až 6 GHz	0,08	2	4	NA
	>6 až 300 GHz	0,08	NA	NA	20

Štúdia navrhla limit wbaSAR 0,4 W kg^{-1}pre expozície na pracovisku a 0,08 W kg^{-1}pre verejné ožiarenie vo frekvenčnom spektre 10 MHz – 300 GHz (kam v podstate spadajú aj mobilné komunikačné zariadenia). Pre ožiarenie na pracovisku a verejné ožiarenie sa lokálna hodnota SAR pre hlavu/trup v súbore s frekvenciou 10 MHz – 6 GHz 10 W kg^{-1}a 2 W kg^{-1}a lokálny SAR končatiny v súprave s frekvenciou 10 MHz – 6 GHz a 20 W kg^{-1}a 4 W kg^{-1}, a obmedzenia hustoty výkonu boli stanovené pri 100 W m^{-2}a 20 W m^{-2}, v uvedenom poradí. Slovo „neuplatňuje sa“ (skrátene „NA“) znamená, že toto množstvo sa nezohľadňuje pri hodnotení súladu. Lokálna SAR by sa mala spriemerovať na 10 g kubickej hmotnosti. Lokálna hustota absorbovaného výkonu,$S_{\text{brušné svaly}}$, by sa malo spriemerovať na štvorci 4 cm^{2}plocha povrchu tela. Nad 30 GHz platí dodatočné lokálne obmedzenie, takže expozícia je spriemerovaná na štvorcový cm^{2}plocha povrchu tela nesmie presiahnuť dvojnásobok zodpovedajúcich 4 cm^{2}limit.

Smernice ICNIRP pre vystavenie elektromagnetickému žiareniu sú všeobecne uznávané na celom svete. Okrem smerníc ICNIRP niekoľko organizácií špecifikuje obmedzenia pre globálne (napr. IEEE) a konkrétne geografické oblasti (napr. Európska rada). USA a Japonsko, ktoré prijali smernice FCC, podobne regulujú referenčné úrovne [52]. Švajčiarsko využíva ICNIRP ako prvý limit pre celkové obmedzenia expozície pred pridaním ďalších vrstiev, ako sú napríklad limitné hodnoty inštalácií (ILV). Papier [53] zaviedla v rôznych krajinách rôzne predpisy.

3. Funkcie technológie 5G relevantné pre meranie EMF

Pre 5G boli obzvlášť významné tri aplikácie: vylepšené mobilné širokopásmové pripojenie, masívna komunikácia typu stroja (mMTC) a ultraspoľahlivá komunikácia s nízkou latenciou (URLLC) [54]. 5G ďalej rozvíja a využíva režim milimetrových vĺn (mmW) s nosnými frekvenciami v rozsahu od 30 do 300 GHz [30–32,55,56Preťaženie spektra, významná prekážka pri nižších/bunkových nosných frekvenciách, je menším problémom pri vyšších nosných frekvenciách kvôli dostupnosti rozsiahlych (buď nelicencovaných, alebo slabo licencovaných) šírení pásiem. Značné straty šírenia a tieňovania závislé od frekvencie sťažujú využitie týchto veľkých šírok pásiem (čo môže výrazne kompenzovať rezervu pripojenia). Obmedzením pokrytia na obmedzené oblasti a využitím krátkych vlnových dĺžok, ktoré umožňujú použitie viacerých antén v pevnej apertúre anténneho systému s využitím technológie lúčov, je možné tieto straty znížiť. Použitím týchto aplikácií poskytuje prehrávanie videa v reálnom čase a riadenie prevádzky s nízkou latenciou viac možností pre hry, priemysel a mnoho ďalších sektorov [21]. V tejto časti,

Budú predstavené charakteristiky súvisiace s meraním elektromagnetického poľa 5G vrátane nového spektra 5G, masívneho MIMO, tvarovania lúča, multikonektivity a flexibility siete.

3.1. Štruktúra novej rádiovej siete (NR) 5G

Táto časť načrtáva základné koncepty fyzickej vrstvy 5G NR, ktoré sú nevyhnutné pre hodnotenie vystavenia rádiofrekvenčnému žiareniu [21]. Technické požiadavky pre projekt partnerstva tretej generácie (3GPP) definujú dva frekvenčné rozsahy (FR) pre 5G [14,15,29]:

FR1: 450 MHz až 7,125 GHz, bežne označované ako sub-6 GHz; FR2: 24,25 GHz až 52,6 GHz, bežne označované ako milimetrové vlny. Pre 5G boli navrhnuté viaceré numerológie ortogonálneho frekvenčného multiplexovania (OFDM), ktoré môžu fungovať v pásmach od sub-1 GHz do milimetrových vĺn s konfigurovateľným numerologickým parametrom.μzaložené [14]. Vďaka svojej flexibilnej numerológii môže 5G NR poskytovať rôzne služby s rôznymi úrovňami latencie a kapacity, čo umožňuje správu služieb s nízkou latenciou, ako aj aplikácií s vysokým prenosom dát. Jeden z prvých výskumov rámca, ktorý poskytuje niekoľko služieb v rámci jedného rámca s využitím paradigmy multinumerológie a súbežného použitia multinumerológie, bol vykonaný v článku [57] a papier [4] skúmal multinumerologické štruktúry 5G NR.

Každý podrámec v štruktúre rámca 5G NR obsahuje 2μčasové sloty, aby sa vyhovelo širokej škále aplikácií a rozsiahlej dostupnosti spektra. V každom slote s veľkosťou 1/2 je zahrnutých 14 OFDM symbolov.μms (12 OFDM symbolov v prípade rozšíreného cyklického prefixu). Výsledkom je hodnotaμurčuje počet symbolov v každom podrámci, pričom väčšie μ hodnoty umožňujúce viac symbolov v danom podrámci s trvaním každého symbolu $(14 \cdot 2\mu)^{-1}$ ms [16].

Rôzne dĺžky medzi subnosnými vlnami OFDM zodpovedajú rôznym numerológiám. Konkrétne, rozostup subnosných vln je 2μ·15 kHz, sμ=0, 1, 2, 3, 4. V pásme pod 6 GHz (FR1) sa využíva rozstup subnosných frekvencií 15 kHz, 30 kHz a 60 kHz, zatiaľ čo v pásme milimetrových vĺn sa používajú frekvencie 60 kHz a 120 kHz (FR2). Nedátové (signálne) kanály majú namiesto toho rozstup 240 kHz. Je potrebné poznamenať, že 5G NR podporuje rozstup subnosných frekvencií 15 kHz, ktorý je rovnaký ako v LTE. Táto spoločná numerológia uľahčuje koexistenciu LTE a NR a zdieľanie spektra v prekrývajúcich sa frekvenčných pásmach, hoci tieto dva systémy zostávajú odlišnými technológiami rádiového prístupu s odlišnými fyzickými štruktúrami kanálov. Nosná frekvencia NR sa skladá až z 3276 subnosných frekvencií. Každá nosná frekvencia NR má maximálnu šírku pásma 100 MHz v pásme pod 6 GHz (FR1) a maximálnu šírku pásma 400 MHz v oblasti milimetrových vĺn (FR2). Obe tieto hodnoty sú výrazne vyššie ako limit šírky pásma LTE 20 MHz. 5G NR zahŕňa časť šírky pásma (BWP), ktorá pozostáva zo série súvislých blokov fyzických zdrojov (PRB) predstavujúcich určené percento frekvenčného rozsahu, v ktorom prebieha komunikácia s danou numerológiou, aby sa dalo súčasne spracovať viacero numerológií [15]. Numerológia každého BWP určuje dĺžku cyklického prefixu a vzdialenosť medzi subnosnými. Používateľské zariadenia (UE) v 5G musia monitorovať iba pridelené BWP, čo znižuje spotrebu energie UE v porovnaní s LTE, kde UE musia skenovať celú šírku pásma. Mriežka zdrojov (RG) je reprezentácia dostupných zdrojov rádiového prenosu v čase a frekvencii, pozostávajúca z jedného subrámca v časovej doméne a celej šírky pásma nosnej vo frekvenčnej doméne [57]. Vzhľadom na to, že 5G NR podporuje viacero numerológií, z ktorých každá má svoje vlastné rozšírenie skupiny zdrojov (RG), zavádza sa prvok zdroja (RE), najmenšia jednotka RG, aby sa objasnila štruktúra RG, ktorá je reprezentovaná jednou subnosnou vo frekvenčnej doméne a jedným symbolom OFDM v časovej doméne. RE sú zoskupené do PRB, ktoré sa skladajú z 12 po sebe idúcich subnosných, vo frekvenčnej doméne [14].

V 5G NR je UE synchronizované prostredníctvom bloku synchronizačného signálu (SSB) vysielaného základnou stanicou (BS), zatiaľ čo detekcia a dekódovanie riadiacich a synchronizačných signálov je veľmi užitočné a fascinujúce na posúdenie vystavenia EMF. Primárny synchronizačný signál (PSS), sekundárny synchronizačný signál (SSS), PBCH a referenčný signál demodulácie PBCH (PBCH-DMRS) sú štyri typy signálov, ktoré tvoria synchronizačný blok, ktorý zaberá 240 subnosných a štyri susediace symboly OFDM a vždy sa prenáša spoločne. V 5G NR sa PSS, SSS, PBCH a PBCH-DMRS prenášajú spoločne ako bloky SS/PBCH. Pre polrámec obsahujúci bloky SS/PBCH definuje 3GPP kandidátske umiestnenia blokov SS/PBCH podľa rozstupu subnosných SS/PBCH. Tieto prenášané bloky tvoria sadu SS-burst v rámci 5 ms polrámca a periodicitu SSB je možné nakonfigurovať na 5, 10, 20, 40, 80 alebo 160 ms [14,15,58].

Technická špecifikácia 3GPP definuje niekoľko prípadov blokových vzorov SS/PBCH, označených ako prípady A–E, ktoré špecifikujú rozostup subnosných a kandidátske umiestnenia blokov SS/PBCH v časovej doméne v rámci polrámca [15Napríklad prípad A zodpovedá rozstupu subnosných SSB 15 kHz a prípady B a C zodpovedajú rozstupu subnosných SSB 30 kHz, zatiaľ čo prípady D a E zodpovedajú rozstupu subnosných SSB 120 kHz a 240 kHz. Použiteľný prípad závisí od prevádzkového frekvenčného pásma a konfigurácie duplexného prenosu. Toto je relevantné pre meranie EMF, pretože vzor SSB určuje, kedy sa vysielajú referenčné signály, a preto ovplyvňuje detekciu SSB, priemerovanie v časovej doméne a extrapoláciu expozície na základe SSB [59].

V 5G NR sa používa tvarovanie lúča na prekonanie strát na ceste pri SSB a dátových prenosoch. Na sústredenie energie na špecifickú oblasť s cieľom zvýšiť SINR a prijímaný výkon sa používajú inteligentné anténne sústavy na vytváranie extrémne úzkych, ale vysoko ziskových lúčov. Extrémne úzke lúče môžu v dôsledku toho vytvoriť horúce miesta s vysokou intenzitou poľa. V závislosti od frekvencie sú SSB zoskupené do množín SSB burst, kde L označuje počet jednosmerných blokov (SSB). V príkladoch A, B a C (FR1), $L_{maximum}$ je buď 4, 8 alebo 64 SSB; v prípadoch D a E je to 64 SSB (FR2) [18 rokov]. SSB sa zhromažďujú a odosielajú ako SSB burst na realizáciu prvého rádiového prístupu UE. Prostredníctvom tvarovania lúča zodpovedá každý SSB odlišnému lúču, ktorý smeruje iným smerom v priestore. UE sa počas tohto počiatočného procesu zameria na lúč, ktorý poskytuje najsilnejší prijatý signál.

Pre merania maximálneho vyžarovania EMF existujú tri požiadavky na nájdenie cieľového signálu: signál by mal byť stále zapnutý, sekvencia signálu by mala byť známa a signál by mal byť tvarovaný podľa lúča. SSB spĺňa túto požiadavku a tento signál sa volí hlavne na meranie EMF. V závislosti od rozostupu subnosných sa šírka pásma synchronizačných signálových blokov pohybuje medzi 3,6 a 7,2 MHz. Celková šírka pásma nosnej 5G NR môže dosiahnuť 400 MHz. To si vyžaduje zavedenie dodatočného extrapolačného faktora, ktorý možno získať buď z konfiguračných údajov operátora, alebo odhadnúť pomocou mobilného zariadenia aktívne pripojeného k príslušnej sieti 5G NR.

3.2. Masívne MIMO

V 5G je jednou z kľúčových súčastí technológia Massive MIMO, ktorá sa považuje za viacpásmovú bunkovú sieť s viacerými bunkami využívajúcu režim časového delenia duplexu (TDD) [17]. Na dosiahnutie zosilnenia kanálov je na základňovej stanici nainštalovaných značné množstvo antén. Vyžaduje si to viac antén ako používateľské zariadenie (UE). Základná stanica používa SDMA na simultánnu komunikáciu s rôznymi UE v každej vzorke pomocou lineárneho kombinovania príjmu a lineárneho predkódovania vysielania, ktoré sa používa na spracovanie rušenia medzi spolupoužívateľmi v bunke priestorovým potlačením rušenia pomocou niekoľkých antén na základňovej stanici [20]. Môže výrazne znížiť vysielací výkon vybavením väčšieho počtu antén, čo vedie k obrovskému zníženiu úrovne vystavenia EMF. Na bunkových frekvenciách sa mmW signalizácia dramaticky líši od štandardných MIMO návrhov. Vyžaduje sa viacero rádiofrekvenčných (RF) reťazcov.

pre signalizáciu vyššej úrovne, ktorá sa ľahšie implementuje pri nižších nosných frekvenciách ako v mmW doméne. V dôsledku toho rastie záujem o dozvedieť sa viac o potenciáli nízko komplexných techník v mmW, ako je napríklad tvarovanie lúča (ktoré vyžaduje iba jeden RF reťazec) [60–62]. Zlepšená rozlíšiteľnosť viaccestného signálu pri mmW frekvenciách je spôsobená vyššími rozmermi antény a výrazne väčšími šírkami pásma. MIMO kanál je preto v mmW režime svojou povahou riedkejší ako pri bunkových frekvenciách [63,64].

Zatiaľ čo konvenčné masívne MIMO predpokladá spoločne umiestnenú anténnu sústavu na jednej základňovej stanici, vznikajúce ultrahusté architektúry, ako napríklad distribuované/bezbunkové masívne MIMO, sa spoliehajú na mnoho geograficky oddelených prístupových bodov (AP), ktoré spoločne obsluhujú používateľské zariadenia prostredníctvom koordinovaného predkódovania a dynamického prepojenia AP a UE [65]. Tento vývoj má priame dôsledky pre hodnotenie elektromagnetických polí. Najmä expozícia na danom mieste už nemusí byť dominantne ovplyvnená jedným sektorom, ale môže zahŕňať agregované príspevky z viacerých koordinovaných vysielačov. V dôsledku toho môžu meracie kampane a hodnotenie zhody založené na extrapolácii musieť zohľadniť (i) priestorovú superpozíciu polí z viacerých prístupových bodov (AP) a (ii) časovo premenlivé rozhodnutia o asociácii/predkódovaní, ktoré menia okamžité rozloženie expozície [65].

Časovo delené multiplexovanie synchronizuje plne duplexný prenos cez polovičný duplexný komunikačný kanál, aby sa oddelili signály smerom nahor a nadol. Ak nie sú rýchlosti prenosu dát smerom nahor a nadol rovnaké, táto stratégia je veľmi výhodná. TDD rozdeľuje dátový tok do rámcov a poskytuje alternatívne časové úseky pre prenos dopredu a dozadu, čo im umožňuje zdieľať rovnaké prenosové médium [66Pri použití TDD má vzťah medzi uplinkom a downlinkom veľký vplyv na to, koľko energie gNodeB vyžaruje. Vyžarovaný výkon sa znižuje, ak je pre uplink vyhradených viac slotov. Faktor relácie určuje konfigurácia siete, ktorú je potrebné získať od sieťových operátorov. Výnimkou sú siete NSA, kde sa nosná frekvencia 5G NR môže používať iba pre downlink.

3.3. Tvarovanie lúča

Vzhľadom na povahu rádiofrekvenčných vĺn, keď sa používajú nízke a stredné frekvencie, signál sa môže prenášať vo všetkých smeroch alebo v relatívne širokých uhloch na veľké vzdialenosti. Pri použití veľmi vysokých frekvencií však nie je veľa možností, s výnimkou technológií lúčov využívajúcich obrovské anténne pole. Obrovský pokrok od 4G po 5G je tiež možný vďaka aktívnym anténam, ktoré umožňujú operátorom maximalizovať efektivitu ich neoceniteľných frekvenčných zdrojov na zvýšenie kapacity siete. To poskytuje efektívnu anténnu technológiu, formovanie lúča. Táto technika dokáže generovať viacero radiačných prvkov vysielajúcich rovnaký signál s použitím rovnakej vlnovej dĺžky a fázy [67]. Prenášaný signál tak môže tvoriť dlhší, cielenejší prúd v konkrétnom smere, kde je rušenie prijímané cieľovým signálom výrazne znížené v porovnaní s inými signálmi. Potom je možné prostredníctvom zosilnenia tvarovania lúča kompenzovať podstatný útlm signálu v mmW pásmach, aby sa podporila ultradátová efektivita [56]. Táto technika môže výrazne ovplyvniť techniku extrapolácie. Keďže prevádzkové údaje je možné prenášať pomocou špecifického vzoru s väčším ziskom ako pri SSB lúčoch, prijatý výkon už nemožno použiť ako referenčnú hodnotu pre najvyššiu úroveň výkonu, ktorú je možné prijať [22].

Tento druh masívneho anténneho poľa by produkoval lúč žiarenia, čo veľmi sťažuje pokrytie viacerých UE v jednom prenose, pokiaľ tieto viaceré UE nie sú umiestnené veľmi blízko seba. Na vyriešenie tohto problému je potrebná veľmi sofistikovaná stratégia riadenia alebo kontroly lúča, ktorá by pokryla množstvo zariadení rozmiestnených vo všetkých smeroch. Stratégia riadenia/kontroly by sa mala líšiť v závislosti od okolností a jednou z takýchto stratégií je prepínanie lúča [68].

Tieto aktívne antény môžu v priebehu času meniť tvar a smer lúča a už nie sú obmedzené na konkrétny vyžarovací diagram. Preto sú 5G základňové stanice schopné syntetizovať a dynamicky prekonfigurovať viacero zdrojov lúča smerujúcich rôznymi smermi na základe elektromagnetického prostredia [47]. Aby sa nadviazalo spojenie s okolitými UE, synchronizačné signálové bloky (SSB), z ktorých každý pozostáva zo štyroch OFDM symbolov, sa odosielajú rôznymi smermi v rôznych časoch. Toto smerové vyhľadávanie pridáva do siete veľkú latenciu, čím znižuje priepustnosť a spektrálnu účinnosť [69].

Každý lúč v 5G je prepojený s prenosom SSB (v príklade v rozsahu od SSB1 do SSB6). Hoci je vyžarovací diagram statický, úroveň prijatého výkonu referenčného signálu špecifického pre bunku (CRS) je v priebehu času takmer konzistentná, vďaka čomu je vysielací signál užitočnou referenciou na meranie úrovne expozície EMF [70]—zatiaľ čo v 5G, kvôli beamweepingu, prijímaný výkon referenčného signálu nezostane v priebehu času konštantný. Tiež v porovnaní s SSB lúčmi majú dátovo špecifické lúče výrazne menšiu šírku lúča a väčší výkon na zvýšenie SINR. Potrebné informácie je potrebné získať od správcov siete alebo poskytovateľov infraštruktúry. Metóda extrapolácie pre 5G signály si vyžaduje ďalšie zváženie s ohľadom na nový správny faktor. Detekcia sa vykoná pomocou vektorového analyzátora signálu, ktorý dokáže poskytnúť presnú identifikáciu SSB aj vtedy, keď informácie odosielajú RE, ktoré sa nachádzajú v rovnakých časových slotoch ako SSB.

4. Metódy merania 5G EMF

Táto časť skúma hlavné metódy používané na meranie a hodnotenie expozície v sieti 5G EMF. Existujúce metódy možno klasifikovať podľa dvoch súvisiacich kritérií: po prvé, typ signálu alebo informácií použitých na meranie a po druhé, podmienky expozície, ktoré sa metóda snaží odhadnúť. Z hľadiska signálu sa hodnotenie EMF v sieti 5G bežne spolieha na frekvenčne selektívne merania, kódovo selektívne merania alebo merania založené na referenčnom signále a prístupy založené na sieťových informáciách. Z hľadiska hodnotenia expozície možno tieto metódy použiť buď na vyhodnotenie skutočnej expozície za skutočných podmienok zaťaženia siete, alebo na extrapoláciu maximálnej expozície za definovaných najhorších podmienok.

Táto taxonómia je užitočná, pretože rôzne metódy merania neposkytujú rovnaký typ informácií o expozícii. Frekvenčne selektívne merania poskytujú úrovne širokopásmového alebo kanálového poľa, ale nedokážu vždy oddeliť jednotlivé bunky alebo lúče. Kódselektívne metódy a metódy založené na referenčných signáloch dokážu identifikovať špecifické synchronizačné signály 5G, ako napríklad SSB alebo PBCH-DMRS, ale na odhad maximálnej expozície vyžadujú extrapolačné faktory. Prístupy založené na sieťových počítadlách môžu poskytnúť informácie o realistickom zaťažení prevádzky a časovej variabilite, ale zvyčajne vyžadujú informácie na strane operátora a nezávislé meracie kampane ich menej ľahko reprodukujú.

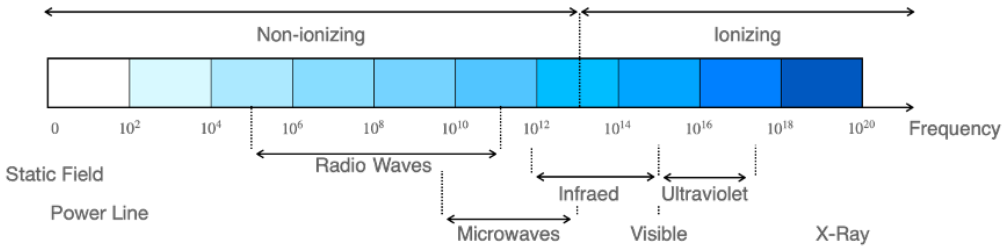
Na usporiadanie rôznych prístupov používaných v literatúre je uvedená tabuľka2 klasifikuje metódy merania 5G EMF do piatich kategórií: frekvenčne selektívne meranie, kódovo selektívne meranie, meranie skutočnej expozície, extrapolácia maximálnej expozície a hodnotenie založené na sieťovom počítadle. Táto klasifikácia rozdeľuje metódy podľa toho, čo sa meria priamo, aký typ získanej expozičnej veličiny a aká zostáva neistota alebo praktické obmedzenie. Tabuľka tak poskytuje štruktúru pre nasledujúce podsekcie a objasňuje rozdiel medzi metódami, ktoré merajú skutočné úrovne polí, a metódami, ktoré odhadujú maximálnu expozíciu prostredníctvom extrapolácie.

Podľa obrázku2, Elektromagnetické žiarenie sa delí na ionizujúce a neionizujúce žiarenie [71]. Ionizujúce žiarenie je elektromagnetické (EM) žiarenie s dostatočnou energiou na vytesnenie pevne spojených elektrónov z obežnej dráhy atómu, čím atóm zostane nabitý alebo ionizovaný a schopný generovať chemické zmeny prerušením chemických väzieb. Živé tkanivo môže byť v dôsledku tohto nárazu fyzicky poškodené. Atómy nemôžu byť ionizované

neionizujúce žiarenie kvôli jeho nedostatočnej energii. Statické polia, magnetické polia vytvárané elektrickými vedeniami a spotrebičmi, rádiové vlny, mikrovlny, infračervené žiarenie a viditeľné svetlo sú príkladmi nízkofrekvenčného až strednofrekvenčného elektromagnetického žiarenia. V elektromagnetickom spektre je toto elektromagnetické žiarenie kategorizované ako neionizujúce žiarenie a neexistuje žiadny dôkaz o tom, že by priamo poškodzovalo DNA alebo bunky [8,72]. Napriek tomu má dostatočnú energiu na excitáciu elektrónov, čo spôsobí ich dosiahnutie vyššieho energetického stavu. Tento výskum sa zameriava na neionizujúce žiarenie, ktoré zahŕňa aj rádiofrekvenčné (RF) vlny.

Tabuľka 2. Techniky merania a ciele hodnotenia expozície pri hodnotení elektromagnetických polí 5G.

Kategória	Hlavný základ merania	Typická expozícia Cieľ	Hlavné obmedzenie
Frekvenčne selektívny meranie	Úroveň poľa vo vybranom frekvenčnom pásme alebo kanáli	Bežne používané pre skutočná expozícia alebo posúdenie na úrovni kanála	Obmedzená schopnosť rozlišovať jednotlivé bunky, lúče alebo referenčné signály v viacoperátorový a viacbunkové prostredia.
Selektívny pre kód meranie	Bunkovo-špecifické alebo signálovo-špecifické komponenty, ako napríklad SSB alebo PBCH-DMRS	Bežne používaný ako základ pre maximálnu-extrapolácia expozície	Vyžaduje správne dekódovanie signálu a ďalšie extrapolačné faktory na odhad maximálna expozícia.
Sieťový počítadlo-založené na hodnotení	Počítadlá na strane operátora, konfiguračné údaje a dopravné informácie	Časovo premenlivé, štatistické alebo realistické posúdenie expozície	Vyžaduje prístup k informáciám operátora a môže byť ťažké ho reprodukovať samostatne.
Skutočný/skutočný posúdenie expozície	Nameraná úroveň poľa pri skutočnom zaťažení siete podmienky, často získané pomocou frekvenčne selektívnych alebo širokopásmových meraní	Realistická expozícia v čase merania	Silne závislé od zaťaženia prenosovou sieťou, času merania, aktivity TDD, smeru lúča a stavu plánovania siete.
Maximálna expozícia extrapolácia	Nameraný referenčný signál, bežne získaný pomocou kódovo-selektívnych meraní, škálovaný na definované maximálne prenosové podmienky	Konzervatívny alebo najhorší prípad odhad expozície	Citlivé na predpoklady týkajúce sa šírky pásma, pracovného cyklu TDD, zisku lúča a konfigurácia dopravného lúča.



Obrázok 2. Elektromagnetické spektrum.

4.1. Postupy meraní na mieste

Merania elektromagnetického poľa na mieste sa bežne delia na frekvenčne selektívne a kódovo selektívne postupy, pričom každý z nich má rôzne výhody a obmedzenia [73]. Frekvenčne selektívne merania hodnotia úroveň poľa vo vybranom frekvenčnom pásme alebo kanáli a sú užitočné na posúdenie celkovej expozície alebo expozície na úrovni kanála. Kódovo selektívne merania naopak dekódujú alebo identifikujú zložky špecifické pre signál, a preto môžu priradiť namerané emisie ku konkrétnym bunkám, sektorom alebo referenčným signálom. Toto rozlíšenie je obzvlášť dôležité v 5G, kde sa merania založené na SSB alebo PBCH-DMRS často používajú ako základ pre extrapoláciu maximálnej expozície.

4.1.1. Frekvenčne selektívne merania

Pri frekvenčne selektívnych meracích postupoch sa merania výkonového spektra používajú na vyhodnotenie úrovne prijatého poľa vo vybranom frekvenčnom pásme alebo kanáli [74]. Na rozdiel od kódovo-selektívneho prístupu nie sú prijaté signály ani dekódované, ani priradené žiadnej konkrétnej technológii, operátorovi alebo bunke. Preto nie sú signálovo-špecifické komponenty, ako sú jednotlivé bunky, lúče alebo referenčné signály, samostatne identifikované. Frekvenčne-selektívna technika sa najviac približuje k určeniu celkového prijímaného výkonu v danom mieste [73,74]. Okrem toho je tento typ merania obzvlášť užitočný pri meraniach aktuálnej expozície. Nasledujúce praktické úvahy však robia túto metódu menej vhodnou na určenie maximálnej expozície ako merania selektívne na základe kódu.

Výkonové spektrá širokopásmových nosičov sa môžu časom rýchlo meniť. Hoci je možné použiť merania spektra založené na obálke, praktická implementácia sa stáva náročnejšou, keď je potrebná izotropná anténa [75]. Všesmerová izotropná anténa dokáže zhromažďovať elektromagnetickú energiu vo všetkých polarizáciách. Merací systém môže riadiť anténu alebo prijímač tak, aby postupne meral rôzne polarizácie. Prepínanie alebo postupné meranie rôznych polarizácií však zavádza časové oneskorenie. V závislosti od zaťaženia článku a iných okolností sa výkonové spektrum môže počas tohto času meniť o 5 alebo 10 dB.

Samotné meracie prijímače sú ďalším faktorom. Vo väčšine prípadov sú prijímače schopné zachytiť iba obmedzenú šírku pásma, zvyčajne 20 alebo 40 MHz [75], v jednom meraní. Ak šírka pásma signálu prekročí tento rozsah, prijímač musí preladiť svoj vstup a postupne merať rôzne frekvenčné segmenty. Keďže výkonové spektrum sa v priebehu času neustále mení v dôsledku zmien prevádzky, úniku signálu a iných efektov kanála, tieto segmenty sa nezískavajú súčasne. V dôsledku toho rekonštruované prijaté výkonové spektrum nemusí zachytiť skutočné okamžité maximum v celej šírke pásma.

4.1.2. Merania selektívne podľa kódu

Pri meraniach EMF s kódovou selekciou analyzuje merací prijímač SSB a dekóduje synchronizačné a referenčné signály špecifické pre bunku a v niektorých prípadoch aj informácie týkajúce sa operátora. Konkrétna bunka, nosná vlna a pásmo teda môžu byť priradené k prijatému výkonu. Synchronizačné a referenčné signály sú tiež dôležitými meracími kotvami, pretože umožňujú priradiť úroveň prijatého poľa ku špecifickým bunkám, fyzickým identitám buniek (PCI) a SSB [13].

Počas kódovo-selektívneho merania na určenie maximálneho prijímaného výkonu v určitej zóne alebo miestnosti sa anténa často otáča [75]. Táto rotácia sa používa na vyhľadávanie smeru, polarizácie alebo orientácie antény, ktorá produkuje najvyššiu prijatú úroveň. V systémoch 5G s rozptylom lúča a časovo premenlivými prevádzkovými lúčmi však môže namerané maximum stále závisieť od trvania merania a načasovania vysielaných SSB lúčov.

Stredná frekvencia nosnej frekvencie je často automaticky identifikovaná kódovo-selektívnymi meracími prijímačmi, ktoré merajú vopred definované zložky signálu a dokážu rozlíšiť požadovaný referenčný signál od šumu a iných emisií. Tieto prijímače poskytujú jednu meranú hodnotu, ako napríklad SS-RSRP, na PCI alebo SSB, čo je lepšie zvládnuteľné a konzistentné pri snahe o maximum. Možno pozorovať aj nosné frekvencie, PCI a SSB, ktoré prispievajú k celkovému prijímanému výkonu a intenzite poľa.

V porovnaní s frekvenčne selektívnym meraním je hlavnou výhodou kódelektívneho merania to, že poskytuje informácie špecifické pre bunku alebo SSB. Vďaka tomu je vhodnejšie ako východiskový bod pre extrapoláciu maximálnej expozície v 5G NR.

Nameraná úroveň SSB alebo PBCH-DMRS však priamo nepredstavuje maximálnu expozíciu z prevádzkových lúčov špecifických pre používateľa. Na zohľadnenie plnej šírky pásma nosnej frekvencie, pracovného cyklu downlinku TDD a rozdielov medzi lúčmi SSB a dátovými lúčmi je stále potrebná ďalšia extrapolácia.

4.2. Posúdenie skutočnej expozície

Posúdenie skutočnej expozície sa vzťahuje na meranie úrovní elektromagnetického poľa za reálnych prevádzkových podmienok siete v čase merania. V tejto súvislosti môže „skutočná“ expozícia zahŕňať buď okamžité hodnoty intenzity poľa, alebo časovo spriemerované merania počas stanoveného intervalu pozorovania. Nameraná úroveň poľa odráža príspevok skutočnej aktivity siete vrátane zaťaženia prevádzkou, rozhodnutí o plánovaní, aktivity downlinku TDD, smeru lúča a podmienok šírenia [19,20]. Preto sú skutočné merania expozície užitočné na vyhodnotenie realistických úrovní expozície vo verejne prístupných oblastiach a na porovnanie nameraných hodnôt s regulačnými referenčnými úrovňami za normálnych prevádzkových podmienok [8].

Posúdenie sa vykonáva priamym meraním intenzity elektrického poľa vo vybraných pozorovacích bodoch, zatiaľ čo sieť 5G pracuje normálne. Pri typickom postupe sa najprv vyberie miesto merania, identifikuje sa príslušný nosič alebo frekvenčné pásmo 5G a na zaznamenanie efektivnej hodnoty (RMS) intenzity elektrického poľa sa použije kalibrovaný širokopásmový alebo frekvenčne selektívny merací systém. Širokopásmové merania poskytujú celkovú úroveň poľa v širokom frekvenčnom rozsahu, zatiaľ čo frekvenčne selektívne merania umožňujú oddeliť príspevok konkrétneho nosiča alebo pásma 5G od iných rádiových zdrojov. Nameraná efektivna hodnota intenzity poľa sa potom spriemeruje počas požadovaného intervalu merania a porovná sa s príslušnou referenčnou úrovňou expozície. V podmienkach vzdialeného poľa možno nameranú intenzitu elektrického poľa vyjadriť aj ako hustotu dopadajúceho výkonu pomocou vzťahu uvedeného v časti2.

Skutočné merania expozície však nemusia nevyhnutne predstavovať maximálnu expozíciu, ktorá by mohla nastať pri plnom zaťažení alebo v najhorších prenosových podmienkach. Toto obmedzenie je obzvlášť dôležité pre 5G NR, pretože úroveň prenášaného poľa sa môže výrazne líšiť v závislosti od rozloženia používateľov, tvarovania lúča, dopytu po prevádzke a konfigurácie siete [20,21]. V dôsledku toho je hodnotenie skutočnej expozície vo všeobecnosti vhodné na charakterizáciu expozície v reálnom čase alebo typickej expozície, ale treba ho odlišovať od extrapolácie maximálnej expozície, ktorej cieľom je odhadnúť najvyššiu úroveň poľa, ktorá sa môže vyskytnúť za definovaných konzervatívnych predpokladov [19–21].

4.3. Extrapolácia maximálnej expozície

Cieľom extrapolácie maximálnej expozície je odhadnúť úroveň EMF, ktorá by sa mohla vyskytnúť za definovaných najhorších alebo konzervatívnych podmienok prenosu, a nie za skutočných podmienok zaťaženia siete v čase merania. V 5G NR sa to bežne vykonáva meraním referenčného signálu, ako je SSB alebo PBCH-DMRS, a následným použitím extrapolačných faktorov na odhad maximálnej úrovne poľa spojenej s prenosom v plnej šírke pásma, aktivitou downlinku TDD a konfiguráciou formovania lúča [19–21].

Tvarovanie lúča je kľúčovým dôvodom, prečo je extrapolácia v 5G zložitejšia ako v predchádzajúcich bunkových systémoch. Prevádzkové lúče špecifické pre UE môžu mať odlišný zisk, šírku lúča alebo alokáciu výkonu od vysielaných lúčov SSB meraných pasívnym kalibrovaným prijímačom. Preto nemožno predpokladať, že nameraná úroveň SSB predstavuje maximálnu expozíciu produkovanú prenosom dát. Je potrebné zvážiť posun lúča/zisku medzi lúčmi SSB a dátovými lúčmi a príslušné informácie môže byť potrebné získať od prevádzkovateľov sietí alebo poskytovateľov infraštruktúry [20,21].

Ďalším dôležitým faktorom je konfigurácia uplinku a downlinku TDD. V systémoch TDD gNodeB neprenáša nepretržite vo všetkých časových slotoch a vyžarovaný výkon závisí od zlomku času prideleného na downlink prenos. Keď je nakonfigurovaných viac uplink slotov, časovo priemerná expozícia downlinku zo strany BS sa znižuje. Preto je pri extrapolácii z nameranej úrovne referenčného signálu na maximálnu expozíciu potrebný faktor pracovného cyklu TDD. Tento faktor závisí od konfigurácie siete a môže sa líšiť medzi nasadeniami, operátormi a prevádzkovými scenármi [19,20].

Na premietnutie nameranej úrovne SSB alebo PBCH-DMRS do plnej šírky pásma nosnej 5G NR je potrebný ďalší extrapolačný faktor. SSB zaberá iba obmedzenú šírku pásma, ktorá závisí od rozostupu subnosných SSB, zatiaľ čo celková šírka pásma nosnej 5G NR môže byť podstatne väčšia. V dôsledku toho musí byť nameraná úroveň referenčného signálu škálovaná tak, aby zohľadnila šírku pásma, ktorá by mohla byť obsadená za podmienok maximálneho prenosu. Túto extrapoláciu šírky pásma je možné získať z informácií o konfigurácii siete alebo odhadnúť pomocou vhodného meracieho zariadenia a aktívneho predplatného 5G NR [14,19,20].

Maximálna úroveň poľa je znázornená ako $V_{maximum\ 5G}$ v [V/m] v bode merania.
V praxi ide o úroveň expozície zo signálu vysielaného s maximálnym výkonom zo základnej stanice 5G a koncentrovaného ako jeden lúč trvajúci nepretržitý čas. Táto situácia však nie je realistická, že základná stanica obsluhuje iba jedno používateľské zariadenie nepretržite 6 minút, zatiaľ čo ostatní používatelia sú v pohotovosti. Táto veličina sa používa hlavne ako referencia v porovnaní s odhadom. Maximálna úroveň EMF v danej polohe sa určuje ako:

$$V_{maximum\ 5G} = \sqrt{N_{SC} F_{Horná\ úvrat} V_{maximum\ RE}}$$

Pre každý daný signál, celkový počet subnosných, označený ako N_{SC}, sa rovná 12-násobku počtu blokov zdrojov N_{RB} (RB). Okrem šírky pásma signálu B., numerológia μ je tiež faktorom pri určovaní tohto parametra. Pri použití multiplexovania TDD je deterministický škálovací faktor $F_{Horná\ úvrat}$ predstavuje pracovný cyklus signálu a $V_{maximum\ RE}$ predstavuje maximálnu úroveň EMF, aká kedy bola zaznamenaná pre jeden prvok zdroja [20].

Deterministický škálovací faktor ($F_{Horná\ úvrat}$), ktorý odráža pracovný cyklus signálu, sa môže použiť na vyhodnotenie vplyvu technológie TDD na celkový prenášaný (a detekovaný) výkon. Regulačné orgány kladú dôraz na vyhodnotenie na mieste $F_{Horná\ úvrat}$ hodnota pre generický 5G signál, ktorá je definovaná ako:

$$F_{Horná\ úvrat} = \frac{N_{downlink\text{-}pixel}}{N_{celkový\ pixel}}$$

$N_{downlink\text{-}pixel}$ je počet pixelov, ktoré sú „zapnuté“ a $N_{celkový\ pixel}$ je celkový počet pixelov, ktoré analyzátor poskytuje. Aby sa rozlíšili symboly downlinku a uplinku, pixel môže byť označený ako „zapnutý“, ak jeho výkon prekročí určitú prahovú hodnotu. Na získanie informácií môžete nájsť dôkladnejšiu konfiguráciu. $F_{Horná\ úvrat}$ v [21 Ako už bolo uvedené, rozmietanie lúča spôsobuje zmenu úrovne EMF pre každý SSB v závislosti od relatívneho smeru lúča SSB a prijímacej antény.

Demodulačný referenčný signál PBCH (PBCH-DMRS) je vysielací kanál na synchronizáciu extrapolačných metodík 4G a 5G. Na priame meranie signálu PBCH-DMRS, čo je jeden z najdôležitejších aspektov v NR, je možné použiť moderné vektorové spektrálne analyzátory (VSA) s demodulačným softvérom alebo sieťové skenery. $V_{maximum\ RE}$ možno určiť ako:

$$V_{maximum\ RE} = \langle V_{RE\ PBCH-DMRS} \rangle \sqrt{\frac{F_{lúč}}{R}}$$

$\langle V_{RE\ PBCH-DMRS} \rangle$ predstavuje priemernú prijatú úroveň pre PBCH-DMRS v každom RE; $F_{lúč}$ je parameter, ktorý zohľadňuje vplyv zosilnenia dopravných lúčov v

úmerne maximálnej úrovni EMF prijatej z pilotného kanála v dôsledku formovania lúča a rozptylu lúča. R je pomer medzi výkonom najsilnejšieho jednosmerného signálu (SSB) v dávke a priemernou detekovanou silou všetkých SSB v dávke. Tento parameter umožňuje presný odhad maximálnej prijatej úrovne EMF pre jeden RE v PBCH-DMRS, pričom sa zohľadňuje priame meranie vplyvu rozptylu lúča na úroveň EMF prijatú pre všetky SSB v dávke, počnúc priamym hodnotenie $\langle V_{RE\ PBCH-DMRS} \rangle$.

$\langle V_{RE\ PBCH-DMRS} \rangle$ je možné získať formulár $V_{RE,maximum\ PBCH-DMRS}$ čo je maximum prijatého úroveň pre PBCH-DMRS v každom RE. $V_{RE,maximum\ PBCH-DMRS}$ možno vypočítať pomocou konvenčných Vzorce založené na najvyššom výkone PBCH-DBRS spojenom s najsilnejším SSB a pochopenie strát výkonu spôsobených spojením medzi anténou a meracím zariadením (anténny faktor alebo AF) sú nevyhnutné pre presné testovanie v teréne. podrobnejšie nastavenie na získanie $V_{RE,maximum\ PBCH-DMRS}$ možno nájsť v [21].

$F_{lúč}$ je najdôležitejším faktorom, ktorým je pomer medzi maximálnym výkonom PDSCH na RE a maximálnym výkonom SSB na RE. Numerické simulácie sú jednou z metód odhadu $F_{lúč}$, „Obálkový vzor" alebo hranice súboru vzorov, ktoré môže vysielať anténa s usmerňovaním lúča, je typickým spôsobom definovania charakteristík antény. V technológii 5G sa používajú viaclúčové a lúčovo vodiace antény. V dôsledku toho, $F_{lúč}$ možno vypočítať ako pomer úrovne poľa vyžarovaného v meracej polohe dátovým vzorom a signálovým vzorom. Napriek zdanlivej jednoduchosti má táto technika závažné nedostatky, ktoré vedú k značnej neistote. Prostredníctvom ďalšej simulácie sa určil pomer medzi hodnotami polí a polohou prijímača počas šírenia vo voľnom priestore pre $F_{lúč}$ sa môže dramaticky zmeniť. Oveľa zložitejšia simulácia nastane, keď sa zohľadnia skutočné faktory. Zatiaľ čo prenos používateľských dát pre rádiové spojenia s rozptylovými objektmi využíva konfiguráciu poľa, ktorá je závislá od prostredia a ťažko predvídateľná, na prenos SSB sa používa viacero lúčových vzorov s pevným tvarom. Ďalšie problémy existujú s komunikáciou MIMO, kde zisk antény nie je ani správne definovaný. Aproximácie v modeli šírenia sú tiež neisté kvôli neúplnej znalosti parametrov prostredia. Použitie $F_{lúč}$ Hodnota z numerických simulácií ovplyvňuje konečnú neistotu očakávanej úrovne poľa, čím sa dosahuje rovnaký stupeň spoľahlivosti ako priamy odhad úrovne poľa pomocou počítačových simulácií [20].

Aby sa predišlo vyššie uvedeným problémom, je potrebné nasmerovať dátový lúč smerom k meracej polohe a použiť meranie s nulovým rozsahom s 1 MHz RBW so stredom na stredovej frekvencii SSB na určenie rozdielu v dB medzi najvyšším vrcholom SSB a PDSCH spojeným s UE umiestneným na úrovni meracej polohy [19]. Pomer sa rovná $F_{lúč}$ ak majú PDSCH a SSB rovnakú numerológiu; inak sa musí použiť faktor škálovania. Pri zohľadnení masívneho MIIMO sa antény s obrovským počtom prvkov nazývajú masívne MIMO. V dôsledku toho je jediným rozdielom medzi „štandardnými" anténami z „fyzikálneho" hľadiska obrovské rozšírenie súboru polí, ktoré je možné vyžarovať. Táto zvýšená flexibilita ponúka ďalšie možnosti spracovania signálu, ale len málo ovplyvňuje všeobecné pozorovania týkajúce sa SU-MIMO a MU-MIMO.

4.4. Prístupy založené na sieťovom počítadle a monitorovaní

Prístupy založené na sieťových počítadlách a monitorovaní odhadujú vystavenie elektromagnetickým poliam kombináciou nameraných údajov s informáciami získanými z mobilnej siete, ako sú počítadlá prevádzky, využitie zdrojov downlinku, indikátory vysielacieho výkonu, konfigurácia antény a časovo závislé štatistiky zaťaženia. Na rozdiel od krátkodobých bodových meraní tieto prístupy dokážu charakterizovať časovú zmenu expozície počas dlhších období a

môže poskytnúť realistickejší opis toho, ako sa emisie BS menia v závislosti od dopytu používateľov, plánovania a prevádzky siete [23,24].

Hlavnou výhodou hodnotenia založeného na sieťovom počítadle je, že dokáže prepojiť odhady expozície so skutočnou aktivitou siete. Toto je obzvlášť dôležité pre 5G NR, pretože úroveň vyžarovaného poľa závisí od dynamických faktorov, ako je aktivita downlinku TDD, zaťaženie prevádzky, tvarovanie lúča a alokácia zdrojov. Preto môžu prístupy s protihodnotou dopĺňať merania na mieste poskytovaním informácií o tom, či nameraný stav zodpovedá prevádzke s nízkym, typickým alebo vysokým zaťažením. Môžu tiež podporiť štatistické hodnotenie expozície, kde sa expozícia hodnotí v priebehu času, a nie v jednom okamihu merania [23,27].

Tieto metódy však majú dôležité praktické obmedzenia. Sieťové počítadlá a konfiguračné parametre sú zvyčajne dostupné iba prevádzkovateľom alebo dodávateľom infraštruktúry, čo sťažuje nezávislé overenie. Okrem toho môže prevod z indikátorov na strane siete na expozičné veličiny závisieť od proprietárnych implementačných detailov, anténnych diagramov, stratégií riadenia lúčov a podmienok šírenia špecifických pre dané miesto. V dôsledku toho sú prístupy založené na sieťových počítadlách užitočné pre dlhodobé a realistické hodnotenie expozície, ale mali by sa interpretovať spolu s transparentnými postupmi merania a analýzou neistoty.

4.5. Porovnávací prehľad reprezentatívnych štúdií meraní 5G EMF

Vyššie uvedené metódy merania boli použité v rôznych typoch štúdií 5G EMF vrátane kontrolovaných meracích postupov, terénnych kampaní v komerčných sieťach, hodnotení založených na sieťových počítadlách a prieskumov verejnej zhody. Tieto štúdie však nie sú priamo porovnateľné, pokiaľ sa ich scenár merania, cieľ expozície, dopravné podmienky a stratégia extrapolácie neposudzujú spoločne.

Celkovo štúdie terénnych meraní a správy z verejných meraní uvedené v tabuľke3vo všeobecnosti uvádzajú úrovne expozície EMF v sieti 5G pod príslušnými medzinárodnými limitmi expozície v skúmaných scenároch. Napríklad Ofcom meral úrovne EMF na 22 miestach v blízkosti základňových staníc mobilných telefónov s podporou 5G v Spojenom kráľovstve a uviedol, že najvyššia priemerná úroveň expozície vo všetkých pásmach bola približne 1,5 % príslušnej referenčnej úrovne ICNIRP, zatiaľ čo najvyššia hodnota pozorovaná vo frekvenčnom pásme 5G bola iba 0,039 % referenčnej úrovne [25]. Metodologické zameranie recenzovaných štúdií sa však líši. Verejné terénne prieskumy, ako napríklad Ofcom, a správy operátorov, ako napríklad Telstra, charakterizujú najmä skutočnú expozíciu za vybraných reálnych podmienok nasadenia, zatiaľ čo štúdie, ako napríklad Franci a kol., sa zameriavajú na extrapoláciu maximálnej expozície z referenčných signálov 5G. Štúdie založené na sieťových protiľahlostiach poskytujú realistickejší opis časovej zmeny expozície, ale sú menej reprodukovateľné bez informácií od operátora. Preto by zmysluplné porovnanie štúdií EMF 5G malo zohľadňovať nielen hlásenú úroveň expozície, ale aj to, či štúdia meria skutočnú expozíciu, odhaduje maximálnu expozíciu alebo kombinuje meranie s informáciami od operátora.

Tabuľka 3. Porovnanie reprezentatívnych štúdií a správ o meraniach 5G EMF.

Štúdium	Scenár	Metóda	Typ expozície	Hlavné zistenie/Obmedzenie
Franci a kol. [19]	5G NR BS meranie postup	Kódovo-selektívne meranie; maximálna expozícia extrapolácia	Maximálne vystavenie	Poskytuje extrapolačný postup špecifický pre 5G, ale výsledok závisí od identifikácie referenčného signálu a predpokladov extrapolácie.
Colombi a kol. [24]	Komerčné 5G sieť s BS údaje o výkone	Na základe sieťového počítadla hodnotenie; skutočné časovo spriemerované posúdenie expozície	Skutočný časovo spriemerované vystavenie	Ukazuje, že špičkový výkon Predpoklady môžu nadhodnocovať realistickú expozíciu, ale metóda vyžaduje sieťové údaje na strane operátora.

Tabuľka 3. *Pokračovanie*

Štúdium	Scenár	Metóda	Typ expozície	Hlavné zistenie/Obmedzenie
Ofcom [25]	Verejné miesta takmer s podporou 5G Bakalársky titul v Spojenom kráľovstve	Frekvenčne selektívny meranie; skutočný posúdenie expozície	skutočná expozícia	Poskytuje verejné merania na vybraných reálnych miestach, ale výsledky predstavujú konkrétne lokality a šesťminútové priemerovacie obdobia.
Telstra [26]	skúšobná sieť 5G a skoro nasadenie merania v Austrália	Frekvenčne selektívny meranie; skutočný posúdenie expozície	Súčasné a skúšobná sieť vystavenie	Uvádza skoré merania expozície 5G a mmWave, ale ide skôr o správu operátora než o nezávislú recenzovanú štúdiu.
Aerts a kol. [76]	Dva 5G NR malé bunkové základňové stanice	Frekvenčne selektívny meranie; maximálna expozícia posúdenie	Najhorší prípad a časovo spriemerované vystavenie	Poskytuje dôkazy o malých bunkách po roku 2022, ale výsledky sú založené iba na dvoch miestach nasadenia.
Villaescusa-Tebar a Garcia-Pardo [77]	Veľká verejnosť udalosť v Valencia, Španielsko	Frekvenčne selektívny meranie; skutočný posúdenie expozície	Súčasný environmentálny vystavenie	Zobrazuje zmenu expozície počas udalosti s vysokou hustotou používateľov, ale neposkytuje extrapolácia maximálnej expozície.
Moraitis a kol. [78]	Vonkajšie 5G základňové stanice v mestách aj na vidieku lokality v Grécku	Frekvenčne selektívny meranie; skutočný posúdenie expozície	Súčasný environmentálny vystavenie	Porovnáva emisie 5G s inými frekvenčnými pásmami mobilných a vysielacích sietí, ale výsledky sú obmedzené na vybrané vonkajšie meracie miesta.
Chiaraviglio a kol. [79]	Komerčné 5G nasadenie v Talianske mesto	Frekvenčne selektívny meranie; skutočný posúdenie expozície	Súčasný na úrovni kanála vystavenie	Poskytuje merania expozície 5G vo veľkej oblasti s validácia založená na spektrálnom analyzátore, ale podrobné merania sa vykonávajú iba na vybrané lokality.

4.6. Prístupy merania FR2 a milimetrových vĺn EMF

Hoci sa pre FR2 vykonalo menej štúdií meraní EMF ako pre FR1, existujúce práce ukazujú, že hodnotenie expozície FR2 sa nevyhýba, ale vykonáva sa pomocou upravených verzií meracích prístupov, ktoré boli diskutované skôr v tomto článku [80–83]. Vo FR2 je možné skutočnú expozíciu posúdiť pomocou širokopásmových alebo frekvenčne selektívnych meraní na sledovanom milimetrovom vlnovom nosiči, zvyčajne pomocou spektrálneho analyzátora, trychtýrovej antény, izotropnej sondy alebo systému merania hustoty výkonu [80,82,83]. Keďže však signály FR2 sú vysoko smerové, postup merania musí venovať osobitnú pozornosť orientácii antény, priestorovému skenovaniu, podmienkam priamej viditeľnosti a podmienkam mimo viditeľnosti a tomu, či je merací bod zarovnaný s obslužným lúčom [80,83].

Na posúdenie maximálnej expozície niekoľko štúdií používa metódy založené na referenčných signáloch alebo metódy založené na premávke [80,81,83]. Pri prístupoch založených na referenčnom signále sa meria SSB alebo iná detekovateľná zložka signálu a potom sa extrapoluje na odhad maximálnej úrovne expozície [80,81]. Pri prístupoch zameraných na vynucovanie prevádzky sa na generovanie downlink prevádzky používa UE alebo zariadenie v priestoroch zákazníka, aby základná stanica vytvorila lúč smerom k miestu merania [82,83]. Nameraná úroveň poľa alebo hustoty výkonu sa potom použije na odhad realistickej alebo maximálnej expozície za kontrolovaných dopravných podmienok. Tieto prístupy sú v princípe podobné metódam FR1, ktoré boli diskutované vyššie, ale FR2 vyžaduje dodatočnú pozornosť venovanú zarovnaniu lúča, apertúre antény, uhlovej odozve a priestorovému priemerovaniu hustoty dopadajúceho výkonu [80,83]. Štúdie meraní EMF FR2 a správy z verejných meraní sú zhrnuté v tabuľke4.

Tabuľka 4. Reprezentatívne štúdie meraní FR2 a milimetrových vĺn EMF.

Štúdium	Scenár	Metóda	Typ expozície	Hlavné zistenie/Obmedzenie
Colombi a kol. [80]	5G milimetrové vlny Základné stanice okolo 28 a 39 GHz	Frekvenčne selektívny meranie; maximálna expozícia extrapolácia	Maximálne vystavenie	Ukazuje praktické metódy in situ pre hodnotenie expozície mmWave BS a uvádza extrapolovanú hustotu výkonu pod limitmi ICNIRP.
Migliore a kol. [81]	Živá základná stanica s pevným bezdrôtovým prístupom 5G FR2	Kódovo-selektívne meranie; maximálna expozícia extrapolácia	Maximálne vystavenie	Aplikuje postup extrapolácie maximálneho výkonu na funkčný FR2 gNB, ale výsledok závisí od referenčného signálu. meranie, odozva sondy a odhad dopravného lúča.
Wali a kol. [82]	29,5 GHz 5G mmWave BS s MIMO anténa	Frekvenčne selektívny meranie; založené na vynucovaní dopravy posúdenie	Priemerný a maximálne vystavenie	Demonštruje meranie poľa 5G mmWave BS pomocou skener/down-konvertor zariadenia a scenáre prevádzky UE, ale výsledky závisia od testovanej prevádzky a podmienok lúča.
Goegebeur a kol. [83]	Vnútorné masívne MIMO 5G Základná stanica FR2 pracujúca na frekvencii 26–28 GHz	Frekvenčne selektívny meranie; kódovo-selektívne meranie; maximálna expozícia extrapolácia	Skutočné a maximálne vystavenie	Porovnáva metódy merania FR2 s všesmerovou sondou, trychtýrovou anténou a SSB, ale porovnanie je založené na kontrolovanom nasadení v interiéri.

5. Zdroje neistoty pri meraní elektromagnetického poľa v 5G

Hoci metódy merania uvedené v časti4poskytujú praktické postupy na posúdenie vystavenia sa elektromagnetickému žiareniu 5G, výsledné hodnoty sú ovplyvnené niekoľkými zdrojmi neistoty. Tieto neistoty sú v 5G NR významnejšie ako v predchádzajúcich generáciách bunkových sietí, pretože nameraná úroveň poľa závisí nielen od vysielaného výkonu, ale aj od zaťaženia prevádzkou, konfigurácie TDD, alokácie šírky pásma, rozptylu lúča, prevádzky masívneho MIMO a vzťahu medzi vysielacími lúčmi SSB a lúčmi prevádzky špecifickými pre používateľa [19–21]. Preto je analýza neistoty nevyhnutná pri interpretácii nameraných skutočných úrovní expozície, porovnávaní výsledkov medzi štúdiami alebo extrapolácii z meraní referenčného signálu na maximálnu expozíciu. Z metrologického hľadiska by sa tieto zdroje neistoty mali interpretovať v rámci všeobecného rámca Sprievodcu vyjadrovaním neistoty merania (GUM), ktorý poskytuje štandardný prístup k hodnoteniu a vyjadrovaniu neistoty merania [84Hoci sa preskúmané štúdie 5G EMF líšia v scenároch merania a extrapolačných postupoch, transparentné vykazovanie zložiek neistoty zostáva nevyhnutné pre reprodukovateľné hodnotenie expozície [84].

5.1. Neistota pri extrapolácii na základe referenčného signálu

Pri hodnotení založenom na referenčnom signále sa ako východiskový bod pre odhad maximálnej expozície používa nameraná úroveň SSB alebo PBCH-DMRS. Referenčný signál však nemusí mať nevyhnutne rovnaké obsadenie šírky pásma, aktivitu v časovej doméne alebo zisk antény ako prenos dát špecifický pre používateľa. V dôsledku toho extrapolácia maximálnej expozície vyžaduje ďalšie faktory vrátane projekcie šírky pásma celej nosnej, pracovného cyklu downlinku TDD a posunu lúča/zisku medzi lúčmi SSB a prevádzkovými lúčmi [19–21Franci a kol. navrhli postup extrapolácie maximálneho výkonu špecifický pre 5G na základe meraní PBCH-DMRS a ukázali, že konečný odhad závisí od korekčných faktorov spojených s prevádzkou TDD, rozptylom lúča a vzťahom medzi referenčnými signálmi a prevádzkovými kanálmi [19,20].

Posun lúča/zisku, často reprezentovaný ako ($F_{lúč}$), je jedným z najkritickejších zdrojov neistoty. Lúče SSB sa periodicky vysielajú na účely synchronizácie a počiatočného prístupu, zatiaľ čo prevádzkové lúče PDSCH môžu byť užšie, smerovejšie alebo vysielané s rôznymi váhami tvarovania lúča. Preto nemožno predpokladať, že nameraná úroveň SSB alebo PBCH-DMRS predstavuje maximálnu úroveň poľa spojenú s prenosom údajov. Odhad ($F_{lúč}$) môže vyžadovať informácie od operátora, generovanie riadenej prevádzky alebo numerické modelovanie a každý z týchto prístupov prináša neistotu, pretože výsledok závisí od konfigurácie antény, prostredia šírenia, polohy prijímača a implementácie riadenia lúča [20,21,85]. Rybakowski a kol. ďalej ukázali, že samotný algoritmus formovania lúča ovplyvňuje skutočné hodnotenie expozície EMF v masívnych MIMO BS, čo naznačuje, že neistota súvisiaca s lúčom/ziskom nie je len problémom merania, ale závisí aj od implementovanej stratégie formovania lúča [85].

Faktor pracovného cyklu TDD je ďalším dôležitým zdrojom neistoty. V prevádzke TDD vysiela gNodeB iba počas symbolov alebo slotov smerom nahor, takže časovo priemerovaná expozícia závisí od nakonfigurovaného vzoru smerom nahor a nadol. Ak je pracovný cyklus smerom nadol neznámy alebo sa predpokladá nesprávne, extrapolovaná expozícia nemusí zodpovedať zamýšľanému maximálnemu alebo realistickému prevádzkovému stavu. Táto neistota sa stáva relevantnejšou, keď sa používajú dynamické TDD, adaptácia prevádzky alebo konfigurácie rámcov špecifické pre operátora [19–21].

Extrapolácia šírky pásma tiež prináša neistotu, pretože SSB a PBCH-DMRS obsadzujú iba obmedzenú časť nosnej frekvencie 5G NR, zatiaľ čo celá šírka pásma nosnej frekvencie môže byť oveľa širšia. Extrapolácia z nameranej šírky pásma referenčného signálu na celú nosnú frekvenciu vyžaduje predpoklady o počte obsadených blokov zdrojov, šírke pásma nosnej frekvencie, numerológii a maximálnom využití zdrojov. Táto neistota je obzvlášť relevantná pre širokopásmové nosné frekvencie 5G, kde je rozdiel medzi šírkou pásma referenčného signálu a celou šírkou pásma nosnej frekvencie veľký [14,19,20].

5.2. Neistota súvisiaca s dopravou, priestorom a vybavením

Skutočné merania expozície sú ovplyvnené zaťažením prevádzkou a časovou variabilitou. Keďže úroveň vyžarovaného poľa z 5G základňovej stanice sa mení v závislosti od dopytu používateľa, plánovania, alokácie lúča a využitia zdrojov, merania vykonané v rôznych časoch môžu viesť k rôznym hodnotám aj na tom istom mieste. Štúdie založené na sieťových údajoch ukázali, že skutočný časovo priemerovaný vysielací výkon môže byť hlboko pod predpokladmi konštantného špičkového výkonu, čo naznačuje, že pri interpretácii realistických úrovní expozície by sa mala zohľadniť variabilita závislá od prevádzky [24,86Napríklad Colombi a kol. analyzovali viac ako 13 miliónov vzoriek výkonu z komerčnej 5G siete a zistili, že skutočný časovo spriemerovaný výkon lúča bol výrazne pod teoretickým maximom, čo ukazuje, že predpoklady o konštantnom špičkovom výkone môžu viesť k nerealistickému posúdeniu expozície [24Podobné závery boli zaznamenané v scenári štadióna s vysokou hustotou, kde skutočný časovo spriemerovaný EIRP zostal výrazne pod maximom aj za výnimočných dopravných podmienok [86].

Priestorová neistota je tiež dôležitá, pretože masívne MIMO a tvarovanie lúča môžu spôsobiť silné priestorové variácie v nameranej úrovni poľa. Nameraná expozícia môže závisieť od polohy sondy, výšky, podmienok zorného poľa, lokálneho prostredia rozptylu, smeru lúča a od toho, či sa bod merania nachádza v hlavnom lúči alebo v bočnom laloku. Nedávne štúdie meraní v blízkosti malých buniek 5G NR a počas udalostí s vysokou hustotou používateľov tiež ukazujú, že umiestnenie merania a výber scenára môžu ovplyvniť nameranú úroveň expozície [76,77]. Aerts a kol. merali expozíciu EMF v blízkosti dvoch malých buniek 5G NR a porovnávali najhoršie prípady a časovo priemerované úrovne poľa v rôznych vzdialenostiach, čo ilustruje, že poloha merania a typ rozmiestnenia môžu ovplyvniť odhadovanú expozíciu [76Lee a kol. tiež skúmali rozstupy meraní pre posúdenie zhody s 3,5 GHz 5G BS,

ukazuje, že stratégia priestorového vzorkovania ovplyvňuje, či je zachytená lokálna oblasť maximálnej expozície [87].

Neistota súvisiaca so zariadením vyplýva z kalibrácie sondy, citlivosti prijímača, dynamického rozsahu, šírky pásma merania, odozvy izotropnej sondy, faktora antény, strát v kábli, času priemerovania a schopnosti prijímača správne identifikovať alebo demodulovať referenčné signály 5G. Tieto faktory ovplyvňujú frekvenčne selektívne aj kódovo selektívne merania. Preto je transparentné hlásenie meracieho zariadenia, výšky sondy, intervalu priemerovania, frekvenčných pásiem, detekovaných PCI alebo SSB, stavu prevádzky a predpokladov extrapolácie nevyhnutné pre porovnávanie výsledkov meraní 5G EMF v rôznych štúdiách [19,20,73,76].

6. Problémy a obmedzenia merania

6.1. Problémy s meraním FR2 a milimetrových vĺn

Väčšina skorých štúdií merania elektromagnetického poľa 5G sa zameriava na nasadenie FR1 pod 7,125 GHz, pretože tieto systémy sú bližšie k predchádzajúcim frekvenčným pásmam mobilných telefónov a boli širšie nasadené v komerčných sieťach. 5G NR však podporuje aj frekvenčný rozsah 2 (FR2), ktorý pokrýva milimetrové vlnové pásma od 24,25 GHz do 52,6 GHz [14,15,29]. Prevádzka FR2 predstavuje ďalšie výzvy pri meraní, pretože šírenie, správanie antény, expozičné veličiny a priestorové rozloženie poľa sa líšia od systémov pod 6 GHz. Preto by sa meranie EMF FR2 nemalo považovať za jednoduché rozšírenie meracích postupov FR1.

Prvým rozdielom je relevantná expozičná veličina. Pri nižších rádiofrekvenciách sa hodnotenie expozície bežne vzťahuje na intenzitu elektrického poľa, prijímaný výkon alebo veličiny založené na SAR. Pri vyšších frekvenciách sa hĺbka prieniku do biologického tkaniva znižuje a hodnotenie expozície sa čoraz viac spolieha na povrchové veličiny, ako je absorbovaná alebo dopadajúca hustota výkonu [8,34]. Tento posun ovplyvňuje meracie prístroje aj následné spracovanie, pretože merací systém musí odhadnúť priestorovo spriemerovanú hustotu výkonu na definovanej ploche povrchu, a nie iba na úrovni skalárneho elektrického poľa v jednom bode.

Druhou výzvou je silná priestorová variabilita polí FR2. Šírenie milimetrových vĺn je citlivejšie na blokovanie, odraz, stratu difrakcie, tieňovanie ľudského tela a lokálny rozptyl ako šírenie FR1. Zároveň sa systémy FR2 spoliehajú na úzke lúče s vysokým ziskom, aby kompenzovali stratu dráhy a udržali kvalitu spojenia [30–33]. V dôsledku toho sa nameraná úroveň expozície môže rýchlo meniť pri malých zmenách v polohe sondy, výške, orientácii antény alebo nastavení lúča. Postupy merania musia preto venovať zvláštnu pozornosť priestorovému vzorkovaniu, polohe sondy, stratégii vyhľadávania lúča a tomu, či je merací bod zarovnaný s hlavným lúčom alebo sa nachádza v bočnom laloku.

Tretia výzva sa týka detekcie referenčného signálu a extrapolácie maximálnej expozície. Vo FR2 sa SSB vysielajú pomocou vysoko smerového rozmítania lúča a maximálna prijatá úroveň sa môže vyskytnúť iba vtedy, keď je meracia anténa zarovnaná s príslušným SSB alebo prevádzkovým lúčom. Preto merania založené na kódovej selektívnosti alebo referenčnom signále musia zohľadňovať smer lúča, konfiguráciu SSB burst, rozostup subnosných a možný rozdiel medzi vysielacími SSB lúčmi a používateľsky špecifickými dátovými lúčmi [14,15,21]. Tieto problémy zvyšujú neistotu extrapolačných faktorov, najmä ak nie sú k dispozícii informácie o konfigurácii lúča a zosilnení lúča premávky zo strany operátora.

Nakoniec, meracie kampane FR2 sú v súčasnosti menej rozvinuté ako meracie kampane FR1. Je to čiastočne preto, že nasadenie FR2 je menej rozšírené a čiastočne preto, že meracie zariadenia, kalibračné postupy, výber antény a metódy priestorového priemerovania sa stávajú pri milimetrových vlnových frekvenciách náročnejšími. V dôsledku toho by sa pri budúcich prieskumoch a meraniach mala venovať osobitná pozornosť neistote špecifickej pre FR2.

vrátane podmienok blízkeho a vzdialeného poľa, clony sondy, uhlovej odozvy, nastavenia lúča, priestorovej priemerovacej plochy a opakovateľnosti meraní pri maximálnej expozícii.

6.2. Praktické obmedzenia merania EMF 5G

Jedným praktickým obmedzením hodnotenia maximálnej expozície 5G je odhad extrapolačného faktora lúča/zisku, bežne vyjadreného ako $F_{lúč}$. Tento faktor vysvetľuje možný rozdiel medzi úrovňou poľa vytvorenou meraným SSB alebo PBCH-DMRS a úrovňou poľa vytvorenou dátovými lúčmi špecifickými pre používateľa. Pri kontrolovaných meraniach môže byť dátový lúč vynútený smerom k miestu merania generovaním downlink prevádzky, napríklad pomocou komerčného 5G používateľského zariadenia alebo vyhradeného prijímača na testovanie siete. Tento postup však nie je vždy ľahké reprodukovať v praktických scenároch dodržiavania predpisov alebo auditu, pretože výsledok môže závisieť od metódy generovania prevádzky, správania používateľského zariadenia, odozvy plánovača a konfigurácie siete na strane operátora [20,21].

Reprezentatívne štúdie uvedené v tabuľke3ukazujú, že hodnotenie expozície 5G sa posunulo za hranice jednoduchých bodových meraní. Prieskumy verejných priestorov, správy operátorov, štúdie extrapolácie referenčných signálov a štúdie založené na sieťových protihodnotách sa zaoberajú rôznymi časťami problému merania. Hlavným bodom diskusie preto nie je len to, či sú namerané úrovne expozície pod regulačnými limitmi, ale aj to, aká reprodukovateľná, konzervatívna a reprezentatívna je každá metóda hodnotenia.

Budúce nasadenia 5G môžu ďalej zvýšiť zložitosť hodnotenia EMF. S rastúcou prevádzkou 5G NR a masívnymi MIMO základňovými stanicami (BS) podporujúcimi viac lúčov sa môže priestorové a časové rozloženie vysielaného výkonu stať dynamickejším. Používateľsky špecifické lúče môžu byť riadené nielen v azimute, ale aj v elevácii a viacpoužívateľské MIMO môže alokovať výkon medzi niekoľko lúčov alebo vrstiev súčasne. V dôsledku toho nemusí merací bod vždy zažívať teoretické maximálne vysielacie podmienky, zatiaľ čo odhad maximálnej expozície môže stále vyžadovať konzervatívne predpoklady o smere lúča, zisku lúča a súčasnom využívaní zdrojov [24,85,86].

V porovnaní so 4G je meranie EMF v 5G náročnejšie, pretože referenčný signál použitý na meranie a dátový signál zodpovedný za vystavenie prevádzke nemusia zdieľať rovnaký vzor lúča, pridelenie výkonu alebo časovo-frekvenčné obsadenie. Jednoduchá lineárna extrapolácia z výkonu SS-RSRP alebo SSB môže byť vhodná len za jasne definovaných predpokladov. V realistických nasadeniach môže čiastočné zaťaženie, rozptyl lúča, lúče PDSCH špecifické pre UE a plánovanie špecifické pre operátora spôsobiť, že extrapolácia bude menej priama. Spoľahlivé posúdenie maximálnej expozície v 5G preto vyžaduje buď dostatočné informácie o mieste, alebo konzervatívne predpoklady, ktoré ohraničujú neznáme parametre [19–21].

V mnohých reálnych scenároch súladu s predpismi alebo auditu nemusí mať merací tím prístup k parametrom správy siete operátora, ako je konfigurácia plánovania, kódové knihy formovania lúča, presné vzory TDD alebo posuny zisku lúča prevádzky. V takýchto prípadoch je praktickým prístupom prijať konzervatívne, so štandardmi zosúladené predpoklady, ktoré ohraničujú maximálnu možnú expozíciu. Napríklad hodnotenie môže predpokladať plný pracovný cyklus downlinku, obsadenie plnej šírky pásma a najhorší prípad zisku formovania lúča alebo vopred definovaný horný posun lúča medzi dátovými kanálmi a SSB, aby extrapolovaný odhad expozície zostal na bezpečnej strane.

Alternatívne je možné merania nezávislé od operátora posilniť výberom dizajnu merania. Dlhšie trvanie pozorovania môže pomôcť zachytiť prevádzkové podmienky s vyšším percentilom, opakované merania vo viacerých priestorových bodoch môžu pomôcť identifikovať potenciálne aktívne miesta a riadené generovanie prevádzky pomocou komerčného používateľského zariadenia môže zvýšiť aktivitu downlinku počas meracieho okna. Tieto prístupy...

neodstraňujú všetku neistotu, ale zlepšujú reprodukovateľnosť a podporujú konzervatívne hodnotenie zhody, keď nie sú k dispozícii chránené informácie o operátorovi.

6.3. Prostredia šírenia s podporou RIS a s možnosťou rekonfigurácie

Ďalšou budúcou výzvou pre hodnotenie elektromagnetického žiarenia v 5G a nad rámec 5G je možné použitie rekonfigurovateľných inteligentných povrchov (RIS). RIS je programovateľný metapovrch, ktorý dokáže modifikovať prostredie šírenia vlnenia úpravou odrazovej odozvy mnohých pasívnych alebo takmer pasívnych jednotkových buniek [88,89]. V typickom spojení s podporou RIS sa dopadajúce pole zo základnej stanice (BS) odráža RIS smerom do požadovanej oblasti riadením fázy a v praktických implementáciách aj amplitúdy odrazeného poľa [89,90]. Z hľadiska merania EMF by sa preto RIS nemal považovať za konvenčný aktívny vysielač, ale za rekonfigurovateľný sekundárny rozptylový povrch, ktorý dokáže presmerovať, zaostriť alebo čiastočne potlačiť dopadajúce pole v priestore.

Tento princíp fungovania má priame dôsledky pre hodnotenie expozície. Merané pole v blízkosti spoja s podporou RIS závisí nielen od vysielacieho výkonu základňovej stanice a smeru lúča, ale aj od veľkosti RIS, rozostupu prvkov, koeficientu odrazu, fázovej konfigurácie, uhla dopadu, polarizácie, výšky a geometrie BS-RIS-pozorovacieho bodu [89,91]. Toto sa líši od konvenčného merania BS, kde sa prostredie šírenia zvyčajne považuje za fixné počas merania. V dôsledku toho môže prenos s pomocou RIS zmeniť polohu bodu expozície v najhoršom prípade a zaviesť dodatočnú neistotu do extrapolácie maximálnej expozície.

Nedávne štúdie expozície RIS ďalej ukazujú, že vplyv EMF silne závisí od prevádzkového režimu RIS. Pri prevádzke iba s odrazom RIS presmeruje dopadajúce pole najmä a zvýšenie expozície môže zostať obmedzené. Pri prevádzke s tvarovaním lúča však koherentná superpozícia z mnohých prvkov RIS môže vytvárať lokalizované vrcholy E-poľa, najmä ak sa používa veľký počet prvkov alebo ak je RIS inštalovaný v blízkosti prístupných verejných priestorov [91]. V dôsledku toho môže posúdenie expozície s ohľadom na RIS vyžadovať výber meracích bodov podľa očakávaného smeru odrazeného alebo zaostreného lúča, a nie len okolo pôvodného sektora BS.

Konvenčná extrapolácia maximálnej expozície zvyčajne predpokladá, že dominantný príspevok je spojený s priamymi alebo prirodzene odrazenými dráhami šírenia medzi základňovou stanicou (BS) a pozorovacím bodom, zatiaľ čo posuny zisku súvisiace s lúčom sa spracúvajú pomocou známych alebo ohraničených konfigurácií antény. Prenos s pomocou RIS však môže zaviesť ďalšie ovládateľné odrazové dráhy, ktoré modifikujú efektívny zisk kanála, priestorové rozloženie poľa a umiestnenie maxím intenzity poľa [92].

Toto vytvára potenciálne obmedzenie pre existujúce meracie postupy založené na extrapolácii. Ak RIS zmení svoju fázovú konfiguráciu, intenzita poľa v mieste merania sa môže meniť, aj keď vysielací výkon BS a konfigurácia SSB zostanú nezmenené. Preto budúce metódy merania EMF môžu musieť zohľadňovať konfiguráciu RIS, smer odrazu, veľkosť povrchu, geometriu rozmiestnenia a kombinovaný vplyv aktívneho formovania lúča a pasívneho rekonfigurovateľného šírenia. Hoci hodnotenie expozície s pomocou RIS nie je súčasťou rutinných meracích postupov 5G v štúdiách preskúmaných v tomto článku, predstavuje dôležitú otvorenú otázku pre budúce siete, pretože samotné prostredie šírenia sa môže stať dynamicky ovládateľným.

7. Závery

Tento článok sa zaoberá meraním elektromagnetického poľa 5G z hľadiska tutoriálu aj prieskumu. Najprv článok zhrnul regulačné veličiny a technické vlastnosti 5G, ktoré sú najrelevantnejšie pre hodnotenie expozície, vrátane prenosu SSB, PBCH-DMRS, prevádzky TDD, formovania lúča, masívneho MIMO a rozdielu medzi FR1 a FR2.

nasadenia. Tieto vlastnosti vysvetľujú, prečo meracie postupy vyvinuté pre predchádzajúce generácie mobilných sietí nemožno priamo aplikovať na 5G bez dodatočného zohľadnenia referenčných signálov, smeru lúča, prevádzkového zaťaženia a extrapolačných faktorov.

Článok následne klasifikoval metódy merania 5G EMF na frekvenčne selektívne meranie, kódovo selektívne meranie, hodnotenie skutočnej expozície, extrapoláciu maximálnej expozície a hodnotenie založené na sieťovom počítadle. Táto taxonómia objasňuje, že rôzne metódy odpovedajú na rôzne otázky týkajúce sa expozície. Frekvenčne selektívne a aktuálne merania expozície sú užitočné na charakterizáciu úrovní polí v skutočnej prevádzke siete, zatiaľ čo kódovo selektívne metódy a metódy založené na referenčnom signále sú potrebné, keď je cieľom odhadnúť maximálnu expozíciu. Prístupy založené na sieťovom počítadle poskytujú dodatočné informácie o časovej variabilite a realistickom zaťažení siete, ale zvyčajne vyžadujú údaje na strane operátora.

Porovnávacia analýza ukazuje, že existujúce štúdie 5G EMF sa podstatne líšia v cieľoch merania, scenároch a predpokladoch. Správy o meraniach vo verejnom teréne a nedávne meracie kampane vo všeobecnosti uvádzajú úrovne expozície pod príslušnými medzinárodnými limitmi v skúmaných scenároch, ale tieto výsledky by sa nemali interpretovať bez zohľadnenia trvania merania, dopravných podmienok, priestorového vzorkovania a toho, či štúdia uvádza skutočnú expozíciu alebo extrapolovanú maximálnu expozíciu [25,76,77Preto porovnávanie štúdií 5G EMF vyžaduje viac než len porovnávanie hlásených úrovní poľa; vyžaduje si aj porovnanie metódy merania a posudzovanej expozičnej veličiny.

Kľúčovým záverom tejto štúdie je, že analýza neistoty je ústredným prvkom merania elektromagnetického poľa v sieti 5G. Medzi hlavné zdroje neistoty patrí posun lúča/zisku medzi lúčmi SSB a dátovými lúčmi, pracovný cyklus downlinku TDD, extrapolácia plnej šírky pásma, variácia zaťaženia prevádzky, priestorové vzorkovanie, odozva zariadenia a prístup ku konfiguračným údajom špecifickým pre operátora. Tieto neistoty sú obzvlášť dôležité pre extrapoláciu maximálnej expozície, kde nameraná úroveň SSB alebo PBCH-DMRS musí byť škálovaná tak, aby reprezentovala konzervatívne prenosové podmienky. Transparentné hlásenie nastavení merania, detekovaných referenčných signálov, času priemerovania, stavu prevádzky a predpokladov extrapolácie je preto nevyhnutné pre reprodukovateľné a porovnateľné posúdenie expozície v sieti 5G.

V článku sa nakoniec identifikovalo niekoľko otvorených výziev pre budúcu prácu. Nasadenie FR2 a milimetrových vĺn prináša ďalšie ťažkosti kvôli úzkym lúčom, silnejšej priestorovej variabilite, citlivosti na blokovanie a potrebe hodnotenia založeného na hustote výkonu. Budúce technológie nad rámec 5G, ako napríklad prostredia šírenia s podporou RIS, môžu ďalej komplikovať hodnotenie expozície, pretože samotné prostredie šírenia sa môže stať dynamicky rekonfigurovateľným. Budúci výskum by sa preto mal zamerať na štandardizované hlásenie neistôt, meracie postupy nezávislé od operátora, dlhodobé monitorovanie, metódy merania špecifické pre FR2 a rámce hodnotenia expozície, ktoré zostávajú platné, keďže sa siete 5G vyvíjajú smerom k dynamickejším a rekonfigurovateľnejším architektúram.

Príspevky autorov:KL: Konceptualizácia, skúmanie, písanie – pôvodný návrh, vizualizácia. OP: Metodika, písanie – kontrola a úprava, dohľad. YS: Konceptualizácia, písanie, kontrola a úprava, dohľad, administrácia projektu. Všetci autori si prečítali a súhlasia s publikovanou verziou rukopisu.

Financovanie: Tento výskum bol podporený Radou pre výskum v oblasti inžinierstva a fyzikálnych vied (EPSRC) v rámci grantov číslo EP/X040518/1 a EP/Y037421/1.

Vyhlásenie o dostupnosti údajov:V tejto štúdii neboli vytvorené ani analyzované žiadne nové údaje. Zdieľanie údajov sa na tento článok nevzťahuje.

Konflikty záujmov: Autori vyhlasujú, že nedošlo ku konfliktu záujmov. Financujúce organizácie nezohrávali žiadnu úlohu pri návrhu štúdie, pri zbere, analýze ani interpretácii údajov, pri písaní rukopisu ani pri rozhodovaní o publikovaní výsledkov.

Referencie

1. GSMA Intelligence. Mobilná ekonomika 2026. 2026. Dostupné online:https://www.gsmaintelligence.com/research/themobile-economy-2026(prístup 28. júna 2026).
2. Li, S.; Xu, LD; Zhao, S. Internet vecí: Prieskum.*Inf. systém predný***2015**, *17*, 243–259. [CrossRef]
3. Khurpade, JM; Rao, D.; Sanghavi, PD Prieskum o internete vecí a sieti 5G. V zborníku z Medzinárodnej konferencie o inteligentných mestách a vznikajúcich technológiách (ICSCET) z roku 2018, Bombaj, India, 5. januára 2018; s. 1–3.CrossRef]
4. Yazar, A.; Arslan, H. Flexibilné multinumerologické systémy pre nové rádio 5G.*J. Mob. Multimed.***2018**, *14*, 367–394. [CrossRef]
5. Tang, Y.; Dananjayan, S.; Hou, C.; Guo, Q.; Luo, S.; He, Y. Prieskum o sieti 5G a jej vplyve na poľnohospodárstvo: Výzvy a príležitosti.*Výpočtová technika. Elektronika. Poľnohospodárstvo.***2021**, *180*, 105895. [CrossRef]
6. Chiaraviglio, L.; Cacciapuoti, AS; Martino, GD; Fiore, M.; Montesano, M.; Trucchi, D.; Melazzi, NB Plánovanie sietí 5G v rámci obmedzení EMF: Stav techniky a vízie.*Prístup k IEEE***2018**, *6*, 51021–51037. [CrossRef]
7. Svetová zdravotnícka organizácia.*Nadviazanie dialógu o rizikách vyplývajúcich z elektromagnetických polí*Svetová zdravotnícka organizácia: Ženeva, Švajčiarsko, 2002.
8. Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP). Usmernenia pre obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz).*Zdravotná fyzika.***2020**, *118*, 483–524. [CrossRef] [ ]PubMed]
9. Dokument ITU-T K.Sup14. Vplyv limitov vystavenia RF-EMF, ktoré sú prísnejšie ako smernice ICNIRP alebo IEEE o zavádzaní mobilných sietí 4G a 5G. Dostupné online:https://www.itu.int/epublications/publication/itu-tk-suppl-14-2019-09-theimpact-of-rf-emf-exposure-limits-stricter-than-the-icnirp-or-ieee-guidelines-on-4g-and-5g-mobile-network-deployment(prístup 23. apríla 2022).
10. Gajšek, P.; Ravazzani, P.; Wiart, J.; Grellier, J.; Samaras, T.; Thuróczy, G. Hodnotenie expozície elektromagnetickým poliam v Európe v rádiofrekvenčných poliach (10 MHz – 6 GHz).*J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.***2015**, *25*, 37–44. [PubMed]
11. *Odporúčanie ITU-T K.83. Monitorovanie intenzity elektromagnetických polí*Medzinárodná telekomunikačná únia: Ženeva, Švajčiarsko, 2011.
12. *Základ pre odporúčanie merania UMTS*Švajčiarska agentúra pre životné prostredie, lesy a krajinu: Ženeva, Švajčiarsko, 2004.
13. Bornkessel, C.; Hein, M.; Wuschek, M. Meranie vystavenia ľudí základňovým staniciam LTE – súčasný stav a budúce výzvy v metodike merania. In Zborník z Európskej mikrovlnnej konferencie (EuMC) 2015, Paríž, Francúzsko, 7. – 10. septembra 2015; s. 881 – 884. [CrossRef]
14. 3GPP. TS 38.211: NR; Fyzikálne kanály a modulácia. 2017. Dostupné online:https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Špecifikácie/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3213(prístup 30. mája 2022).
15. 3GPP. TS 38.213: NR; Procedúry fyzickej vrstvy pre riadenie. 2018. Dostupné online:https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Špecifikácie/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3215(prístup 30. mája 2022).
16. Parkvall, S.; Dahlman, E.; Furuskar, A.; Frenne, M. NR: Nová technológia rádiového prístupu 5G.*IEEE Commun. Stand. Mag.***2017**, *1*, 24–30. [CrossRef]
17. Lu, L.; Li, GY; Swindlehurst, AL; Ashikhmin, A.; Zhang, R. Prehľad masívneho MIMO: Výhody a výzvy.*IEEE J. Selection Top. Signal Process.***2014**, *8*, 742–758. [CrossRef]
18. Lin, Z.; Li, J.; Zheng, Y.; Irukulapati, NV; Wang, H.; Sahlin, H. Návrh blokov SS/PBCH v novom rádiu 5G (NR). In Zborník z workshopov IEEE Globecom (GC Wkshps) 2018, Abú Zabí, Spojené arabské emiráty, 9. – 13. decembra 2018; s. 1 – 6. [CrossRef]
19. Franci, D.; Coltellacci, S.; Grillo, E.; Pavoncello, S.; Aureli, T.; Cintoli, R.; Migliore, MD Experimentálny postup merania elektromagnetického poľa (EMF) piatej generácie (5G) a extrapolácia maximálneho výkonu na posúdenie expozície ľudí. *Prostredia***2020**, *7*, 22. [CrossRef]
20. Adda, S.; Aureli, T.; D'elia, S.; Franci, D.; Grillo, E.; Migliore, MD; Pavoncello, S.; Schettino, F.; Suman, R. Teoretický a experimentálny výskum merania úrovne elektromagnetického poľa vyžarovaného základňovými stanicami 5G.*Prístup k IEEE* **2020**, *8*, 101448–101463. [CrossRef]
21. Franci, D.; Coltellacci, S.; Grillo, E.; Pavoncello, S.; Aureli, T.; Cintoli, R.; Migliore, MD Experimentálne skúmanie vplyvu techník duplexácie a tvarovania lúča pri meraniach signálov 5G v teréne.*Elektronika***2020**, *9*, 223. [CrossRef]
22. Aerts, S.; Verloock, L.; Van Den Bossche, M.; Colombi, D.; Martens, L.; Törnevik, C.; Joseph, W. Metodika merania in-situ na posúdenie vystavenia masívnej základnej stanice MIMO 5G NR pri frekvenciách pod 6 GHz.*Prístup k IEEE***2019**, *7*, 184658–184667. [CrossRef]

23. Colombi, D.; Joshi, P.; Pereira, R.; Thomas, D.; Shleifman, D.; Tootoonchi, B.; Xu, B.; Törnevik, C. Posúdenie skutočnej maximálnej expozície vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu z rádiových základňových staníc s masívnymi MIMO anténami. V zborníku z jarného sympózia o výskume fotoniky a elektromagnetizmu 2019 (PIERS-Spring), Rím, Taliansko, 17. – 20. júna 2019; s. 570 – 577.CrossRef]
24. Colombi, D.; Joshi, P.; Xu, B.; Ghasemifard, F.; Narasaraju, V.; Törnevik, C. Analýza skutočného výkonu a vystavenia elektromagnetickému žiareniu zo základňových staníc v komerčnej 5G sieti.*Aplikačné vedy.***2020**, *10*, 5280. [CrossRef]
25. Ofcom. Merania elektromagnetického poľa (EMF) v blízkosti základňových staníc mobilných telefónov 5G. [EB/OL]. Dostupné online: https: //www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0015/190005/emf-test-summary.pdf(prístup 23. apríla 2022).
26. Telstra. 5 prieskumov 5G. [EB/OL]. Dostupné online:http://1u0b5867gsn1ez16a1p2vcj1-wpengine.netdna-ssl.com/wpcontent/uploads/2019/07/5-Surveys-of-5G-flyer-A4.pdf(prístup 23. apríla 2022).
27. Chountala, C.; Chareau, JM; Chawdhry, P. Merania rádiofrekvenčného elektromagnetického poľa v komerčnej 5G sieti. In Zborník z 2021 IEEE 4th 5G World Forum (5GWF), Montreal, QC, Kanada, 13. – 15. októbra 2021; s. 275 – 280. [CrossRef]
28. Lee, AK; Jeon, SB; Choi, Úrovne HD EMF v novom rádiovom prostredí 5G v Soule v Kórei.*Prístup k IEEE***2021**, *9*, 19716–19722. [CrossRef]
29. 3GPP. Špecifikácia 3GPP, séria 38: Rádiová technológia nad rámec LTE. 2017. Dostupné online:https://www.3gpp.org/DynaReport/ 38-series.htm(prístup 30. mája 2022).
30. Pi, Z.; Khan, F. Úvod do milimetrových vĺn mobilných širokopásmových systémov.*IEEE Commun. Mag.***2011**, *49*, 101–107. [CrossRef]
31. Rappaport, TS; Sun, S.; Mayzus, R.; Zhao, H.; Azar, Y.; Wang, K.; Wong, GN; Schulz, JK; Samimi, M.; Gutierrez, F. Mobilná komunikácia na milimetrových vlnách pre 5G mobilné siete: Bude to fungovať!*Prístup k IEEE***2013**, *1*, 335–349. [CrossRef]
32. Rangan, S.; Rappaport, TS; Erkip, E. Bezdrôtové mobilné siete s milimetrovými vlnami: Potenciály a výzvy.*Zborník IEEE***2014**, *102*, 366–385. [CrossRef]
33. Zhao, K.; Ying, Z.; He, S. Štúdia vystavenia EMF týkajúca sa fázovaného poľa mmWave v mobilných zariadeniach pre 5G komunikáciu. *IEEE antény Wireless Propagation Lett.***2016**, *15*, 1132–1135. [CrossRef]
34. Karipidis, K.; Mate, R.; Urban, D.; Tinker, R.; Wood, A. Mobilné siete 5G a zdravie – prehľad súčasného stavu vedy o výskume nízkofrekvenčných polí nad 6 GHz.*J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.***2021**, *31*, 585–605. [CrossRef] [ ]PubMed]
35. Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP). Usmernenia pre obmedzenie vystavenia časovo premenným elektrickým, magnetickým a elektromagnetickým poliam (do 300 GHz).*Zdravotná fyzika.***1998**, *74*, 494–522. [PubMed]
36. Svetová zdravotnícka organizácia.*Medzinárodná agentúra pre výskum rakoviny*Svetová zdravotnícka organizácia: Ženeva, Švajčiarsko, 2019.
37. Kostoff, RN; Heroux, P.; Aschner, M.; Tsatsakis, A. Nežiaduce účinky mobilnej sieťovej technológie 5G na zdravie v reálnych podmienkach. *Toxicol. Lett.***2020**, *323*, 35–40. [CrossRef] [ ]PubMed]
38. Ahlbom, I.; Cardis, E.; Green, A.; Linet, M.; Savitz, D.; Swerdlow, A.; Stály výbor pre epidemiológiu ICNIRP (Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením). Prehľad epidemiologickej literatúry o EMP a zdraví.*Životné prostredie. Perspektíva zdravia.***2001**, *109*, 911–933. [CrossRef] [ ]PubMed]
39. Feychting, M.; Ahlbom, A.; Kheifets, L. EMP A ZDRAVIE.*Annu. Rev. Verejné zdravie***2005**, *26*, 165–189. [CrossRef] [ ]PubMed]
40. Liu, F.; Zhao, H.; Crozier, S. O gradientoch indukovaného elektrického poľa v ľudskom tele pre magnetickú stimuláciu gradientovými cievkami v MRI.*IEEE Trans. Biomed. Eng.***2003**, *50*, 804–815. [CrossRef] [ ]PubMed]
41. Sambo, YA; Héliot, F.; Imran, MA Prehľad a tutoriál o elektromagnetickom žiarení a jeho redukcii v mobilných komunikačných systémoch.*IEEE Commun. Surv. Tutor.***2015**, *17*, 790–802. [CrossRef]
42. Abdulla, H.; Badra, RE Vystavenie hlavy mobilným telefónom: Štúdia na systémovej úrovni. V Zborníku z latinskoamerickej konferencie IEEE o komunikáciách 2010, Bogota, Kolumbia, 15. – 17. septembra 2010; s. 1 – 6. [CrossRef]
43. Balzano, Q.; Faraone, A. Vystavenie ľudí anténam základňových staníc mobilných sietí. V Zborníku zo sympózia IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatability z roku 1999, Záznam zo sympózia (kat. č. 99CH36261), Seattle, WA, USA, 2. – 6. augusta 1999; Zväzok 2, str. 924 – 927.CrossRef]
44. Wikipédia. Blízke a vzdialené pole. Dostupné online:https://en.wikipedia.org/wiki/Near_and_far_field#cite_ref-OSHA-EM-rad_5-0 (prístup 23. apríla 2022).
45. Bezpečnosť, O.; Administratíva, H. Elektromagnetické žiarenie a jeho vplyv na vaše prístroje. Blízke pole vs. vzdialené pole. Dostupné online:https://www.osha.gov/radiofrequency-and-microwave-radiation#section_6(prístup 23. apríla 2022).
46. Nezávislá poradná skupina pre neionizujúce žiarenie (AGNIR). Zdravotné účinky rádiofrekvenčných elektromagnetických polí, správa nezávislej poradnej skupiny pre neionizujúce žiarenie. Dostupné online:https://www.gov.uk/government/organisations/public-health-england(prístup 23. apríla 2022).
47. Balanis, Kalifornia*Teória antén: Analýza a návrh*John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2015.
48.*Norma IEEE C95.1a-2010 (Dodatok k norme IEEE C95.1-2005)*Norma IEEE pre úrovne bezpečnosti vzhľadom na vystavenie ľudí rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam, 3 kHz až 300 GHz, Dodatok 1: Špecifikuje maximálne limity pre indukovaný a kontaktný prúd, objasňuje rozdiely medzi lokalizovanou expozíciou a priestorovou hustotou špičkového výkonu. IEEE: Washington, DC, USA, 2010; str. 1–9.CrossRef]

49. Wikipédia. Povrchová hustota výkonu. Dostupné online:https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_power_density(prístup 23. apríla 2022).
50. Osseiran, A.; Boccardi, F.; Braun, V.; Kusume, K.; Marsch, P.; Maternia, M.; Queseth, O.; Schellmann, M.; Schotten, H.; Taoka, H.; a kol. Scenáre pre mobilnú a bezdrôtovú komunikáciu 5G: Vízia projektu METIS.*IEEE Commun. Mag.***2014**, *52*, 26–35. [CrossRef]
51. Hirata, H.; Nanda, I.; Van Riesen, A.; McMichael, G.; Hu, H.; Hambrock, M.; Papon, M.; Fischer, U.; Marouillat, S.; Kalscheuer, VM; a kol. Mutácie sú spojené s Arthrogryposis Multiplex Congenita a mentálnym postihnutím prostredníctvom zhoršenia centrálnej a periférnej synaptickej plasticity.*Am. J. Hum. Genet.***2013**,*92*, 681–695. [CrossRef] [ ]PubMed]
52. Federálna komunikačná komisia (FCC). Limity vystavenia rádiofrekvenčnému žiareniu. V*Kódex federálnych predpisov*; Hlava 47, oddiel 1.1310; Federálna komunikačná komisia: Washington, DC, USA, 2016. Dostupné online:https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-1/subpart-I/section-1.1310(prístup 7. júla 2026).
53. Madjar, HM Limity vystavenia ľudí rádiofrekvenčnému žiareniu: Aktualizácia referenčných úrovní v Európe, USA, Kanade, Číne, Japonsku a Kórei. In Zborník z Medzinárodného sympózia o elektromagnetickej kompatibilite 2016 – EMC EUROPE, Vroclav, Poľsko, 5. – 9. septembra 2016; s. 467 – 473. [CrossRef]
54. Tse, D.; Višvánath, P.*Základy bezdrôtovej komunikácie*; Vydavateľstvo Cambridge University Press: Cambridge, Spojené kráľovstvo, 2005.
55. Torkildson, E.; Madhow, U.; Rodwell, M. Vnútorné milimetrové vlnové MIMO: uskutočniteľnosť a výkon.*IEEE Trans. Wireless Commun.***2011**, *10*, 4150–4160. [CrossRef]
56. Akdeniz, MR; Liu, Y.; Samimi, MK; Sun, S.; Rangan, S.; Rappaport, TS; Erkip, E. Modelovanie kanálov milimetrových vĺn a hodnotenie bunkovej kapacity.*IEEE J. Selection Areas Commun.***2014**,*32*, 1164–1179. [CrossRef]
57. Ankarali, ZE; Peköz, B.; Arslan, H. Flexibilný rádiový prístup po 5G: Budúca projekcia princípov tvaru vĺn, numerológie a návrhu rámcov.*Prístup k IEEE***2017**,*5*, 18295–18309. [CrossRef]
58. 3GPP. TS 38.331: NR; Riadenie rádiových zdrojov (RRC); Špecifikácia protokolu. 2018. Dostupné online:https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3197(prístup 29. júna 2026).
59. Sharetechnote. 5G/NR—SS Block. Dostupné online:https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_SS_Block.html(prístup 23. apríla 2022).
60. Venkateswaran, V.; van der Veen, AJ Analógové tvarovanie lúča v MIMO komunikácii s fázovo posunutými sieťami a online odhadom kanálov.*IEEE Trans. Signal Process.***2010**,*58*, 4131–4143. [CrossRef]
61. Brady, J.; Behdad, N.; Sayeed, AM Beamspace MIMO pre komunikáciu v milimetrových vlnách: architektúra systému, modelovanie, analýza a merania.*IEEE Trans. Antény Šírenie***2013**,*61*, 3814–3827. [CrossRef]
62. Sun, S.; Rappaport, TS; Heath, RW; Nix, A.; Rangan, S. Mimo pre bezdrôtovú komunikáciu v milimetrových vlnách: tvarovanie lúča, priestorové multiplexovanie alebo oboje?*IEEE Commun. Mag.***2014**,*52*, 110–121. [CrossRef]
63. Zhao, H.; Mayzus, R.; Sun, S.; Samimi, M.; Schulz, JK; Azar, Y.; Wang, K.; Wong, GN; Gutierrez, F.; Rappaport, TS Merania odrazov a penetračných strát v bunkovej komunikácii v milimetrových vlnách v pásme 28 GHz v budovách a ich okolí v New Yorku. In Zborník z medzinárodnej konferencie IEEE o komunikáciách (ICC) 2013, Budapešť, Maďarsko, 9. – 13. júna 2013; s. 5163 – 5167. [CrossRef]
64. Raghavan, V.; Sayeed, AM Sublineárne zákony škálovania kapacity pre riedke MIMO kanály.*IEEE Trans. Inf. Theory***2011**,*57*, 345–364. [CrossRef]
65. Shi, E.; Zhang, J.; An, J.; Zhang, G.; Liu, Z.; Yuen, C.; Ai, B. Spoločná asociácia AP-UE a predkódovanie pre masívne MIMO systémy bez buniek s podporou SIM karty.*IEEE Trans. Wireless Commun.***2025**,*24*, 5352–5367. [CrossRef]
66. Flordelis, J.; Rusek, F.; Tufvesson, F.; Larsson, EG; Edfors, O. Masívny výkon MIMO – TDD verzus FDD: Čo hovoria merania?*IEEE Trans. Wireless Commun.***2018**,*17*, 2247–2261. [CrossRef]
67. Molisch, AF; Ratnam, VV; Han, S.; Li, Z.; Nguyen, SLH; Li, L.; Haneda, K. Hybridné tvarovanie lúča pre masívne MIMO: Prehľad. *IEEE Commun. Mag.***2017**,*55*, 134–141. [CrossRef]
68. Liu, Y.; Duan, H.; Liao, X. Skrátené premietanie lúča pre rekonštrukciu priestorovej kovariančnej matice v hybridnom masívnom MIMO. *arXiv***2022**, arXiv:2203.14180.
69. Giordani, M.; Mezzavilla, M.; Barati, CN; Rangan, S.; Zorzi, M. Porovnávacia analýza počiatočných prístupových techník v 5G mmWave celulárnych sieťach. In Zborník z výročnej konferencie o informačnej vede a systémoch (CISS) 2016, Princeton, NJ, USA, 16. – 18. marca 2016; s. 268 – 273. [CrossRef]
70. Rohde & Schwarz. Ako funguje SSB Beamforming v teréne? Dostupné online:https://www.rohde-schwarz.com/knowledge-center/videos/how-does-ssb-beamforming-work-in-field-video-detailpage_251220-588864.html(prístup 23. apríla 2022).
71. Podgoršak, EB*Radiačná fyzika pre lekárskych fyzikov*Springer: Berlín/Heidelberg, Nemecko, 2006; Zväzok 1.
72. Národný onkologický inštitút. Elektromagnetické polia a rakovina. 2022. Dostupné online:https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/radiation/electromagnetic-fields-fact-sheet(prístup 30. júna 2026).

73. Mielke, M. Merania elektromagnetického poľa v 5G. Dostupné online:https://www.rohde-schwarz.com/uk/solutions/ test-and-measurement/mobile-network-testing/stories-insights/article-electromagnetic-field-measurements-in-5g-overviewand-concepts-part-1-_253377.html(prístup 23. apríla 2022).
74. Moraitis, N.; Popescu, I.; Nikita, KS Frekvenčne selektívne merania elektromagnetického žiarenia a hodnotenie expozície vo vnútorných kancelárskych prostrediach. In Zborník z 14. Európskej konferencie o anténach a šírení (EuCAP) 2020, Kodaň, Dánsko, 15. – 20. marca 2020; s. 1 – 5. [CrossRef]
75. Stuhlfauth, R. Merania EMF v 5G NR. Rohde & Schwarz Biela kniha. 2021. Dostupné online:https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2021/proyectos/EMF-measurements-in-5G-Networks_SUBTEL_16-04-2021.pdf(prístup 7. júla 2026).
76. Aerts, S.; Deprez, K.; Verloock, L.; Olsen, RG; Martens, L.; Tran, P.; Joseph, W. Expozícia RF-EMF v blízkosti malých buniek 5G NR.*Senzory* **2023**,*23*, 3145. [CrossRef] [ ]PubMed]
77. Villaescusa-Tebar, A.; Garcia-Pardo, C. Posúdenie expozície 5G RF-EMF počas rozsiahlych verejných podujatí prostredníctvom meraní v teréne.*Prístup k IEEE***2025**, *13*, 150489–150497. [ ]CrossRef]
78. Moraitis, N.; Popescu, I.; Rogaris, A.; Nikita, KS Merania rádiofrekvenčného elektromagnetického žiarenia a hodnotenie expozície z vonkajších základňových staníc 5G. In Zborník z 17. Európskej konferencie o anténach a šírení (EuCAP) 2023, Florencia, Taliansko, 26. – 31. marca 2023; s. 1 – 5. [CrossRef]
79. Chiaraviglio, L.; Lodovisi, C.; Franci, D.; Pavoncello, S.; Aureli, T.; Blepari-Melazzi, N.; Alouini, MS Masívne merania expozície 5G v meste: Metodika a výsledky.*IEEE Open J. Commun. Soc.***2021**,*2*, 2029 – 2048. [CrossRef]
80. Colombi, D.; Ghasemifard, F.; Joshi, P.; Xu, B.; Di Paola, C.; Törnevik, C. Metódy a postupy pre merania in situ vystavenia vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu zo základňových staníc s milimetrovými vlnami 5G.*IEEE Trans. Elektromag. Kompatibilita.***2022**,*64*, 1986–1993. [CrossRef]
81. Migliore, MD; Franci, D.; Pavoncello, S.; Aureli, T.; Merli, E.; Lodovisi, C.; Chiaraviglio, L.; Schettino, F. Aplikácia postupu extrapolácie maximálneho výkonu na hodnotenie vystavenia ľudí milimetrovým vlnám 5G: Výzvy a možné riešenia.*Prístup k IEEE***2022**, *10*, 103438–103446. [CrossRef]
82. Wali, SQ; Sali, A.; Allami, JK; Osman, AF Meranie expozície RF-EMF pre základňovú stanicu 5G v milimetrových vlnách s anténou MIMO. *Prístup k IEEE***2022**, *10*, 9048–9058. [CrossRef]
83. Goegebeur, S.; Deprez, K.; Colombi, D.; Bischoff, JE; Di Paola, C.; Stroobandt, B.; Verloock, L.; Aerts, S.; Törnevik, C.; Joseph, W. Porovnávacia štúdia metodológií in situ na hodnotenie vystavenia RF EMF zo základnej stanice 5G FR2.*Prístup k IEEE* **2024**, *12*, 132552–132564. [CrossRef]
84. Spoločný výbor pre príručky v metrológii.*Vyhodnotenie nameraných údajov – návod na vyjadrenie neistoty merania*; Technická správa JCGM 100:2008; JCGM: Pavillon de Breteuil, Francúzsko, 2008. [CrossRef]
85. Rybakowski, M.; Bechta, K.; Grangeat, C.; Kabacik, P. Vplyv algoritmov tvarovania lúča na skutočnú expozíciu vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu z masívnych základňových staníc MIMO.*Prístup k IEEE***2023**, *11*, 141956–141964. [CrossRef]
86. Di Paola, C.; Joshi, P.; Colombi, D.; Xu, B.; Bischoff, JE; Zhekov, SS; Törnevik, C. Sieťové hodnotenie skutočného EIRP základňových staníc 5G na štadióne so 100 000 ľuďmi a dôsledky pre súlad s normami EMF.*IEEE antény Wireless Propagation Lett.***2025**, *24*, 242–246. [CrossRef]
87. Lee, YS; Jeon, SB; Lee, AK; Kim, K.; Pack, JK; Choi, HD Štúdia o vhodných rozostupoch meraní pre posúdenie zhody inštalácie EMF pre základňovú stanicu 5G s frekvenciou 3,5 GHz.*Prístup k IEEE***2021**,*9*, 88167–88176. [CrossRef]
88. Di Renzo, M.; Zappone, A.; Debbah, M.; Alouini, MS; Yuen, C.; de Rosny, J.; Tretjakov, S. Inteligentné rádiové prostredia posilnené rekonfigurovateľnými inteligentnými povrchmi: Ako to funguje, stav výskumu a cesta vpred.*IEEE J. Selection Areas Commun.***2020**, *38*, 2450–2525. [CrossRef]
89. Costa, F.; Borgese, M. Elektromagnetický model reflexných inteligentných povrchov.*IEEE Open J. Commun. Soc.***2021**,*2*, 1577 – 1589. [CrossRef]
90. Tang, W.; Chen, X.; Chen, MZ; Dai, JY; Han, Y.; Di Renzo, M.; Jin, S.; Cheng, Q.; Cui, TJ Modelovanie strát na dráhe a merania pre rekonfigurovateľné inteligentné povrchy v milimetrovom frekvenčnom pásme.*IEEE Trans. Commun.***2022**,*70*, 6259–6276. [CrossRef]
91. Cui, Z.; Minucci, F.; Hersyandika, R.; Martinez Alonso, R.; Guevara, AP; Sallouha, H.; Pollin, S. Vyhodnotenie elektrického poľa rekonfigurovateľného inteligentného povrchu v bezdrôtových sieťach.*arXiv***2024**, arXiv:2402.13132.http://arxiv.org/abs/2402.13132.
92. Chen, W.; Wen, CK; Li, X.; Jin, S. Prispôsobenie kanálov pre spoločný návrh Tx-RISs-Rx v hybridných mmWave systémoch.*IEEE Trans. Wireless Commun.***2023**,*22*, 8304–8319. [CrossRef]

Vyhlásenie/Poznámka vydavateľa: Vyhlásenia, názory a údaje obsiahnuté vo všetkých publikáciách sú výlučne názormi jednotlivých autorov a prispievateľov a nie názormi MDPI a/alebo redaktora/editorov. MDPI a/alebo redaktor/editori sa zriekajú zodpovednosti za akékoľvek zranenie osôb alebo ujmu na majetku vyplývajúcu z akýchkoľvek nápadov, metód, pokynov alebo produktov uvedených v obsahu.