Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

IEEE Access
Multidisciplinary | Rapid Review | Open Access Journal

Prijaté 6. júla 2026, akceptované 27. júla 2026, dátum publikovania 31. júla 2026, dátum aktuálnej verzie 17. augusta 2026.

Identifikátor digitálneho objektu 10.1109/ACCESS.2026.3718728

RESEARCH ARTICLE

Skúmanie potenciálu prepínania lúčov pre zníženie vystavenia RF-EMF v sieťach 5G mmWave

SUDHA MALIK , (študentský člen, IEEE), ROBBERT SCHULPEN , ULF JOHANNSEN , (vyšší člen, IEEE),
A LAURENS A. BRONCKERS, (hlavný člen, IEEE)
Katedra elektrotechniky, Technická univerzita v Eindhovene, 5612 AP Eindhoven, Holandsko

Korešpondujúci autor: Sudha Malik (s.malik@tue.nl)

Túto prácu podporil program Expozícia elektromagnetickým poliam a zdravie planéty (ETAIN) v rámci projektu 101057216.

ABSTRAKTNa rozdiel od systémov s frekvenciou pod 6 GHz, prenosy mmWave vykazujú úzke lúče a rýchle priestorové zmeny v expozícii rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu (RF-EMF), čo motivuje potrebu vyhodnotenia zníženia expozície. Tento článok predstavuje komplexné experimentálne a štatistické skúmanie potenciálu stratégie zníženia expozície RF-EMF pracujúcej na frekvencii 27 GHz. Navrhovaná metóda vykonáva prepínanie lúčov s riadením vysielacieho výkonu, aby sa udržalo spoľahlivé pripojenie používateľov a zároveň sa znížila expozícia RF-EMF v miestach, kde nie sú používatelia. Štúdia sa vykonáva vo vonkajšom aj vnútornom prostredí s cieľom vyhodnotiť, či prepínanie lúčov dokáže efektívne vyvážiť vysokú priepustnosť dát používateľov s minimalizovanou expozíciou pre nepoužívateľov. Na určenie kvality signálu a úrovní expozície sa používa širokopásmový mmWave kanálový sonar, schopný merať tri rôzne smery vysielacieho lúča, čo umožňuje porovnávacie posúdenie ich kompromisov medzi priepustnosťou dát a expozíciou nepoužívateľov. Merania sa vykonávajú v rôznych prostrediach vrátane otvorených polí, oblastí pokrytých vegetáciou, mestských koridorov a kancelárskych priestorov, ktoré poskytujú komplexné posúdenie za reálnych podmienok. Navrhovaný prístup prepínania lúčov dosiahol zníženie expozície približne o 2 až 3,7 dB vo vonkajšom prostredí a o 0,9 až 6 dB vo vnútornom prostredí v porovnaní s referenčnou metódou. Pokiaľ ide o ekvivalentný izotropný vyžarovaný výkon (EIRP), stredná hodnota pre navrhovanú metódu je v oboch scenároch o 0,9 dB vyššia ako pre referenčnú metódu, čo naznačuje malé zvýšenie vyžarovaného výkonu na udržanie spoľahlivého pripojenia používateľov. Výsledky demonštrujú potenciál adaptívneho prepínania lúčov a riadenia výkonu na vyváženie vysokej priepustnosti používateľov (až 800 Mbps) s minimalizovanou expozíciou v realistických nasadeniach 5G mmWave.

INDEXOVÉ POJMY5G, milimetrové vlny, zníženie expozície RF-EMF, zvukový detektor kanálov, viacerí používatelia a nepoužívatelia.

I. ÚVOD

Zavádzanie sietí piatej generácie (5G) sa rýchlo zrýchľuje vďaka neustálemu rastu dopytu po mobilných dátach, pričom sa očakáva, že globálne predplatné do roku 2030 dosiahnu 6,3 miliardy, čo bude predstavovať približne dve tretiny všetkých mobilných predplatných.[1]Na podporu tohto rýchleho rastu bol spustený projekt partnerstva 3. generácie (3GPP) špecifikoval 5G siete s milimetrovými vlnami (mmWave) pracujúce vo frekvenčnom rozsahu 2 (FR2) v pásme 24,2 – 52,6 GHz, ktoré ponúkajú značné výhody, ako je širšia šírka pásma, vyššie prenosové rýchlosti a zvýšená kapacita siete.[2],[3]Preto sa na zvýšenie sily signálu a potlačenie výrazného útlmu, ku ktorému dochádza pri milimetrových vlnových frekvenciách, používajú techniky ako masívne MIMO (maMIMO) a tvarovanie lúča.[4],[5]Táto zvýšená smerovosť a koncentrácia elektromagnetickej energie však môže potenciálne viesť k zvýšenej rádiofrekvenčnej

Zástupcom redaktora, ktorý koordinoval recenziu tohto rukopisu a schvaľoval ho na publikovanie, bol Claudio Curcio.

2026 Autori. Toto dielo je licencované pod licenciou Creative Commons Attribution 4.0.
Viac informácií nájdete na stránke https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

vystavenie elektromagnetickému poľu (RF-EMF), najmä v hustých rozmiestneniach mmWave[6]Túto výzvu ešte zhoršuje pokročilé tvarovanie lúča, ktoré zlepšuje kvalitu spojenia, ale zároveň spôsobuje, že vystavenie RF-EMF je vysoko závislé od okolitého prostredia a priestorových podmienok.[7]Zložitosť reálnych prostredí vyplýva z fyzikálnych charakteristík okolitého prostredia, ktoré významne ovplyvňujú šírenie mmVĺn, a preto je nevyhnutné pochopiť, ako tieto faktory spoločne ovplyvňujú šírenie signálu aj vystavenie RF-EMF. Najmä vnútorné scenáre prinášajú viaccestné odrazy, prekážky a priestorové obmedzenia, čo vedie k vysoko lokalizovaným a kolísavým intenzitám elektrického poľa.[8],[9],[10]Okrem toho sa parametre kanála, ako napríklad rozptyl oneskorenia strednej kvadratickej hodnoty (RMS) a uhlový rozptyl, výrazne líšia v závislosti od polohy používateľa, čo ešte viac sťažuje odhad expozície RF-EMF.[11],[12]Naproti tomu vonkajšie prostredie prináša značnú variabilitu v dôsledku faktorov, ako je strata vegetácie, mobilita používateľov a dynamické prekážky, ako sú vozidlá a chodci.[13],[14], čo následne vedie k rýchlym výkyvom v prijímanom výkone a úrovniach expozície, najmä v scenároch mestských mikrobuniek a ulíc a kaňonov[15].

Rozsiahly výskum posúdil vystavenie RF-EMF v pásme pod 6 GHz, kde je už rozšírené nasadenie 5G, pričom niekoľko štúdií preukázalo, že úrovne vystavenia sú silne ovplyvnené sieťovou prevádzkou, charakteristikami prostredia a dynamikou formovania lúča.[16],[17], [18],[19],[20],[21]Napríklad merania in situ v komerčnej 5G sieti uvedené v[7]ukazujú, že úrovne expozície sú významne ovplyvnené zaťažením sieťovej prevádzky, zatiaľ čo masívne MIMO tvarovanie lúča zavádza priestorovú a časovú variabilitu expozície[17], čím sa zdôrazňuje potreba charakterizovať správanie RF-EMF za realistických sieťových podmienok. Naproti tomu hodnotenie expozície RF-EMF v rozsahu mmWave zostáva obmedzené kvôli nedávnemu vzniku a prebiehajúcemu vývoju nasadenia mmWave. Niektoré štúdie[22],[23],[24],[25] Zameriavajú sa na empirické merania a metodiky hodnotenia expozície, ktoré ukazujú, že úrovne expozície sú silne ovplyvnené smerovosťou lúča, blízkosťou používateľa a konfiguráciou základňovej stanice. Tieto práce sa však primárne zameriavajú na charakterizáciu expozície RF-EMF zo základňových staníc 5G mmWave, zatiaľ čo stratégie na aktívnu minimalizáciu expozície zostávajú do značnej miery nepreskúmané.

Aby sme prekonali tieto obmedzenia, náš nedávny výskum siaha nad rámec kvantifikácie expozície smerom k vývoju metodík na zníženie expozície, s počiatočným skúmaním prepínania lúčov ako prostriedku na zníženie expozície mmWave v zjednodušenom scenári zahŕňajúcom prípady jedného používateľa a nepoužívateľov.[26]Hoci táto práca demonštruje uskutočniteľnosť zníženia expozície bez zníženia požadovanej dátovej priepustnosti, vyvoláva otázky týkajúce sa jej účinnosti v realistických prostrediach s viacerými používateľmi. Táto práca po prvýkrát skúma potenciál stratégií prepínania lúčov na zníženie expozície RF-EMF pri zachovaní... vysoká dátová priepustnosť v realistických scenároch s viacerými používateľmi a bez nich a systematicky skúma súvisiace kompromisy vyplývajúce z požiadaviek na vysielací výkon.

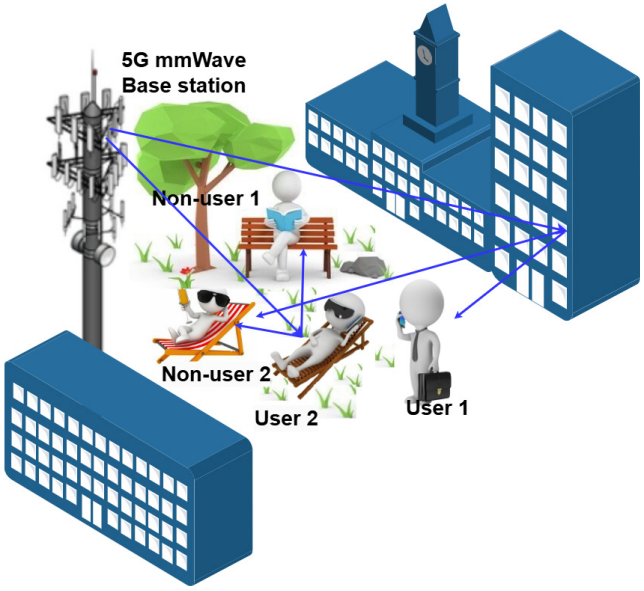
Cieľom tejto práce je preskúmať potenciál zníženia expozície RF-EMF a súvisiace kompromisy medzi konektivitou používateľov, vysielacím výkonom a expozíciou nepoužívateľov, a nie vyvinúť výpočtovo optimalizovaný algoritmus výberu lúča v reálnom čase pre praktické nasadenie základňových staníc 5G. Navrhovaný rámec je zámerne navrhnutý ako offline nástroj na následné spracovanie, ktorý využíva namerané údaje o kanáloch. Meracia kampaň so sondovaním kanálov sa vykonáva na frekvencii 27 GHz vo vnútornom aj vonkajšom prostredí s cieľom vyhodnotiť účinnosť prepínania lúčov za reálnych podmienok. Analýza ďalej zahŕňa požadovaný vysielací výkon základňovej stanice a adaptáciu výkonu špecifickú pre používateľa, čo poskytuje prehľad o praktických obmedzeniach nasadenia. Prepínanie lúčov sa teda kombinuje s dynamickou adaptáciou výkonu základňovej stanice, pri ktorej sa vysielací výkon upravuje podľa polohy používateľa (v súlade s referenčnou metódou) a smeruje lúče tak, aby spĺňali prahové hodnoty rýchlosti prenosu dát špecifické pre používateľa, pričom sa obmedzuje expozícia blízkym nepoužívateľom, čím sa zabezpečí dostatočná konektivita používateľov so zníženou expozíciou RF-EMF pre nepoužívateľov. Vyhodnotením všetkých uskutočniteľných konfigurácií lúčov za nameraných podmienok slúži rámec ako analytický referenčný bod pre posúdenie zníženia expozície pri zachovaní dostatočnej konektivity používateľov.

Zvyšok tohto dokumentu je usporiadaný takto: Časť Druhýpredstavuje metodiku znižovania expozície. Časť III.opisuje nastavenie merania vrátane vonkajších a vnútorných scenárov, ako aj následné spracovanie nameraných údajov. Nakoniec, časťIV.rozoberá výsledky a navrhovanú techniku zníženia expozície.

II. METODOLÓGIA ZNÍŽENIA EXPOZÍCIE

V komunikačných sieťach 5G mmWave je primárnym cieľom zabezpečiť spoľahlivé pripojenie pre používateľov, pričom táto štúdia sa tiež zameriava na minimalizáciu vystavenia RF-EMF pre blízkych nepoužívateľov, čo si vyžaduje vyváženie kompromisov medzi silou prijímaného signálu, vysielacím výkonom základňovej stanice a úrovňami vystavenia. V 5G New Radio (NR) je výber lúča typicky riadený meraniami sily signálu, ako je napríklad prijímaný výkon referenčného signálu synchronizačného signálu (SS-RSRP) alebo indikátor sily prijímaného signálu (RSSI) na používateľskom zariadení (UE). V tejto štúdii je ekvivalentná metrika poskytovaná úrovňami prijímaného výkonu na lúč získanými z meraní sondovania kanála 27 GHz. To umožňuje skúmať potenciál prepínania lúča a adaptácie vysielacieho výkonu v scenároch zahŕňajúcich viacerých používateľov a blízkych nepoužívateľov.

Na obr.1, je znázornený komunikačný systém 5G mmWave, ktorý zobrazuje scenár s dvoma zamýšľanými používateľmi a dvoma nepoužívateľmi v blízkosti. V tejto práci sa nepoužívateľ vzťahuje na osobu, ktorá aktívne neprijíma dátové služby, ale ktorej zariadenie sa považuje za detekovateľné sieťou. Základňová stanica prenáša vysokorýchlostné dáta zamýšľaným používateľom,



OBRÁZOK 1. Ilustrácia scenára expozície 5G mmWave s viacerými osobami nachádzajúcimi sa v blízkosti základňovej stanice 5G mmWave.

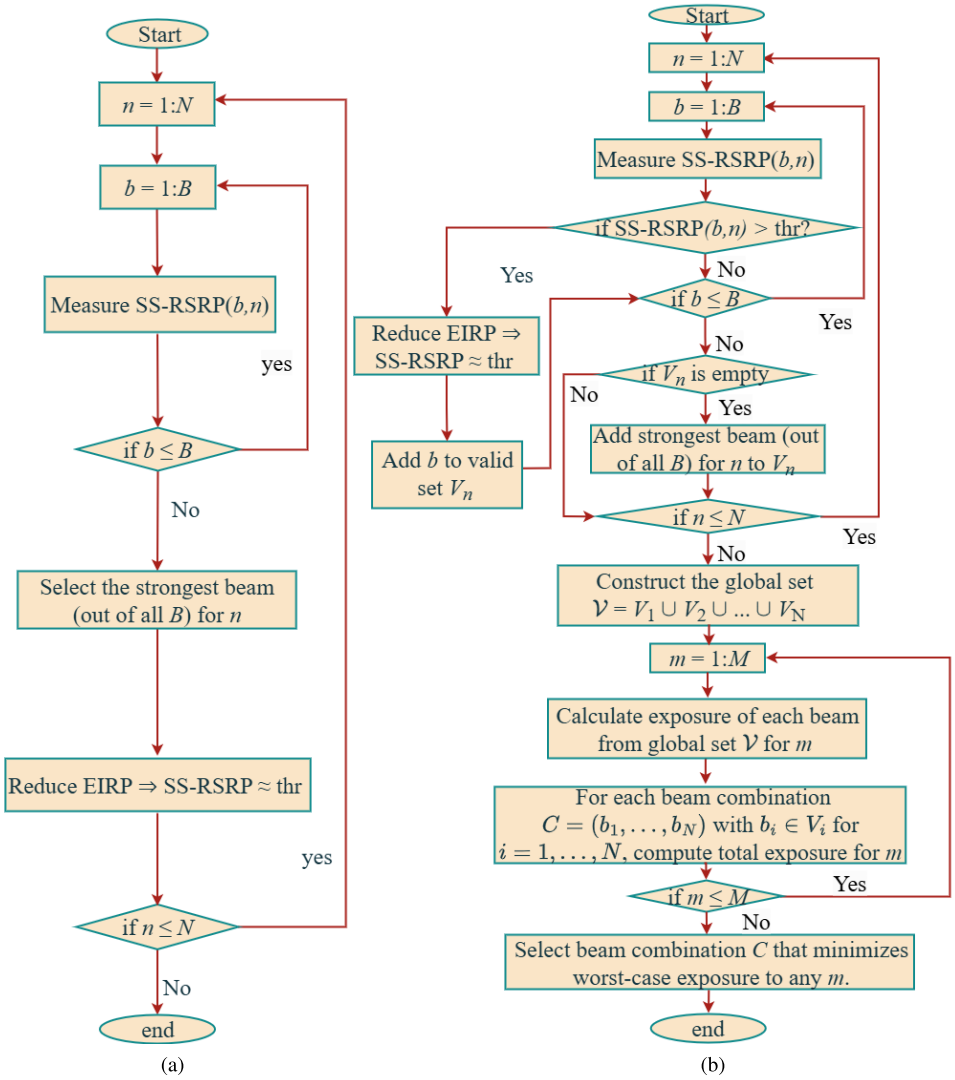
zatiaľ čo nepoužívatelia sa nachádzajú medzi základňovou stanicou a používateľmi bez aktívneho využívania služieb 5G. Napriek tomu, že nie sú aktívnymi používateľmi, nachádzajú sa v prenosovej trase, a preto sú vystavení signálom. To predstavuje výzvu: ako zabezpečiť spoľahlivú komunikáciu pre používateľov a zároveň minimalizovať vystavenie nepoužívateľov rádiofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu? Účinným prístupom je optimalizácia ekvivalentného izotropného vyžarovaného výkonu (EIRP) základňovej stanice a použitie techník prepínania lúčov na udržanie dostatočného SS-RSRP pre používateľov a zároveň obmedzenie zbytočného vystavovania nepoužívateľov. Zatiaľ čo obr.1Pre lepšiu prehľadnosť znázorňuje zjednodušený prípad s dvoma používateľmi a dvoma nepoužívateľmi. Navrhovaný prístup je všeobecný a použiteľný pre scenáre s ľubovoľným počtom používateľov a nepoužívateľov.

Stratégia prepínania lúčov je znázornená na obr.2, ktorá porovnáva referenčnú metódu založenú na postupoch riadenia lúčov definovaných 3GPP[27],[28]s navrhovanou metódou. V oboch metódach je cieľom vybrať najvhodnejší lúč pre používateľov na základe SS-RSRP; navrhovaná metóda však presahuje prístup založený na 3GPP tým, že dodatočne minimalizuje najhorší prípad vystavenia RF-EMF nepoužívateľom. V referenčnej metóde je proces výberu lúča pre viacerých používateľov relatívne jednoduchý, ako je znázornené na obr.2 písm. a)Proces začína nastavením indexu pre používateľa (n) a lúč (b). Pre každého používateľa, $SS-Odporúčaná\ maloobchodná\ cena$sa vyhodnocuje vo všetkých lúčoch a potom sa vyberie najsilnejší lúč, koncepčne podľa postupu riadenia lúčov 3GPP na základe meraní referenčného signálu[28]Po výbere vhodného lúča sa EIRP upraví tak, aby spĺňal požadovaný prah SS-RSRP (SS − RSRP≈thr) a proces sa opakuje pre ďalšieho používateľa. Tento prístup sa zameriava výlučne na zabezpečenie dostatočnej sily signálu pre používateľov bez zohľadnenia vystavenia nepoužívateľov.

Navrhovaná metóda slúži ako analytický rámec, ktorý zdôrazňuje základné kompromisy medzi pripojením používateľa a znížením vystavenia RF-EMF. Ako je znázornené na obr.2 písm. b), rozširuje referenčnú metódu začlenením expozície nepoužívateľa do procesu výberu lúča. Podobne ako pri referenčnej metóde, postup začína iteráciou cez používateľa (n) a lúč (b), kde sa pre každý lúč vyhodnocuje SS-RSRP na určenie sily signálu. Ak je SS-RSRP väčšia ako prahová hodnota signálu, potom sa EIRP zníži, aby sa dosiahla prahová hodnota, a lúč sa pridá do platnej sady (V_n). Ak je signál pod prahovou hodnotou alebo ju dosiahol, nevykoná sa žiadna ďalšia úprava a najsilnejší lúč pre používateľa (n) sa pridá k platnej množine (V_n). Po spracovaní všetkých používateľov sa globálna sada kandidátskych lúčov zostaví ako $V = V_1 \cup V_2 \cup \cdots \cup V_N$.Pre každý lúč, ktorý je k dispozícii v globálnej sade lúčov, expozícia voči nepoužívateľom (m). Následne sa vyhodnotia všetky možné kombinácie lúčov od rôznych používateľov, aby sa určila kumulatívna expozícia každého nepoužívateľa ($C = (b_1, \ldots, b_N)$ s $b_j \in V_j$). Po posúdení všetkých nepoužívateľov sa vyberie lúč, ktorý minimalizuje najhorší možný prípad vystavenia nepoužívateľov a zároveň spĺňa prahovú hodnotu SS-RSRP pre používateľa. Navrhovaný prístup preto efektívne vyvažuje dva kritické ciele: udržiavanie spoľahlivého pripojenia pre používateľov a zníženie vystavenia RF-EMF pre nepoužívateľov. Navyše, zameraním sa na najhorší možný prípad vystavenia namiesto priemerného vystavenia, navrhovaná metóda obmedzuje tvorbu hotspotov v hustých rozmiestneniach a poskytuje praktické a robustné riešenie pre reálne scenáre. Treba poznamenať, že navrhovaný algoritmus výberu lúča nevyžaduje explicitnú znalosť geografických polôh alebo súradníc používateľov a nepoužívateľov. Namiesto toho proces výberu lúča funguje na základe nameraných hodnôt SS-RSRP spojených s dostupnými konfiguráciami lúčov. Pripojenie používateľov sa vyhodnocuje pomocou metriky SS-RSRP, zatiaľ čo vystavenie nepoužívateľov sa kvantifikuje pomocou zodpovedajúcej sily elektrického poľa odvodenej z meraní. Hoci sa v meracej kampani berú do úvahy rôzne polohy používateľov a nepoužívateľov, proces výberu lúča sa nespolieha na informácie o polohe a používa iba súvisiace metriky sily signálu a expozície. Predpokladá sa, že základňová stanica má prístup k úrovniam signálu alebo podmienkam expozície takýchto nepoužívateľov. Tento predpoklad sa prijíma na preskúmanie potenciálnej schopnosti navrhovanej stratégie výberu lúča znížiť expozíciu RF-EMF. V praktických sieťach môžu byť takéto informácie dostupné prostredníctvom postupov v režime nečinnosti, ako je výber a opätovný výber bunky.[32]Okrem toho sa očakáva, že nové technológie integrovaného snímania a komunikácie (ISAC) umožnia budúcim bezdrôtovým sieťam odhadnúť SS-RSRP alebo podobné informácie o sile signálu, ktoré vyžaduje navrhovaný algoritmus výberu lúča pre pasívne alebo nepripojené zariadenia.[33].

III. EXPERIMENTÁLNA METÓDA

Táto časť opisuje experimentálnu metodiku použitú na vyhodnotenie navrhovaného prístupu k zníženiu RF-EMF



OBRÁZOK 2. Vývojové diagramy ilustrujúce (a) referenčnú metódu a (b) navrhovaný algoritmus prepínania lúčov. Pre každého používateľa n=1:N, SS−RSRP sa meria pre každý index lúča b=1:B. V referenčnej metóde (a) je lúč s maximálnym SS−RSRP(b, n) sa vyberie a EIRP sa znižuje, kým SS − RSRP≈V navrhovanej metóde (b) sa každý lúč vyhodnocuje porovnaním SS−RSRP(b, n) s prahovou hodnotou.
Ak SS − RSRP(b, n)>EIRP sa znižuje až do SS−RSRP≈thr a lúč je uložený v platnej sade V_n Ak je SS − RSRP pod prahovou hodnotou alebo už na nej, nepoužije sa žiadna úprava výkonu a najsilnejší lúč pre používateľa n sa pridáva k V_n Globálna sada kandidátov sa potom vytvorí ako V = V_1 ∪ V_2 ∪ · · · ∪ V_N. Pre každú kombináciu nosníkov C = (b_1, . . . , b_N) s b_i ∈ V_i, expozícia pre každého, kto nie je používateľom m=1:M sa vypočíta a kombinácia, ktorá minimalizuje najhorší prípad expozície spomedzi všetkých m je vybrané ako optimálne. To zaisťuje vyvážené riadenie vysielacieho výkonu pri zachovaní pokrytia používateľa a minimalizácii vystavenia RF-EMF nepoužívateľom.

expozícia v realistických scenároch nasadenia. Aby sa zabezpečilo komplexné posúdenie, štúdia zohľadňuje vonkajšie aj vnútorné prostredie. Vonkajšie prostredie zvyčajne vykazuje podmienky, ako je dominancia priamej viditeľnosti (LoS) a väčšie oblasti pokrytia. Naproti tomu vnútorné prostredie, ako sú kancelárske budovy, zahŕňa reflexné povrchy a viaccestné šírenie, čo môže výrazne meniť úrovne expozície. Analýzou oboch prostredí táto štúdia poskytuje prehľad o problémoch s expozíciou, s ktorými sa možno stretnúť v praktických scenároch. Experimentálne overenie je štruktúrované nasledovne: najprv je opísané nastavenie merania, po ktorom nasledujú scenáre vonkajšieho a vnútorného merania. Nakoniec, Je prezentovaný prístup k následnému spracovaniu, kde sa hodnoty intenzity elektrického poľa extrahujú na použitie ako vstup pre algoritmy zobrazené na obr.2.

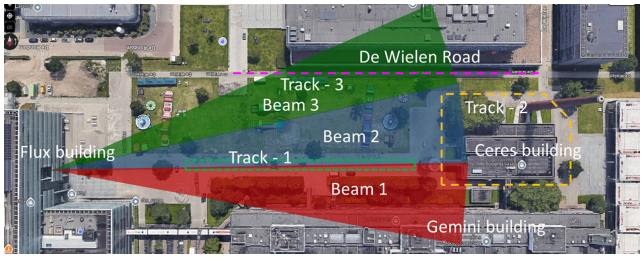
A. NASTAVENIE MERANIA

Meracia kampaň využívala kanálový sonder pracujúci v konfigurácii s viacerými vstupmi a jedným výstupom (MISO). Vysielač (Tx) využíval tri vertikálne polarizované trychtýrové antény s vysokým ziskom, z ktorých každá poskytovala zisk antény 24 dBi. Tieto antény vykazujú šírku lúča (HPBW) s polovičným výkonom 10◦vo vertikálnej rovine a 11◦v horizontálnej rovine. Označenia Nosník 1, Nosník 2 a Nosník 3 v oboch

Vonkajšie a vnútorné scenáre zodpovedajú príslušným orientáciám lúča antény základňovej stanice použitej počas experimentov. Na strane prijímača bola na zachytenie prichádzajúcich signálov použitá vertikálne polarizovaná všesmerová anténa so ziskom 3 dBi. Vysielacie antény sú umiestnené vo výške 1,8 m, zatiaľ čo prijímacia anténa je umiestnená vo výške 1,5 m. Antény Tx aj Rx sú namontované na samostatných mobilných vozíkoch. Tx a Rx sú počas merania synchronizované v časovej aj frekvenčnej doméne, pričom synchronizácia sa udržiava pomocou 10 MHz rubídiových hodín inštalovaných na oboch vozíkoch. Pre každý kanál kanálového sonára sa vykonáva kalibrácia za sebou. Podrobný popis architektúry kanálového sonára, princípov fungovania a metodiky kalibrácie nájdete v[29].

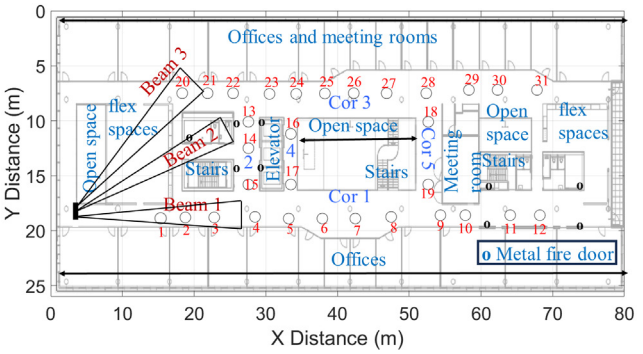
B. SCENÁR VONKAJŠIEHO MERANIA

Meracia kampaň v exteriéri sa uskutočňuje v areáli TU/e na otvorenom poli obklopenom budovami so sklenenými a kovovými fasádami, ako aj v oblastiach porastených stromami. Scenár merania vrátane trajektórií prijímača a polohy vysielača je znázornený na obr.3Vysielač je nainštalovaný na balkóne štvrtého poschodia budovy Flux vo výške 17,4 m nad prízemím. Merania sa vykonávajú na vzdialenostiach od 50 m do 258 m. Kampaň zahŕňa tri odlišné prijímacie stopy znázornené bodkovanými čiarami, ako napríklad Stopa 1, Stopa 2 a Stopa 3, ktoré sú opísané v nasledujúcej časti:



OBRÁZOK 3. Nastavenie merania a trajektórie prijímača pre experiment s intenzitou vonkajšieho elektrického poľa vykonaný na pôde TU/e, zobrazujúci tri scenáre tvarovania lúča: Lúč 1 červenou farbou, Lúč 2 modrou farbou a Lúč 3 zelenou farbou. Trajektórie prijímača sú znázornené bodkovanými čiarami.

- Trať 1: Táto trať vedie rovnobežne s otvoreným poľom pred budovou Flux a poskytuje trasu LoS s menšími možnými prekážkami z blízkych stromov. Rovnako ako v typických kanáloch LoS sa môžu stále vyskytovať viaccestné zložky v dôsledku odrazov a rozptylu od okolitých povrchov.
- Trasa 2: Táto trasa prechádza cez oblasť porastenú stromami okolo budovy Ceres. Meracia kampaň sa vykonáva v tejto oblasti s cieľom preskúmať vplyv lístia a okolitých štruktúr na podmienky šírenia.
- Trasa 3: Táto trať sleduje cestu De Wielen a vedie paralelne s budovou s veľkými sklenenými a kovovými stenami. Táto trať je zámerne zahrnutá s cieľom preskúmať šírenie v prostrediach, kde sú sklenené a kovové povrchy...



OBRÁZOK 4. Scenár merania v interiéri v budove Flux na Technickej univerzite v Eindhovene, ktorý predstavuje typické kancelárske prostredie a zobrazuje tri scenáre tvarovania lúča: Lúč 1, Lúč 2 a Lúč 3. Červené očíslované kruhy označujú miesta merania.

Očakáva sa, že štruktúry spôsobia silné odrazy a rozptyl.

C. SCENÁR MERANIA V INTERIÉRI

Merania v interiéri sa vykonávajú v kancelárskom prostredí na 9. poschodí budovy Flux na Technickej univerzite v Eindhovene, ako je znázornené na obr.4Budova predstavuje typické moderné kancelárske prostredie, ktoré sa vyznačuje kombináciou otvorených priestorov, chodieb, zasadacích miestností, kancelárií a štrukturálnych prvkov, ako sú kovové protipožiarne dvere a schodiská. Fyzické rozmery podlahy sú približne 80 m na dĺžku a 25 m na šírku. Miesta merania, označené červenými kruhmi, sú systematicky vybrané tak, aby zahŕňali scenáre LoS aj mimo priamej viditeľnosti (NLoS). Tieto miesta zahŕňajú otvorené priestory, pozície za stenami, oblasti v blízkosti kovových konštrukcií a križovatky chodieb, čím umožňujú komplexné posúdenie variability priestorovej expozície vo vnútornom prostredí. Zvolené vnútorné prostredie preto zavádza komplexné efekty šírenia, vrátane viaccestného šírenia, odrazov, difrakcie a útlmu v dôsledku prekážok. Toto nastavenie umožňuje realistické vyhodnotenie navrhovanej techniky prepínania lúčov pri vyvažovaní kvality signálu a expozície RF-EMF v praktických podmienkach vnútorného nasadenia.

D. NÁSLEDNÉ SPRACOVANIE

Po zbere údajov sa implementuje pracovný postup následného spracovania na analýzu expozície RF-EMF. Výstup z kanálového sondera sa získa vo forme impulznej odozvy kanála (CIR), označenej ako*hod*.Pre každý merací bod sa zaznamená 50 snímok na zlepšenie pomeru signálu k šumu. Profil oneskorenia výkonu (PDP) pre lúč *b*sa potom vypočíta spriemerovaním druhej mocniny veľkosti zodpovedajúcich CIR cez všetky snímky, ako je vyjadrené v(1):

$$p(\tau)_b = \frac{1}{N_s}\sum_{k=1}^{N_s} \left| hod_{k,b}(\tau) \right|^2 \quad (1)$$

kde,$p(\tau)_b$predstavuje PDP pre daný smerový lúč z Tx$_b$, s$b$označujúce nosníky 1, 2 a 3. Termín$hod_{k,b}(\tau)$

vzťahuje sa na impulznú odozvu kanála vysielaného lúča Tx$_b$pre$k$snímka a$N_s$označuje počet snímok.

Pre odhad straty dráhy sa berú do úvahy iba vzorky nad šumovou spodnou hranicou s dynamickým rozsahom systému 20 dB. Strata dráhy (PL_b) pre každý lúč sa vypočíta z PDP pomocou rovnice(2),

$$PL_b = -10 \log_{10}\left(\sum_{\tau \geq \tau_{TH,b}} 10^{\frac{p(\tau)_b}{10}}\right) \quad (2)$$

kde$\tau_{TH,b}$zodpovedá vzorke nad prahovou hodnotou šumu. Na posúdenie expozície RF-EMF sa nameraná sila elektrického poľa normalizuje na realistické úrovne EIRP vo vonkajšom a vnútornom prostredí, ktoré odrážajú prevádzkové podmienky základňových staníc 5G v reálnom svete. V vonkajšom prostredí sa predpokladá praktický EIRP 50 dBm.[2], zatiaľ čo pre vnútorný scenár sa uvažuje 43 dBm, pričom v oboch prípadoch sa použije zisk prijímacej antény 11 dBi[30]Konečné odhady expozície zahŕňajú nameranú stratu dráhy, zisk prijímača a EIRP, čo poskytuje realistické a konzistentné hodnotenie úrovní RF-EMF v celom prostredí. Kľúčové predpoklady použité v tejto experimentálnej validácii sú zhrnuté v tabuľke1.

TABUĽKA 1.Kľúčové parametre sa predpokladajú na reprezentáciu základňovej stanice 5G mmWave.

Properties	*Values*	*Units*
EIRP (Indoor)	43	dBm
EIRP (Outdoor)	50	dBm
Rx antenna gain	11	dBi
Bandwidth	400	MHz
SS-RSRP threshold	-65	dBm
Data rate	800	Mbps
Electric field strength threshold	-30.2	dBV/m

Sila prijatého signálu je odvodená zo sondážnych signálov a je označená ako SS-RSRP kvôli konzistencii s navrhovaným algoritmom kompatibilným s 5G. Sila prijatého signálu (*SS–Odporúčaná maloobchodná cena*$_b$) pre používateľa spojeného s lúčom $b$sa vypočíta ako:

$$SS\text{–}Odporúčaná\ maloobchodná\ cena_{(b)}(dBm) = EIRP - PL_b + G_{záznam.} \quad (3)$$

Výsledný*SS–Odporúčaná maloobchodná cena*$_b$sa porovnáva s prahovou hodnotou −65 dBm, ktorá zodpovedá minimálnej úrovni prijímaného signálu potrebnej na podporu cieľovej prenosovej rýchlosti 800 Mbps. Prahová hodnota je odvodená z analýzy rozpočtu linky v[30] pre šírku pásma kanála 400 MHz a cieľovú dátovú rýchlosť 800 Mbps a konzistentne sa uplatňuje v interiérových aj exteriérových scenároch. Pri hodnotení, či daný lúč poskytuje dostatočnú konektivitu pre používateľa, sa predpokladá zisk prijímacej antény 11 dBi. Na vyjadrenie výkonu v lineárnej mierke sa hodnota prevedie z dBm na watty pomocou referenčnej hodnoty 1 mW:

$$SS\text{–}Odporúčaná\ maloobchodná\ cena_{(b)}(watty) = 10^{(SS\text{–}RSRP_{(b)}(dBm))/10}/1000 \quad (4)$$

Pre nepoužívateľov sa vystavenie RF-EMF kvantifikuje priamo z hľadiska sily elektrického poľa.

$$V_b = 20 \log_{10}\left(\sqrt{\frac{SS\text{–}Odporúčaná\ maloobchodná\ cena_{(b)}(lineárne)}{A_e}} \cdot 377\right) \quad (5)$$

Tu,$V_b$označuje intenzitu elektrického poľa spojenú s každým lúčom$b$(t. j. nosníky 1, 2 a 3) a tri zodpovedajúceV_b hodnoty sa vypočítavajú pre tieto nosníky. Keďže SS-RSRP už zahŕňa zisk prijímača$G_{záznam}$a efektívna clona A_eAj keď zahŕňa zisk prijímacej antény, tento člen sa pri hodnotení intenzity elektrického poľa vyruší. V dôsledku toho sa zmeny elektrického poľa naprieč lúčmi primárne pripisujú podmienkam šírenia. Tento vzťah sa používa na prevod nameraného prijatého výkonu na intenzitu elektrického poľa, ktorá slúži ako metrika expozície v následnej analýze. Rozlišovaním medzi konektivitou používateľa, vyjadrenou prostredníctvom SS-RSRP, a expozíciou nepoužívateľa, kvantifikovanou prostredníctvom intenzity elektrického poľa, analýza poskytuje ucelený rámec pre hodnotenie kompromisu medzi komunikačným výkonom a expozíciou RF-EMF za realistických podmienok nasadenia.

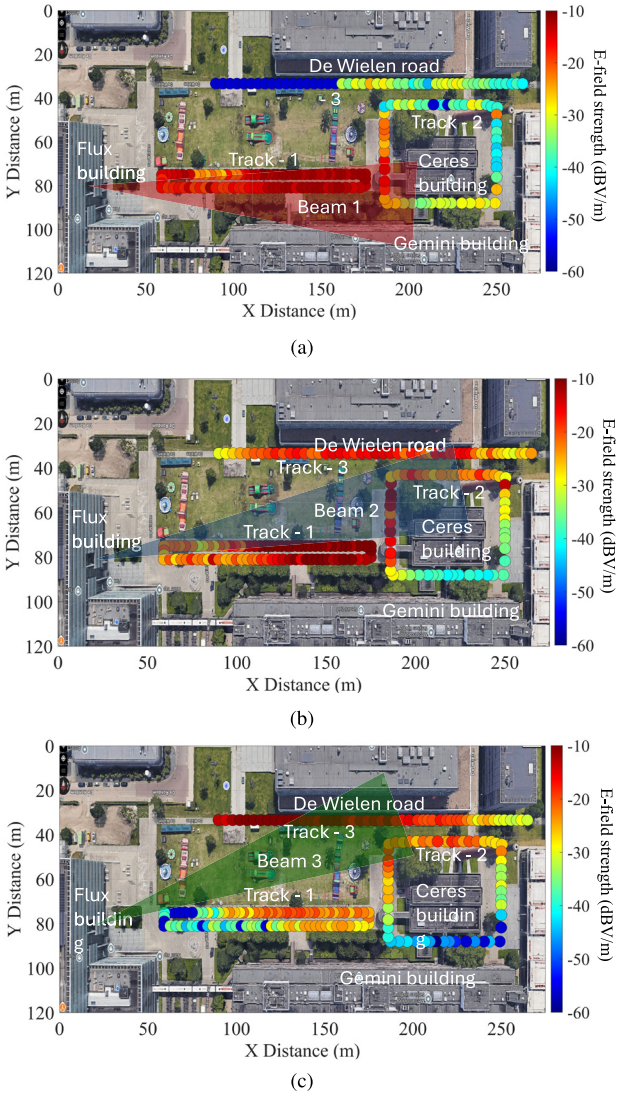
IV. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Táto časť predstavuje experimentálne výsledky a analýzu výkonnosti navrhovanej techniky prepínania lúčov na zníženie expozície RF-EMF a úpravu EIRP na základe nameraných hodnôt SS-RSRP zodpovedajúcich rôznym podmienkam používateľa vo vonkajších aj vnútorných scenároch. Analýza začína vyhodnotením rozloženia intenzity elektrického poľa v rôznych scenároch merania. Ďalej je prezentované zníženie expozície dosiahnuté navrhovanou metódou v porovnaní s referenčným prístupom. Nakoniec analyzujeme EIRP, aby sme určili požadovaný výkon na splnenie prahovej hodnoty SS-RSRP (–65 dBm) podľa navrhovanej metódy znázornenej na obr.2.

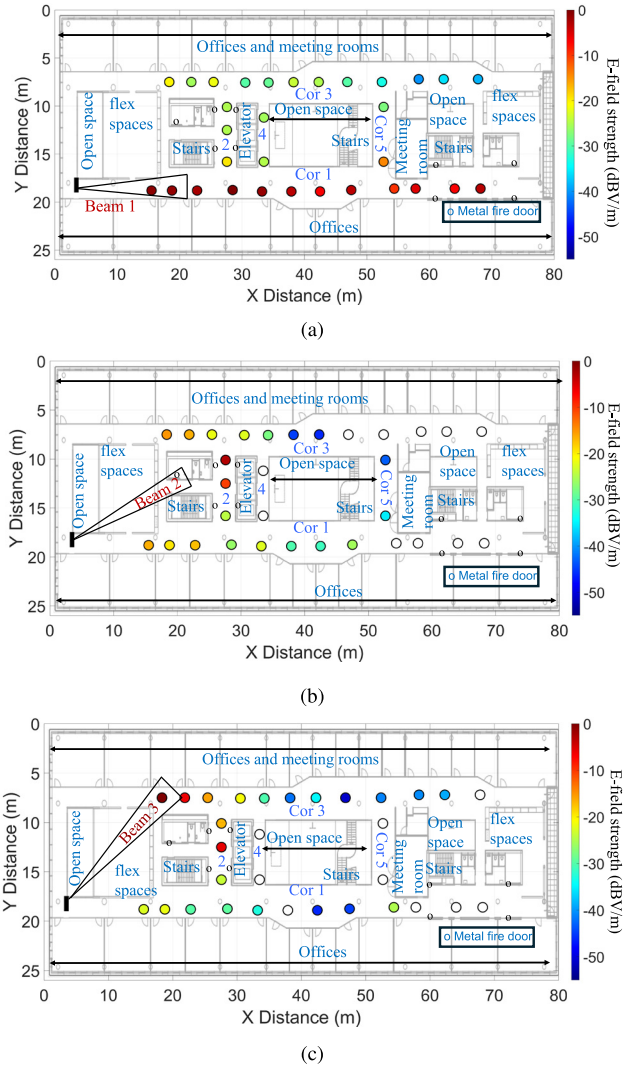
A. ROZLOŽENIE A ANALÝZA EXPOZÍCIE

Obr.5predstavuje priestorové rozloženie nameranej intenzity elektrického poľa vo vonkajšom prostredí pre tri konfigurácie lúčov, označené ako Lúč 1, Lúč 2 a Lúč 3. Farebne odlíšené tepelné mapy znázorňujú intenzitu elektrického poľa v dBV/m na rôznych miestach merania v danom prostredí.

Na obr.5(a)Lúč 1 je orientovaný smerom k dráhe 1, čo má za následok dominantný stav LoS a zvýšenú intenzitu poľa pozdĺž tejto dráhy, v rozsahu od −9 dBV/m do −17 dBV/m. Pozdĺž dráhy 2 (okolo budovy Ceres), ktorá prechádza oblasťou porastenou stromami, sa intenzita poľa pohybuje prevažne medzi −15 a −30 dBV/m. Je pozoruhodné, že na ďalekom východnom konci budovy Ceres, oproti vysielaču vo Fluxe, namerané intenzity elektrického poľa klesajú na približne −42 dBV/m, čo zdôrazňuje významný útlm spôsobený blokovaním budovou v podmienkach NLoS. Naproti tomu pozdĺž dráhy 3 (cesta De Wielen), kde sa prijímač pohybuje rovnobežne s reflexnou budovou.



OBRÁZOK 5. RF-EMF (v dBV/m) na rôznych miestach vo vonkajšom prostredí pre tri scenáre tvarovania lúča: (a) Lúč 1, (b) Lúč 2 a (c) Lúč 3. Farebný pruh vpravo označuje úroveň expozície, kde červená a modrá zodpovedajú vyššej a nižšej intenzite elektrického poľa.



OBRÁZOK 6. Rozloženie RF-EMF (dBV/m) v interiéroch pre tri scenáre tvarovania lúča: (a) Lúč 1, (b) Lúč 2 a (c) Lúč 3. Farebný pruh vpravo označuje úroveň expozície, pričom červená zodpovedá vyššej intenzite elektrického poľa a modrá nižšej intenzite elektrického poľa.

fasáda, začínajúc na západnom konci pri budove Flux, má najnižšiu intenzitu poľa (okolo –56 dBV/m) a smerom na východ sa zvyšuje.koniec rn v blízkosti budovy Ceres, dosahujúc hodnoty medzi −25 dBV/m a −40 dBV/m. Toto správanie je spôsobené predovšetkým tým, že lúč 1 nie je smerovaný na túto trať, čo spôsobuje, že časti trasy spadajú mimo hlavnej lalok a dosahujú lepšie pokrytie iba s postupom prijímača pozdĺž dráhy. Obr.5(b)zodpovedá lúču 2, ktorý je orientovaný smerom k centrálnej oblasti poľa. Je pozoruhodné, že sila elektrického poľa sa zvyšuje so vzdialenosťou pozdĺž dráhy 1, od približne -25 dBV/m v blízkosti toku budovy na približne −7 dBV/m smerom k vzdialenejšiemu koncu trate. Tento trend sa odchyľuje od očakávaného útlmu vo voľnom priestore a pravdepodobne sa pripisuje uhlu elevácie antény, ktorý umiestňuje počiatočnú časť trate čiastočne mimo hlavného laloku, spolu s dodatočným blokovaním z blízkych stromov. Ako prijímač postupuje pozdĺž trate, vstupuje do hlavného lalok so zníženou prekážkou, čo vedie k vyšším nameraným intenzitám poľa. Trať-2 je tiež dobre pokrytá, pričom sila elektrického poľa sa pohybuje od približne -42 dBV/m do −10 dBV/m. Najvyššie intenzity poľa (približne −10 až V úseku medzi ulicou De Wielen a budovou Ceres sa pozorujú hodnoty (okolo −20 dBV/m), zatiaľ čo najnižšie hodnoty (okolo −41 dBV/m) sa vyskytujú v oblasti medzi budovami Gemini a Ceres. Na trase Track-3 (ulica De Wielen) je sila poľa približne −27 dBV/m blízko konca najbližšieho k budove Flux a postupne sa zvyšuje na približne − 14 dBV/m smerom k opačnému koncu. Toto celkové správanie je primárne určené vyžarovacím diagramom vysielacej antény. Na obr.5(c)Lúč 3 je nasmerovaný smerom k Track-3 (cesta De Wielen), čo má za následok najvyššiu intenzitu poľa pozdĺž tejto trasy. Namerané úrovne sa pohybujú od približne –12 dBV/m v blízkosti strany otočenej k budove Flux do približne –7 dBV/m okolo stredu, čo naznačuje silný

zložka v zornom poli, pravdepodobne v dôsledku konštruktívnej interferencie od odrazov od priľahlej sklenenej fasády. Smerom k opačnému koncu trate sa intenzita poľa postupne znižuje na približne –25 až –30 dBV/m so zväčšujúcou sa vzdialenosťou od vysielača a prijímačom, ktorý sa pohybuje smerom k okraju hlavného lúča, s dodatočným útlmom od okolitých štruktúr. Naproti tomu Trať 1 vykazuje výrazne nižšie úrovne poľa, najmä v blízkosti svojho východiskového bodu blízko budovy Flux, kde pole klesá na približne –56 dBV/m v dôsledku obmedzeného prekrytia s hlavným lúčom. Pozdĺž Trať 2 v blízkosti budovy Ceres je intenzita poľa porovnateľne nižšia, typicky sa pohybuje medzi
−18 dBV/m a −25 dBV/m v dôsledku zvýšeného útlmu z listov a čiastočného blokovania okolitými štruktúrami. Toto zhoršenie sa stáva výraznejším v oblasti medzi budovami Gemini a Ceres, kde pole ďalej klesá na približne −56 až −63 dBV/m v dôsledku kombinovaného účinku listov a prekážok spôsobených budovami.

Rozloženie intenzity elektrického poľa pre tri lúče vo vnútornom prostredí je znázornené na obr.6, vyjadrené v dBV/m. Lúč 1, ako je znázornené na obr.6(a), je zarovnaný s koridorom 1 a vykazuje najvyššiu intenzitu poľa v dôsledku priameho šírenia LoS pozdĺž tejto dráhy. Zaznamenané hodnoty sa pohybujú od približne 0,4 dBV/m vo vrchole do -40 dBV/m v najnižších bodoch. Ako je vidieť na obr.6(b) Meracie body pozdĺž koridoru 2 vykazujú vyššiu intenzitu poľa v porovnaní so susednými oblasťami, a to aj napriek prítomnosti medziľahlých stien. Toto správanie naznačuje, že signál je efektívne vedený pozdĺž koridoru prostredníctvom viacerých odrazov od stien a stropov. Pozorovaná zmena intenzity poľa v rozmedzí od -3 dBV/m do
− 44,9 dBV/m, čo naznačuje výrazné viaccestné efekty s pozoruhodnými fluktuáciami v blízkosti oblasti výškovky. Na obr.6(c)Je znázornený lúč 3, ktorý smeruje do koridoru 3. Intenzita poľa je najvyššia v blízkosti vysielača a postupne klesá so vzdialenosťou, s hodnotami v rozmedzí od vrcholu približne 0,9 dBV/m do minima -51,3 dBV/m. Je pozoruhodné, že v určitých lokalitách NLoS zostáva signál pod prahom šumu, čo vedie k oblastiam bez detekovateľného príjmu. Tieto oblasti, označené bielymi kruhmi, zvýrazňujú lokality s výrazným útlmom v dôsledku blokovania a nepriaznivých podmienok šírenia.

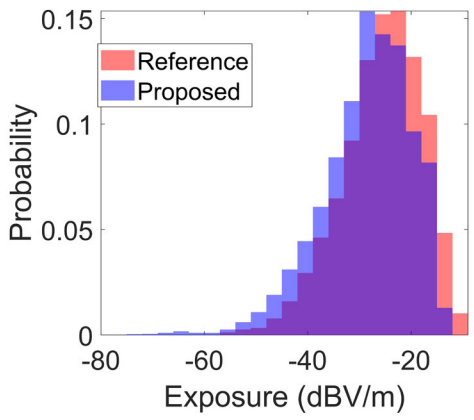
Celkovo sa nameraná sila elektrického poľa v rámci troch lúčov pohybuje od -7 dBV/m do -63 dBV/m vo vonkajšom prostredí a od 0,9 dBV/m do -51,3 dBV/m vo vnútornom prostredí. Pre porovnanie, smernice ICNIRP pre 27 GHz stanovujú limity 61 V/m (35,7 dBV/m) pre širokú verejnosť a 137 V/m (42,7 dBV/m) pre vystavenie hluku v práci.[31]Tieto výsledky ukazujú, že všetky namerané úrovne polí zostávajú výrazne pod predpísanými limitmi expozície. Napriek tomu je ďalšie znižovanie expozície naďalej relevantné, keďže niekoľko krajín uplatňuje preventívne obmedzenia RF-EMF, ktoré sú prísnejšie ako odporúčania ICNIRP.[34],[35]Táto vizualizácia intenzity elektrického poľa vo vonkajšom aj vnútornom prostredí jasne demonštruje silný vplyv smerovosti lúča na priestorové rozloženie expozície RF-EMF a zdôrazňuje dôležitosť výberu lúča pri minimalizácii expozície pre nepoužívateľov v potenciálne zraniteľných lokalitách. Priestorové vzorce pozorované v tomto dokumente slúžia ako základ pre aplikáciu navrhovanej stratégie prepínania lúčov a kvantitatívne vyhodnotenie jej výkonnosti prostredníctvom analýzy uvedenej v nasledujúcej časti.

B. ZNÍŽENIE EXPOZÍCIE A ANALÝZA VÝKONU PRE SCENÁR S DVOMA POUŽÍVATEĽMI A DVOMA NEPOUŽÍVATEĽMI VO VONKAJŠOM A VNÚTORNOM PROSTREDÍ

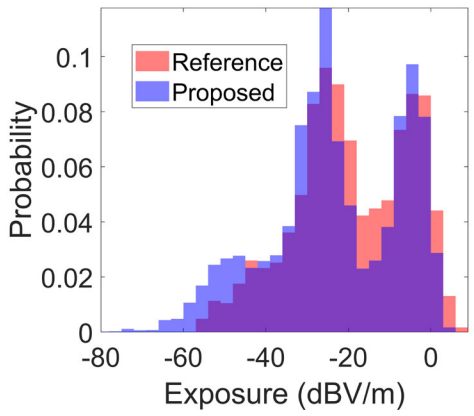
V tejto časti sa hodnotia charakteristiky zníženia expozície a vysielacieho výkonu pre scenár s dvoma používateľmi a dvoma nepoužívateľmi vo vonkajšom aj vnútornom prostredí. Úrovne expozície referenčnej a navrhovanej metódy sa najprv porovnávajú pomocou funkcie hustoty pravdepodobnosti (PDF), po čom nasleduje analýza založená na kumulatívnej distribučnej funkcii (CDF) pre ďalšiu kvantifikáciu. Nakoniec sa zodpovedajúce požiadavky na vysielací výkon skúmajú pomocou rozdelení EIRP, aby sa posúdil kompromis medzi znížením expozície a vysielacím výkonom.

Obr.7predstavuje PDF expozície RF-EMF (v dBV/m) vo vonkajšom aj vnútornom prostredí. Vo vonkajšom prostredí navrhovaná metóda posúva rozloženie expozície smerom k nižším intenzitám poľa v porovnaní s referenčnou metódou, ako je znázornené na obr.7(a)Priemerná a mediánová úroveň expozície sa znižujú približne o 2,9 dB a 2,7 dB. Hoci obe rozdelenia vykazujú podobné tvary, krivka pre navrhovanú metódu vykazuje jasný posun doľava, čo naznačuje konzistentne nižšie úrovne expozície v porovnaní s referenčnou metódou. To potvrdzuje, že navrhovaná stratégia prepínania lúčov účinne znižuje celkovú expozíciu vo vonkajšom prostredí. Vnútorné rozdelenie agreguje merania z troch koridorov znázornených na obr.7(b) Navrhovaná metóda dosahuje zreteľné zníženie úrovní expozície, pričom priemerné a mediánové hodnoty sa znižujú približne o 3,9 dB a 4,3 dB. Zatiaľ čo oba histogramy vykazujú podobnú viacvrcholovú štruktúru, navrhovaná metóda sa konzistentne posúva smerom k nižším úrovniam expozície s väčším podielom vzoriek pod
−30 dBV/m, zatiaľ čo referenčná metóda vykazuje vyššiu koncentráciu vzoriek nad približne −25 dBV/m. To naznačuje, že aj vo vysoko reflexných prostrediach s výraznou priestorovou variabilitou navrhovaná metóda účinne znižuje výskyt vysokej expozície.

Obr.8znázorňuje CDF expozície RF-EMF (v dBV/m) pre vonkajšie aj vnútorné scenáre. Vo vonkajšom prípade, ako je znázornené na obr.8(a)Navrhovaná metóda posúva rozloženie smerom k nižším intenzitám poľa, čím dosahuje zníženie približne o 2 – 3,7 dB vo väčšine percentilov. Pri mediáne (50 % CDF) sa intenzita poľa znižuje z –25 dBV/m pre referenčnú metódu na –27,6 dBV/m pre navrhovanú metódu, čo zodpovedá zníženiu približne o 2,6 dB. Pri vyšších percentiloch (70 – 90 %) zostáva zníženie zrejmé, okolo 2 – 2,3 dB, čo naznačuje, že navrhovaná metóda tiež zmierňuje maximálne úrovne expozície,

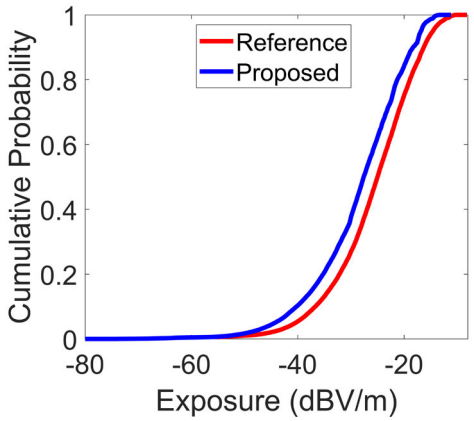


(a)

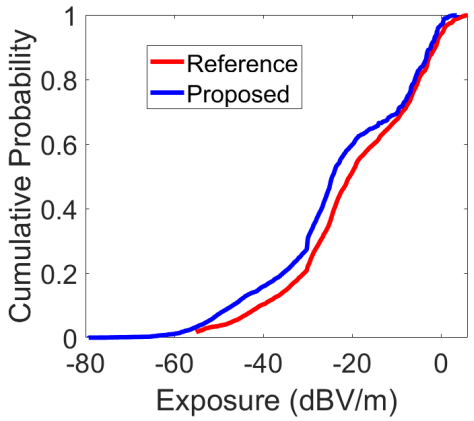


(b)

OBRÁZOK 7. Funkcia hustoty pravdepodobnosti (PDF) expozície RF-EMF pre navrhované a referenčné metódy v rôznych prostrediach: (a) vonkajšie a (b) vnútorné. Navrhovaná metóda posúva rozloženie expozície smerom k nižším intenzitám poľa, pričom väčšina výskytov je koncentrovaná medzi −50 dBV/m a −20 dBV/m (priemer: −28,6 dBV/m) vo vonkajšom scenári a medzi −55 dBV/m a −25 dBV/m (priemer:
− 23,2 dBV/m) v interiéri. To zodpovedá priemernému zníženiu expozície o 2,9 dB a 3,9 dB.



(a)



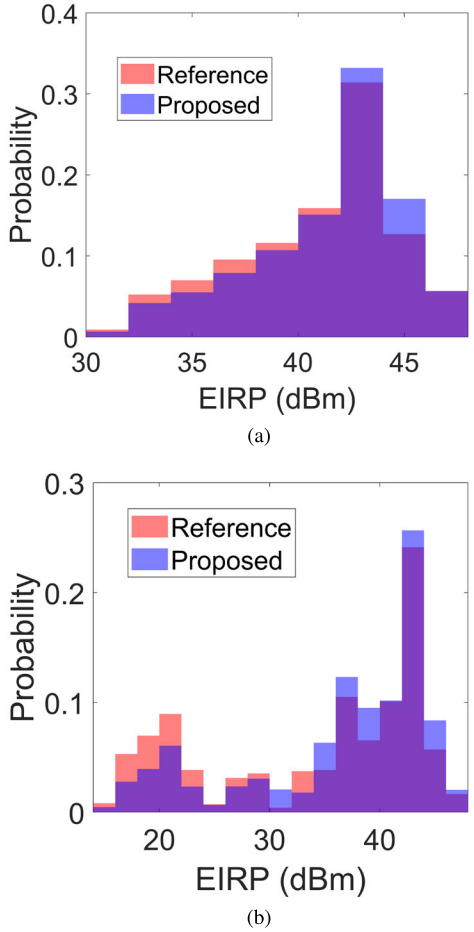
(b)

OBRÁZOK 8. Kumulatívna distribučná funkcia (CDF) expozície RF-EMF pre navrhované a referenčné metódy v rôznych prostrediach:
(a) vonku a (b) v interiéri. Navrhovaná metóda konzistentne posúva rozloženie smerom k nižším úrovniam expozície, čím znižuje strednú hodnotu intenzity poľa z −25 dBV/m na −27,6 dBV/m vo vonkajšom scenári a z −20,4 dBV/m na −24,3 dBV/m vo vnútornom scenári, čo naznačuje rovnomernejší a celkovo nižší profil expozície.

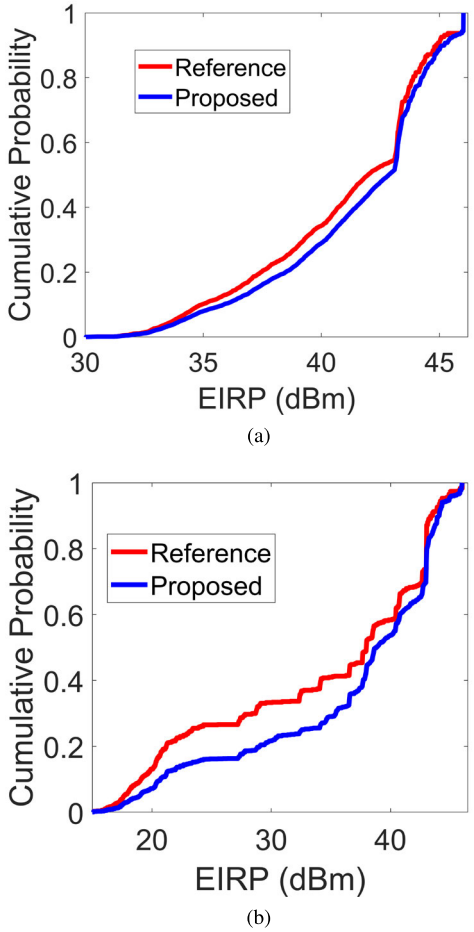
aj keď v menšej miere. V interiérovom scenári znázornenom na obr.8(b), úrovne expozície klesajú približne o 0,9 – 6 dB v celom CDF. Najvýraznejšie zníženie nastáva v nižších percentiloch (10 – 20 %), kde sa intenzita poľa znižuje až o 6 dB, zatiaľ čo v mediáne (50 %) zostáva zníženie okolo 4 dB. Pre vyššie percentily (≥70 %), rozdiel medzi týmito dvoma metódami je menší ako 1 dB, čo naznačuje, že navrhovaná a referenčná metóda poskytujú podobné úrovne expozície v tomto rozsahu. To naznačuje, že hoci navrhovaná metóda výrazne znižuje typické a nižšie úrovne expozície, jej vplyv na najvyššie hodnoty expozície je relatívne obmedzený. Celkovo navrhovaná metóda konzistentne dosahuje nižšie úrovne expozície ako referenčná metóda, pričom najvýraznejšie zisky sa pozorujú v nižších percentiloch expozície.

Obr.9a10znázorňujú PDF a CDF EIRP pre navrhovanú a referenčnú metódu vo vonkajšom a vnútornom prostredí. Tieto rozdelenia ilustrujú, ako je EIRP štatisticky rozložený medzi lúčmi, a tým čo zdôrazňuje inherentný kompromis medzi znížením vystavenia RF-EMF a požiadavkou na vysielací výkon základňovej stanice. Tento kompromis vzniká preto, lebo zatiaľ čo obe metódy znižujú EIRP a zároveň spĺňajú cieľovú kvalitu spojenia, navrhovaná metóda častejšie vyberá lúče s nižším SS-RSRP, aby sa znížilo vystavenie nepoužívateľov. V dôsledku toho je základňová stanica povinná vysielať s vyšším výkonom, aby sa udržala požadovaná kvalita spojenia.

Vo vonkajšom scenári (obr.9(a)a10 písm. a)), rozdelenia EIRP referenčnej a navrhovanej metódy sa prekrývajú a zostávajú sústredené najmä v rozsahu 40 – 45 dBm. Navrhovaná metóda je však mierne posunutá smerom k vyšším hodnotám EIRP, čo zvyšuje priemerný EIRP zo 41 dBm na 41,5 dBm, čo zodpovedá nárastu o 0,5 dB. Tento posun naznačuje, že základňová stanica vysiela vyšší výkon na udržanie pripojenia používateľa, keď sú zvolené menej optimálne smery lúča, aby sa minimalizovalo vystavenie nepoužívateľov. Medián EIRP, odvodený z decilov CDF, je 42,9 dBm pre navrhovanú metódu a 42 dBm pre referenčnú metódu, čo zodpovedá nárastu o 0,9 dB. Nad mediánom,



OBRÁZOK 9. Funkcia hustoty pravdepodobnosti (PDF) EIRP pre navrhované a referenčné metódy v rôznych prostrediach: (a) vonkajšie a (b) vnútorné. Vo vonkajšom scenári navrhovaná metóda posúva rozloženie EIRP smerom k vyšším úrovniam prenosu s dominantným vrcholom okolo 42 – 45 dBm a priemerným nárastom o 0,5 dB. Vo vnútornom scenári je posun miernejší, s mediánom a priemerným nárastom približne 0,9 dB a 2,3 dB, čo odráža mierne úpravy výkonu v koridoroch.



OBRÁZOK 10. Kumulatívna distribučná funkcia (CDF) EIRP pre navrhované a referenčné metódy v rôznych prostrediach: (a) vonkajšie a (b) vnútorné. Navrhovaná metóda zvyšuje medián EIRP zo 42 dBm na 42,9 dBm (0,9 dB) vo vonkajšom scenári a z 38,0 dBm na 38,9 dBm (0,9 dB) vo vnútornom scenári, čo naznačuje malé zvýšenie typického vysielacieho výkonu pri zachovaní podobného správania pri vyšších percentiloch a celkovej energetickej účinnosti.

Rozdiel sa však výrazne zmenšuje a pri vyšších percentiloch (60 – 90 %) zostáva pod 0,3 dB. Zároveň sa medián expozície znižuje z −25 dBV/m na −27,6 dBV/m, čo zodpovedá zníženiu intenzity elektrického poľa o 2,6 dB. V porovnaní so zodpovedajúcim nárastom EIRP o 0,9 dB. To naznačuje, že napriek viditeľnému nárastu mediánu EIRP zostáva celkový výkon mierny, čo naznačuje, že zníženie expozície možno dosiahnuť len obmedzeným zvýšením vysielacieho výkonu. V interiérovom scenári (obr.9(b)a10(b)), navrhovaná metóda zvyšuje medián EIRP z 38 dBm na 38,9 dBm (0,9 dB), pričom znižuje medián expozície z -20,2 dBV/m na -24,5 dBV/m, čo zodpovedá zníženiu expozície o 4,3 dB pri zvýšení EIRP iba o 0,9 dB. Okrem toho, nižšie percentily (10 – 30 %) vykazujú výrazne väčšie zvýšenie o 6 – 8 dB, čo naznačuje silnejší vplyv na slabšie podmienky lúča vo vnútornom prostredí. Úprava zostáva obmedzená pri vyšších percentiloch (60 – 90 %), kde je rozdiel menší ako 0,6 dB. Avšak,

Toto stále predstavuje merateľné zvýšenie vysielacieho výkonu, ktoré musí byť vyvážené dosiahnutým znížením vystavenia sa rádiofrekvenčným elektromagnetickým lúčom. Celkovo navrhovaná stratégia ukazuje, že účinné zníženie vystavenia sa dá dosiahnuť miernym zvýšením vysielacieho výkonu a zároveň zachovať robustnú konektivitu používateľov v rámci vonkajších aj vnútorných nasadení.

V. ZÁVER

Cieľom tejto štúdie je preskúmať potenciál stratégie prepínania lúčov na zníženie vystavenia RF-EMF pre nepoužívateľov a zároveň zachovať spoľahlivé pripojenie pre používateľov v realistických prostrediach nasadenia. Experimenty sa vykonávajú pri frekvencii 27 GHz vo vonkajších aj vnútorných scenároch s použitím vysokorozlišovacieho kanálového sondera. Následne sa vyvíja algoritmus na vyváženie zníženia expozície a kvality signálu. Výsledky ukazujú, že navrhovaný prístup môže znížiť úrovne expozície približne o 2 až...

3,7 dB vo vonkajších podmienkach a 0,9 až 6 dB vo vnútorných podmienkach v porovnaní s referenčným prístupom odvodeným z smerníc 3GPP pre správu lúčov, ako sa pozorovalo z CDF zníženia expozície. Pokiaľ ide o EIRP, medián EIRP sa zvýšil zo 42 dBm na 42,9 dBm (0,9 dB) pri vonkajších meraniach a z 38 dBm na 38,9 dBm (0,9 dB) v interiéri, čo na základe CDF EIRP naznačuje, že navrhovaná metóda vo všeobecnosti pracuje s malým zvýšením vysielacieho výkonu ako referenčná metóda, aby sa udržala kvalita spojenia, keď sa vyberú menej optimálne lúče na minimalizáciu expozície nepoužívateľov. Celkovo tieto zistenia zdôrazňujú potenciál adaptívnych mechanizmov prepínania lúčov a riadenia výkonu na dosiahnutie zníženia expozície len s minimálnym zvýšením vysielacieho výkonu. Navrhovaný prístup ilustruje možný smer pre budúce návrhy sietí 5G a ďalších sietí, pričom zdôrazňuje rovnováhu medzi vysokým výkonom používateľov a minimalizovanou expozíciou nepoužívateľov.

REFERENCIE

[1] P. Cerwall, *Správa o mobilite od Ericssonu*. Kista, Švédsko: Ericsson, jún 2024.

[2] *Štúdia kanálového modelu pre frekvencie od 0,5 do 100 GHz*, Štandard 3GPP TR 38.901 V16.1.0, 3GPP, december 2019.

[3] *Vízia – rámec IMT a celkové ciele budúceho rozvoja IMT na rok 2020 a neskôr*, dokument ITU-R M.2083-0, september 2015.

[4] TH Loh, F. Heliot, D. Cheadle a T. Fielder, „Hodnotenie vystavenia rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu z masívneho testovacieho zariadenia MIMO 5G“, v *Zborník 14. Európskej konferencie o šírení antén (EuCAP)*, Kodaň, Dánsko, marec 2020, s. 1 – 5.

[5] S. Persia, C. Carciofi, S. D'Elia a R. Suman, „Hodnotenia EMF pre budúce siete založené na masívnom MIMO“, v *Zborník 29. výročného medzinárodného sympózia IEEE, Osoby, Vnútorná mobilná rádiová komunikácia (PIMRC)*, Bologna, Taliansko, september 2018, s. 1197–1202.

[6] JT Bushberg, CK Chou, KR Foster, R. Kavet, DP Maxson, RA Tell a MC Ziskin, „Výbor IEEE pre človeka a žiarenie – technické vyhlásenie COMAR: Otázky zdravia a bezpečnosti týkajúce sa vystavenia širokej verejnosti elektromagnetickej energii z bezdrôtových komunikačných sietí 5G“. *Zdravotná fyzika.*, roč. 119, č. 2, s. 236–246, 2020.

[7] S. Aerts, K. Deprez, D. Colombi, M. Van den Bossche, L. Verloock, L. Martens, C. Törnevik a W. Joseph, „In situ posúdenie vystavenia základňových staníc 5G NR masívnemu MIMO v komerčnej sieti v Berne vo Švajčiarsku,“ *Aplikačné vedy.*, zv. 11, č. 8, str. 3592, apríl 2021.

[8] T. S. Rappaport, R. V. Heath ml., R. C. Daniels a J. N. Murdock, *Bezdrôtová komunikácia v milimetrových vlnách* Londýn, Spojené kráľovstvo: Pearson, 2014.

[9] P. Tang, J. Zhang, M. Shafi, PA Dmochowski a PJ Smith, „Merania a modelovanie milimetrových vlnových kanálov v scenári vnútorného hotspotu pri 28 GHz“, v *Zborník IEEE 88. konferencie o automobilových technológiách (VTC – jeseň)*, Chicago, IL, USA, august 2018, s. 1–5.

[10] R. Schulpen, LA Bronckers, AB Smolders a U. Johannsen, „Vplyv ľudského blokovania na dynamické viaccestné kanály v interiéri pri 27 GHz,“ *IEEE Trans. Antény Šírenie*, roč. 70, č. 9, s. 8291 – 8303, september 2022.

[11] *Dáta o šírení a metódy predikcie pre plánovanie vnútorných rádiokomunikačných systémov a rádiových lokálnych sietí vo frekvenčnom rozsahu od 300 MHz do 450 GHz*, dokument Odporúčanie ITU-R P.1238-13, 2025.

[12] G. Zhang, K. Saito, W. Fan, X. Cai, P. Hanpinitsak, J.-I. Takada a GF Pedersen, „Experimentálna charakterizácia kanálov šírenia milimetrových vĺn v interiéri pri frekvencii 28 GHz,“ *Prístup k IEEE*, zv. 6, s. 76516–76526, 2018.

[13] G. Barb, F. Danuti, MA Ouamri a M. Otesteanu, „Analýza vegetácie a strát penetráciou v komunikačných systémoch 5G mmWave“, v *Zborník medzinárodného sympózia elektrónových a telekomunikačných technológií (ISETC)*, Timisoara, Rumunsko, november 2022, s. 1–5.

[14] R. Schulpen, LA Bronckers, AB Smolders a U. Johannsen, „5G pokrytie NLOS milimetrovými vlnami pomocou zrkadlových odrazov budov“ v *Zborník 14. Európskej konferencie o šírení antén (EuCAP)*, marec 2020, s. 1 – 5.

[15] A. F. Molisch, *Bezdrôtová komunikácia: Od základov až po 5G* Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2022.

[16] B. Selmaoui, P. Mazet, P.-B. Petit, K. Kim, D. Choi a R. de Seze, „Vystavenie juhokórejského obyvateľstva mobilným telefónnym sieťam 5G (3,4 – 3,8 GHz)“. *Bioelektromagnetika*, zv. 42, č. 5, s. 407–414, júl 2021.

[17] F. Héliot, TH Loh, D. Cheadle, Y. Gui a M. Dieudonne, „Empirická štúdia stochastickej povahy vystavenia elektromagnetickému poľu v masívnych MIMO systémoch,“ *Prístup k IEEE*, zv. 10, s. 63100–63112, 2022.

[18] A. Sali, SQ Wali a AF Osman, „Hodnotenie vystavenia RF-EMF pre základňovú stanicu 5G NR s masívnym MIMO v pásme pod 6 GHz“, v *Zborník 6. medzinárodného sympózia IEEE o telekomunikačných technológiách (ISTT)*, Johor Bahru, Malajzia, november 2022, s. 16–21.

[19] L. Chiaraviglio, S. Bartoletti, N. Blefari-Melazzi, C. Lodovisi, A. Moretti, F. Zampognaro a M.-S. Alouini, „Meranie elektromagnetického poľa a priepustnosti pred a po aktivácii služby 5G v obytnej oblasti“, *IEEE Open J. Commun. Soc.*, zv. 4, s. 1179–1195, 2023.

[20] E. Tas a F. Pythoud, „Vylepšená metóda merania vystavenia rádiovým frekvenciám zo základňových staníc 5G NR“, v *Zborník 19. Európskej konferencie o šírení antén (EuCAP)*, Štokholm, Švédsko, marec 2025, s. 1 – 5.

[21] T. Struck, A. Pikushina, L.-M. Schilling, C. Bornkessel a MA Hein, „Posúdenie elektromagnetickej expozície z mobilných rádií 5G v systémoch verejnej dopravy“, v *Zborník 19. Európskej konferencie o šírení antén (EuCAP)*, Štokholm, Švédsko, marec 2025, s. 1 – 5.

[22] SQ Wali, A. Sali, JK Allami a AF Osman, „Meranie expozície RF-EMF pre základňovú stanicu 5G na milimetrových vlnách s anténou MIMO,“ *Prístup k IEEE*, zv. 10, s. 9048–9058, 2022.

[23] D. Colombi, F. Ghasemifard, P. Joshi, B. Xu, CD Paola a C. Törnevik, „Metódy a postupy pre merania expozície vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu in situ zo základňových staníc milimetrových vĺn 5G,“ *IEEE Trans. Elektromag. Kompatibilita.*, roč. 64, č. 6, s. 1986–1993, december 2022.

[24] R. Wydaeghe, O. Caytan, S. Shikhantsov, E. Tanghe, G. Vermeeren, H. Rogier, S. Lemey, P. Demeester a W. Joseph, „Holografické fázové získavanie RF-EMF pre hodnotenie expozície ľudí pomocou jemných 3D meraní elektrického poľa v reálnom prostredí z antény s frekvenciou 28 GHz s tvarovaním lúča“, v *Zborník 19. Európskej konferencie o šírení antén (EuCAP)*, Štokholm, Švédsko, marec 2025, s. 1 – 5.

[25] S. Goegebeur, K. Deprez, D. Colombi, JE Bischoff, C. Di Paola, B. Stroobandt, L. Verloock, S. Aerts, C. Törnevik a W. Joseph, „Porovnávacia štúdia in situ metodík na posúdenie vystavenia vysokofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu zo základňovej stanice 5G FR2“, *Prístup k IEEE*, zv. 12, s. 132552–132564, 2024.

[26] S. Malik, R. Schulpen, LA Bronckers a U. Johannsen, „Vyváženie medzi dátovou efektívnosťou a znížením expozície RF-EMF prostredníctvom prepínania lúčov v mm-vlnovom kanáli 5G“, v *Zborník z topickej konferencie IEEE-APS. Antény pre šírenie bezdrôtovej komunikácie (APWC)*., Lisabon, Portugalsko, september 2024, s. 10–15.

[27] *NR; Fyzické kanály a modulácia*, štandard 3GPP TS 38.211, v17.13.0, júl 2020.

[28] *NR; Procedúry fyzickej vrstvy pre dáta*, Štandard 3GPP TS 38.214, v17.13.0, apríl 2025.

[29] R. Schulpen, *Sondovanie milimetrových vĺn v kanáloch: Prieskum bezdrôtovej diaľnice zajtrajška* Eindhoven, Holandsko: Eindhovenská univerzita v oblasti technológií, 2022.

[30] TAH Bressner, MN Johansson, AB Smolders a U. Johannsen, „Vysokoziskové antény s šošovkovou trychtýrovou konštrukciou pre energeticky efektívnu komunikačnú infraštruktúru 5G v milimetrových vlnách,“ *IEEE Trans. Antény Šírenie*, roč. 70, č. 5, s. 3183–3194, máj 2022.

[31] Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP), „Usmernenia pre obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz)“. *Zdravotná fyzika.*, roč. 118, č. 5, s. 483 – 524, máj 2020.

[32] *5G; NR; Postupy používateľského zariadenia (UE) v režime pokoja a v neaktívnom stave RRC* Štandard 3GPP TS 38.304 verzia 17.0.0 vydanie 17, 2022.

[33] R. Baldemair, *Integrované snímanie a komunikácia (ISAC)*. Štokholm, Švédsko: Ericsson, 2024.

[34] L. Chiaraviglio, AS Cacciapuoti, GD Martino, M. Fiore, M. Montesano, D. Trucchi a NB Melazzi, „Plánovanie 5G sietí s obmedzeniami elektromagnetického žiarenia: Súčasný stav techniky a vízia“. *Prístup k IEEE*, zv. 6, s. 51021–51037, 2018.

[35] R. Stam, „Porovnanie medzinárodných politík v oblasti elektromagnetických polí (polia výkonovej frekvencie a rádiofrekvenčné polia),“ Národný inštitút verejného zdravia a životného prostredia (RIVM), Bilthoven, Holandsko, Technická správa 2018998, Január 2018.

SUDHA MALIK (Študentská členka, IEEE) získala bakalársky titul v odbore elektronika a komunikačné inžinierstvo a magisterský titul v odbore rádiofrekvenčné a mikrovlnné inžinierstvo na NSUT Delhi. V súčasnosti študuje doktorát v odbore elektrotechnika na Technickej univerzite v Eindhovene, so zameraním na vývoj a overovanie techník znižovania expozície v teréne pomocou kanálového sondera na milimetrových vlnových frekvenciách 5G. Predtým... Doktorát, získala viac ako päť rokov skúseností v oblasti rádiofrekvenčného a mikrovlnného inžinierstva na IIT Kanpur, kde prispievala k projektom pre indickú obranu a Organizáciu pre vesmírny výskum. Jej práca zahŕňala návrh a charakterizáciu 5G antén, metamateriálových absorbérov a raspršovačov. S viac ako desiatimi výskumnými publikáciami sa teší na ďalšie rozvíjanie svojich príspevkov k rádiofrekvenčnému inžinierstvu a elektromagnetike.

ROBBERT SCHULPENZískal titul M.Sc. (cum laude) a titul Ph.D. v odbore elektrotechnika na Technickej univerzite v Eindhovene (TU/e) v rokoch 2017 a 2022. V súčasnosti pôsobí ako výskumník v skupine pre elektromagnetiku na TU/e so zameraním na merania a modelovanie šírenia rádiových signálov. Jeho výskum sa týka sondovania milimetrových vlnových kanálov. Okrem toho je na čiastočný úväzok vyslaný do Holandskej organizácie pre aplikovaný vedecký výskum (TNO). kde prispieva k holandskému národnému projektu Future Network Services (FNS-6G).

ULF JOHANNSEN (Senior Member, IEEE) získal v roku 2009 titul Dipl.-Ing. v odbore komunikačného inžinierstva na Technickej univerzite v Hamburgu (TUHH) v Nemecku a v roku 2013 titul Ph.D. v odbore elektrotechnika na Technickej univerzite v Eindhovene (TU/e) v Holandsku. V rokoch 2013 až 2016 pôsobil ako vedúci systémový inžinier v spoločnosti ATLAS ELEKTRONIK GmbH v Brémach v Nemecku, kde zastával funkciu systémového návrhára a technického manažéra pre... autonómne podvodné systémy (AUV) so sonarovými užitočnými zaťaženiami. Od roku 2016 pracuje v skupine pre elektromagnetiku na katedre elektrotechniky na TU/e, v súčasnosti ako docent. Je vedúcim laboratória EM anténnych systémov, ktoré sa zameriava na inovatívne koncepty a riešenia pre bezdrôtové aplikácie zo systémového hľadiska. Od septembra 2023 je tiež riaditeľom Centra pre bezdrôtové technológie (CWTe) na TU/e, po dvojročnom zamestnaní na čiastočný úväzok ako vedúci výskumník v skupine Smart Frontend v Holandskom inštitúte pre rádioastronómiu (ASTRON). Je členom EuMA a pridruženým členom INCOSE. Je bývalým predsedom spoločnej kapitoly AP/MTT IEEE Benelux. Okrem toho pôsobí v poradnej rade Centra pre čipové integračné technológie (CITC) v Holandsku. Je nezávislým technologickým poradcom skupiny Smart Frontend spoločnosti ASTRON.

LAURENS A. BRONCKERS (Senior Member, IEEE) získal v rokoch 2015 a 2019 titul M.Sc. a Ph.D. (cum laude) v odbore elektrotechnika na Technickej univerzite v Eindhovene (TU/e) v Holandsku. V roku 2018 pôsobil ako hosťujúci výskumník v NIST v Boulderi v štáte Colorado, kde sa venoval meraniam antén v dozvukových komorách. Od roku 2019 pôsobí ako odborný asistent na katedre Metrológia pre antény a bezdrôtové systémy na TU/e. Okrem toho, Vedie sekciu ultravysokých dátových rýchlostí v Centre pre bezdrôtové technológie v Eindhovene (CWT/e). Jeho výskum sa zameriava na dozvukové a hybridné komory a na pochopenie ich vlastností a neistôt, najmä na frekvenciách mmW a subTHz. Jeho výskumné záujmy zahŕňajú merania antén (systémov), sondovanie a emuláciu kanálov a charakterizáciu vysokofrekvenčných materiálov.