Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

IEEE Access
Multidisciplinary | Rapid Review | Open Access Journal

Prijaté 6. marca 2026, akceptované 5. apríla 2026, dátum publikovania 9. apríla 2026, dátum aktuálnej verzie 14. apríla 2026.

*Identifikátor digitálneho objektu 10.1109/ACCESS.2026.3682467*

APPLIED RESEARCH

# Robustné porovnanie meraní úzkopásmového 5G EMF: Návrh a hodnotenie na národnej úrovni

SÁRA ADDA[1], ENRICA CAPUTO[1], LUCA CHIARAVIGLIO[2,3], (Senior Member, IEEE), DANIELE FRANCI[4], FARIDA MAFIBALANIOVÁ[2], GIUSEPPE MARSICO[4], A SETTIMIO PAVONCELLO[5]

[1]Dipartimento Rischi Fisici e Tecnologici, Regionálna agentúra pre ochranu životného prostredia Piemontu (ARPA Piemonte), Ivrea, 10015 Turín, Taliansko
[2]Katedra elektronického inžinierstva, Univerzita v Ríme Tor Vergata, 00133 Rím, Taliansko
[3]Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni (CNIT), 43124 Parma, Taliansko
[4]Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, 00144 Rím, Taliansko
[5]Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Lazio (ARPA Lazio), 00187 Rím, Taliansko

Korešpondujúci autor: Daniele Franci ( daniele.franci@isprambiente.it )

Túto prácu podporila Európska únia prostredníctvom talianskeho národného plánu obnovy a odolnosti (NRRP) organizácie NextGenerationEU, partnerstva „Telekomunikácie budúcnosti“ v rámci grantu PE00000001 – program „RESTART“.

**ABSTRAKT**Táto práca sa zaoberá návrhom a výsledkami rozsiahleho medzilaboratórneho porovnania zameraného na merania úzkopásmového elektromagnetického poľa (EMF) signálov 5G New Radio (NR). Kampaň, ktorá sa uskutočnila za kontrolovaných, ale realistických podmienok v súkromnej sieti FR1 5G, zahŕňala 34 laboratórií a jej cieľom bolo overiť aplikáciu postupov extrapolácie maximálneho výkonu (MPE). Účastníci použili vektorové analyzátory signálu (VSA) na implementáciu štyroch odlišných metodík: odhad výkonu kanála (CHP) pri plnom vynútení prevádzky, akvizícia s nulovým rozsahom (ZS), priama demodulácia synchronizačného signálového bloku (SSB) a demodulácia celého snímku pre analýzu na úrovni zdrojov fyzického zdieľaného kanála downlink (PDSCH). Štatistické vyhodnotenie na základe noriem ISO 13528 a ISO 17043 odhalilo vysokú konzistentnosť medzi metódami, s robustnými priemermi konvergujúcimi do 5 % a rozptylom z-skóre vo všeobecnosti pod 2, a to aj pri zohľadnení vnútornej variability signálov 5G a výziev pri správnom hodnotení neistoty merania. Tieto zistenia potvrdzujú spoľahlivosť úzkopásmových prístupov k posudzovaniu zhody a poskytujú validovaný rámec pre harmonizované monitorovanie elektromagnetických polí v mobilných sieťach novej generácie.

**INDEXOVÉ POJMY**Expozícia 5G, 5G SA, CPE, expozícia DL, EMF, úzkopásmové merania.

## I. ÚVOD

Zavádzanie sietí 5G prinieslo značné výzvy v meraní elektromagnetického žiarenia, predovšetkým kvôli prijatiu techník tvarovania lúča, časového duplexného vzoru (TDD) a zložitej štruktúre signálového rámca. Tieto vlastnosti vedú k vysoko smerovým a časovo premenlivým emisiám, ktoré komplikujú detekciu a kvantifikáciu úrovní expozície pomocou konvenčných širokopásmových prístupov. V tomto scenári získali na význame úzkopásmové metódy merania, ktoré ponúkajú vylepšené...

Zástupcom redaktora, ktorý koordinoval recenziu tohto rukopisu a schvaľoval ho na publikovanie, bol Mohamed Kheir.

selektivita a časové rozlíšenie pre charakterizáciu špecifických zložiek signálu spojených s 5G prenosmi.

Medzinárodná norma IEC 62232[1]poskytuje technický rámec pre meranie a hodnotenie vystavenia elektromagnetickým poliam z rádiových základňových staníc vrátane tých, ktoré pracujú s technológiami piatej generácie (5G). Na základe tohto odkazu SNPA, koordinovaná ISPRA, v roku 2025 publikovala „Usmernenia pre meranie elektromagnetických polí generovaných telekomunikačnými systémami 5G“.[2]Cieľom týchto usmernení je štandardizovať prevádzkové postupy vo všetkých regionálnych agentúrach na ochranu životného prostredia a zabezpečiť metodickú konzistentnosť a porovnateľnosť výsledkov na celom území štátu.

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/

Medzilaboratórne porovnávacie programy sú základným kameňom metrologickej validácie a zabezpečenia kvality pri monitorovaní environmentálnych elektromagnetických polí. Ich význam je obzvlášť výrazný v kontexte meraní in situ, kde sú signály inherentne časovo premenlivé a ovplyvnené dynamickými podmienkami prenosu. Implementácia harmonizovaných protokolov vo viacerých laboratóriách umožňuje posúdenie reprodukovateľnosti meraní, identifikáciu metodologických rozdielov a konsolidáciu osvedčených postupov na národnej úrovni.

Aby sa zabezpečilo harmonizované a validované uplatňovanie postupov merania a extrapolácie pre hodnotenia expozície 5G v súlade s národnými a medzinárodnými usmerneniami, v júni 2025 sa na Rímskej univerzite Tor Vergata uskutočnila národná porovnávacia kampaň za reálnych prevádzkových podmienok, do ktorej sa zapojili regionálne environmentálne agentúry z celého Talianska. Iniciatíva vzbudila značný záujem, čo viedlo k otvoreniu účasti verejným a súkromným subjektom mimo siete Talianskeho národného systému ochrany životného prostredia (SNPA), ktoré sa aktívne zapájajú do rôznych aspektov hodnotenia vplyvu infraštruktúry 5G na životné prostredie. Toto rozsiahle zapojenie viedlo k zapojeniu tridsiatich štyroch aktívnych laboratórií vrátane deväťnástich regionálnych environmentálnych agentúr (z dvadsiatich jednej), ktoré sa zúčastnili na meracích aktivitách porovnávacej kampane.

Porovnanie sa vykonávalo počas dvoch po sebe nasledujúcich dní podľa štruktúrovaného návrhu zameraného na posúdenie reprodukovateľnosti meraní úzkopásmového elektromagnetického žiarenia na signáloch 5G. Postupne sa riešili kontrolované a realistické podmienky merania, čo umožnilo vyhodnotenie implementácie protokolu aj kompletných reťazcov meraní. Všetky merania sa vykonávali za stabilných podmienok expozície, zabezpečených vynútením plnej dátovej prevádzky v súkromnej sieti 5G prostredníctvom vyhradeného zariadenia v priestoroch zákazníka (CPE).

Tento článok predstavuje návrh a výsledky národnej medzilaboratórnej porovnávacej kampane zameranej na merania úzkopásmových elektromagnetických polí vrátane štatistickej analýzy rozptylu meraní a posúdenia reprodukovateľnosti meraní v nezávislých laboratóriách. Výsledky poskytujú prehľad o spoľahlivosti úzkopásmových techník pre hodnotenie expozície 5G a prispievajú k vývoju harmonizovaných prístupov k meraniu pre monitorovanie životného prostredia.

Podľa vedomostí autorov táto štúdia predstavuje prvé medzilaboratórne porovnanie na národnej úrovni, ktoré sa špecificky zameriava na úzkopásmové merania 5G signálov. Novosť navrhovanej práce je ešte viac umocnená obmedzenou dostupnosťou vedeckej literatúry o porovnávacích kampaniach v tejto oblasti, ktorá je vo všeobecnosti vzácna a prevažne sa zameriava na merania širokopásmového pripojenia, ako je uvedené v kapitole ...II-CNavyše, niekoľko zdokumentovaných príkladov úzkopásmových porovnaní sa explicitne nezaoberalo technológiou 5G.

Článok je štruktúrovaný nasledovne:

- SekciaDruhýposkytuje prehľad literatúry so zvýraznením hlavných príspevkov v danej oblasti;
- SekciaIII.ponúka komplexný opis postupov merania používaných na posudzovanie environmentálnej zhody vrátane postupov MPE uplatňovaných na zdroje mobilných telekomunikácií;
- SekciaIV.predstavuje prehľad logistických aspektov porovnania vrátane podrobného opisu miesta merania a technických charakteristík zdroja 5G;
- SekciaV.rozoberá štatistický rámec použitý na interpretáciu výsledkov porovnávania;
- SekciaVI.predstavuje celkové súhrnné výsledky.

## II. SÚVISIACE PRÁCE

Literatúra o hodnotení vystavenia ľudí rádiofrekvenčnému (RF) elektromagnetickému žiareniu v mobilných sieťach sa výrazne vyvinula, najmä s príchodom technológie 5G, ako aj iniciatív v oblasti medzilaboratórnych porovnaní signálov mobilných telekomunikácií. Táto časť skúma najrelevantnejšie príspevky, usporiadané do troch tematických oblastí, ktoré odrážajú hlavné výzvy a metodologický pokrok v tejto oblasti:

- OddielII-A, kde diskutujeme o komplexnosti, ktorú prinášajú technológie ako masívne viacnásobné vstupy a viacnásobné výstupy (MIMO) a tvarovanie lúča, a o dôsledkoch pre hodnotenie expozície in situ;
- OddielII-B, so zameraním na vývoj extrapolačných techník na odhad najhoršieho možného vystavenia sa vplyvom dynamických dopravných podmienok vrátane prístupov založených na dekódovaní;
- OddielII-C, ktorá skúma predchádzajúce iniciatívy zamerané na zabezpečenie reprodukovateľnosti a konzistentnosti meraní EMF a zdôrazňuje medzery vo validácii úzkopásmových postupov 5G vo veľkom meradle.

### *A. VÝZVY PRI MERANÍ EMF 5G*

Na rozdiel od predchádzajúcich generácií mobilných telefónov, kde boli prenosy relatívne statické, 5G zavádza vysoko dynamickú paradigmu. Prijatie masívneho MIMO a tvarovania lúča umožňuje základňovým staniciam smerovať energiu smerom k používateľskému zariadeniu (UE), čím vytvára prostredie elektromagnetického poľa, ktoré sa výrazne mení v priestore aj čase.[3],[4].

Experimentálne štúdie o in-situ hodnotení masívnych nasadení 5G MIMO, vrátane rozsiahlych meracích kampaní, potvrdili, že úrovne expozície silne závisia od faktorov, ako je zaťaženie premávkou a smerovosť lúča.[5]Ďalšie výskumy na multitechnologických lokalitách (t. j. 2G, 3G, 4G a 5G), kombinujúce simulácie a merania počas jazdných testov, ukazujú, že hoci 5G prispieva k celkovej oblasti, vystavenie zostáva výrazne pod medzinárodnými limitmi.[6]Tieto zistenia zdôrazňujú potrebu presných a selektívnych techník merania na zabezpečenie súladu.

Výskum sa rozšíril aj na nasadenie 5G StandAlone (SA) v pásmach FR2, čo dokazuje, že vystavenie je

priamo úmerná prenosovej kapacite downlinku[5]Dôležité je, že postupy pôvodne vyvinuté pre frekvencie pod 6 GHz, ako napríklad postupy založené na extrapolácii z SSB, sa ukázali ako použiteľné pri signáloch 5G v pásme FR2.[7].

Porovnávacie štúdie na frekvenciách FR2 skúmali výkon všesmerových sond oproti smerovým anténam, pričom zdôraznili potrebu scenárov s vynucovaním prevádzky na zachytenie najhorších podmienok.[8]Táto inherentná variabilita naznačuje, že konvenčné širokopásmové merače v teréne nemusia poskytovať spoľahlivé hodnotenia zhody.[9], čím sa posilní zavádzanie pokročilých úzkopásmových techník.

### *B. METODOLÓGIE EXTRAPOLÁCIE MAXIMÁLNEHO VÝKONU*

Na riešenie časovej variability emisií 5G sa používa prístup MPE – ako je definovaný medzinárodnými normami, ako napríklad IEC 62232[1]—je široko používaný na dodržiavanie predpisov. Hlavnou výzvou je presný odhad maximálneho potenciálneho výkonu, ktorý už nie je jednoducho korelovaný s konštantnými riadiacimi kanálmi ako v predchádzajúcich generáciách. V dôsledku toho sa výskum zameral na zdokonaľovanie extrapolačných faktorov a stratégií merania.

Aerts a kol.[3]zaviedli komplexnú metodiku pre hodnotenie expozície 5G NR, pričom zdôraznili úlohu SSB, jedinej zložky vysielanej periodicky s konštantným výkonom. Ich postup zahŕňa meranie hustoty výkonu spojenej so zdrojmi SSB a extrapoláciu na teoretickú maximálnu úroveň expozície. Realizovateľnosť určenia výkonu na prvok zdroja $P_{RE}$SSB pomocou konvenčného spektrálneho analyzátora bolo tiež demonštrované a validované proti sieťovým dekodérom, čo potvrdzuje robustnosť tohto prístupu.[8].

Dynamická alokácia zdrojov a masívne MIMO tvarovanie lúča však komplikujú vyhodnotenie expozície v najhoršom prípade, čo motivuje k použitiu techník vynucovania prevádzky.[10]Úzkopásmové merania zostávajú nevyhnutné na rozlíšenie signálov 5G a umožnenie presných výpočtov MPE.[11]Na prekonanie týchto obmedzení boli navrhnuté pokročilejšie metodiky založené na dekódovaní. Napríklad Adda a kol.[10] porovnávali konvenčné extrapolačné metódy s vektorovými technikami. Ich zistenia naznačujú, že dekódovacie postupy analyzujúce prevádzkový kanál PDSCH poskytujú spoľahlivé odhady maximálnej expozície aj za reálnych sieťových podmienok, čo podporuje ich integráciu do budúcich revízií normy IEC 62232.

Nakoniec je prístup MPE kľúčový pre súlad v rôznych scenároch nasadenia vrátane pásiem FR2.[7],[12]Zabezpečenie konzistentnosti pri uplatňovaní týchto zložitých postupov v rôznych laboratóriách zdôrazňuje potrebu špecializovaných validačných nástrojov a porovnávacích kampaní.

### *C. MEDZILABORATÓRNE POROVNANIE A ZABEZPEČENIE KVALITY*

Vedecká literatúra zaoberajúca sa medzilaboratórnymi porovnávacími cvičeniami porovnateľnými s tými, ktoré sú prezentované v tejto práci, je relatívne obmedzené. Existujúce štúdie sa zameriavajú prevažne na prístupy k meraniu širokopásmového pripojenia.[13]alebo súvisia so staršími technológiami mobilnej komunikácie[14],[15] Tieto príspevky síce poskytujú cenný pohľad na všeobecnú neistotu merania a postupy zabezpečenia kvality (QA), ale neriešia špecifické výzvy spojené s úzkopásmovými meraniami v moderných celulárnych sieťach.

Potreba štandardizovaných a reprodukovateľných postupov merania napriek tomu už dlho motivuje vývoj porovnávacích cvičení pre predchádzajúce generácie mobilných telekomunikačných systémov, čím sa vytvoril pevný základ pre zabezpečenie kvality. V tejto súvislosti,[16]uviedli výsledky národného porovnávania signálov 4G s frekvenčným delením duplexu (FDD), ktoré sa uskutočnilo v Taliansku v roku 2016 s použitím meraní v rádiu, čím sa preukázala uskutočniteľnosť rozsiahlych programov zabezpečenia kvality. Na základe týchto skúseností sa následné úsilie zameralo na zložitejšie scenáre, ako napríklad laboratórne porovnávanie signálov 4G TDD organizované v roku 2019.[17]Táto iniciatíva, založená na prehraných zaznamenaných signáloch, odhalila významnú variabilitu získaných výsledkov v závislosti od prístrojového vybavenia a zložitosti signálu a zdôraznila dôležitosť podrobných technických usmernení na zlepšenie medzilaboratórnej konzistentnosti.

Hoci tieto štúdie vytvorili robustný rámec pre zabezpečenia kvality založené na porovnávaní, podľa vedomostí autorov predstavujú jediné zdokumentované rozsiahle skúsenosti uvedené v literatúre. Stále chýbajú najmä komplexné národné kampane zamerané na porovnávanie, ktoré by sa špecificky zaoberali úzkopásmovými meraniami signálov 5G a aplikáciou aktualizovaných metodík MPE za kontrolovaných, ale realistických expozičných podmienok. Cieľom tejto štúdie je vyplniť túto medzeru návrhom a vyhodnotením rozsiahleho národného medzilaboratórneho porovnania zameraného na úzkopásmové merania 5G.

## III. METODIKÁ ZHODY S POŽIADAVKAMI 5G EMF: ZÁKLADNÉ INFORMÁCIE

Úrovne výkonu prenášané mobilnými telekomunikačnými systémami vykazujú značnú časovú variabilitu, ktorú ovplyvňuje viacero faktorov, ako je počet a umiestnenie používateľov pripojených k sieti, zaťaženie systému, modulačné schémy a alokácia zdrojov v rámci signálového rámca. Táto variabilita vedie k vysoko časovo závislej expozícii elektromagnetickému žiareniu, ktorá sa vyznačuje známymi časovými vzormi s výraznými vrcholmi expozície počas denného svetla, ktoré sa striedajú s výraznými minimami počas nočných období.[18]Toto zvláštne správanie spôsobuje, že okamžité merania prijatého výkonu sú vo všeobecnosti neúčinné pre presné vyhodnotenie expozície. Stojí za zmienku, že prístupy k meraniu v reálnom čase neboli zohľadnené na zabezpečenie súladu so súčasnými regulačnými požiadavkami na následné spracovanie a štandardnými hardvérovými možnosťami subjektov zodpovedných za merania environmentálnej zhody.

### *A. VŠEOBECNÝ PRÍSTUP K MPE*

Vyššie uvedené úvahy poskytujú odôvodnenie pre definovanie a prijatie postupov MPE opísaných v[1], ktorý

umožňujú oddeliť posúdenie expozície od jeho inherentnej časovej závislosti. Hoci sa postupy operačne líšia v závislosti od technológií, základný prístup, ktorý riadi proces extrapolácie, zostáva konzistentný. Postup MPE sa spolieha na identifikáciu vždy zapnutého kanála, ktorý slúži ako referencia pre maximálnu úroveň výkonu, ktorú môže systém prideliť jednému generickému kanálu. Tento prístup umožňuje prekonať časovú variabilitu zameraním sa na meranie výkonu prenášaného jedným kanálom, ktorý je nepretržite prítomný v rádiovom vysielaní. Medzi ďalšie dôležité charakteristiky pri identifikácii referenčného kanála patrí jeho konštantný vysielací výkon a jeho proporcionalita k maximálnemu výkonu povolenému pre generický kanál v rámci analyzovaného signálu. Tieto prísne požiadavky spĺňajú riadiace kanály, ktoré používajú mobilné telekomunikačné systémy na signalizáciu a správu komunikácie, autentifikáciu používateľov, lokalizáciu zariadení a prideľovanie zdrojov. Tieto kanály, ktoré sa vždy prenášajú bez ohľadu na zaťaženie dátovou prevádzkou, ktorú sieť spracováva, sa zvyčajne vysielajú s konštantnými – a často maximálnymi – úrovňami výkonu a široko sa používajú ako východiskový bod pre postupy MPE opísané v[1].

MPE je založená na priamom meraní prijímaného výkonu referenčného kanála.$P_{\text{odkaz}}$spojený s analyzovanou mobilnou technológiou – vysielací riadiaci kanál (BCCH) pre 2G, riadiaci pilotný kanál (CPICH) pre 3G a referenčný signál (RS) pre 4G – ktorý sa používa ako vstup do všeobecného extrapolačného vzorca uvedeného v rovnici.1:

$$P_{\text{maximum}} = C \cdot P_{\text{odkaz}} \tag{1}$$

kde$P_{\text{maximum}}$predstavuje odhadovaný maximálny prijatý výkon zo zdroja a$C$je konštantný faktor závislý od technológie.

### B. POSTUPY 5G MPE

Vyššie opísaný prístup je vysoko účinný pre staršie technológie, ale pri použití v systémoch 5G môže naraziť na kritické obmedzenia. Signály 5G v skutočnosti vykazujú inovatívne a charakteristické vlastnosti – ako je napríklad rozptyl lúča a tvarovanie lúča – ktoré môžu významne ovplyvniť štandardizované postupy pre hodnotenie MPE. Vzhľadom na nasadenie aktívnych viacprvkových antén sa prenos signálu 5G zvyčajne vyznačuje rôznymi vyžarovacími diagramami pre riadiace kanály a prevádzkové kanály PDSCH. Mechanizmus tvarovania lúča pôsobí najmä na prevádzkové lúče, čo vedie k úrovniam výkonu PDSCH, ktoré sú rádovo vyššie ako tie, ktoré sú spojené s SSB. Na riešenie tohto problému technické usmernenia odporúčajú mierne upravenú definíciu$P_{\text{odkaz}}$, ako je znázornené v rovnici.2:

$$P^{5G}_{\text{odkaz}} = F_{\text{extBeam}} \cdot P_{\text{SSB}} \tag{2}$$

kde$P_{\text{SSB}}$je prijímaný výkon spojený s SSB signálu 5G a$F_{\text{extBeam}}$je definované v[1]ako extrapolačný faktor zodpovedajúci pomeru medzi obálkou EIRP všetkých prevádzkových lúčov a obálkou EIRP vysielacieho signálu. Nedávne štúdie[10]ukázali, že Použitím meracích prístrojov schopných plne dekódovať 5G rámec je možné prekonať používanie$F_{\text{extBeam}}$a priamo prijať výkon na zdrojový prvok (RE) kanála PDSCH$P_{\text{PDSCH}}$ako referencia, meraná za podmienok vynútenej prevádzky pomocou protokolov UDP (User Datagram Protocol), priameho pripojenia iPerf alebo nástrojov na testovanie rýchlosti.

Vzájomné porovnanie predstavovalo neoceniteľnú príležitosť na otestovanie účinnosti rôznych metód merania a extrapolácie aplikovaných na signál 5G, ako aj na posúdenie schopnosti účastníkov implementovať ich v praxi. Na základe možností dostupných meracích prístrojov boli účastníci vyzvaní, aby aplikovali a porovnali štyri rôzne prístupy k hodnoteniu MPE:

1) Extrapolácia založená na priamom meraní$P_{\text{SSB}}$prostredníctvom demodulácie riadiaceho kanála;
2) Extrapolácia pomocou merania ZS, založená buď na úrovni výkonu$P_{\text{PDSCH}}$spojené s PDSCH alebo na meraní$P_{\text{SSB}}$v kombinácii s odhadom faktora$F_{\text{extBeam}}$;
3) Extrapolácia založená na priamom meraní PDSCH výkon na RE ($P_{\text{RE PDSCH}}$) cez celý 5G rám demodulácia;
4) Meranie celkového výkonu signálu pomocou CHP.

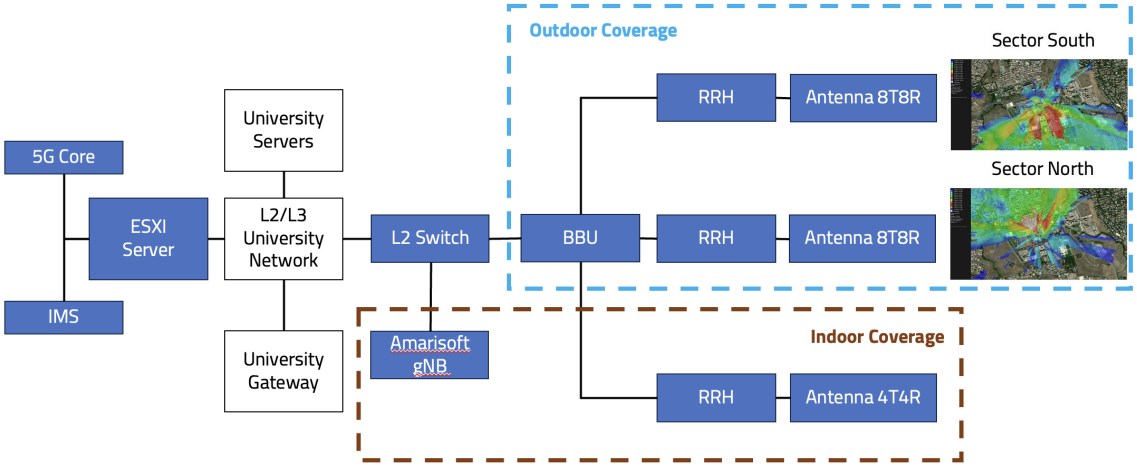
Stojí za zmienku, že plná saturácia 5G rámca bola zabezpečená počas celého trvania meraní vďaka zariadeniu CPE spojenému so softvérom iPerf. Ďalšie podrobnosti o štyroch postupoch merania budú uvedené v nasledujúcich častiach.

## IV. INFRAŠTRUKTÚRY SIGNÁLU A MERANIA 5G

Podrobne opisujeme zdroj signálu 5G a meraciu infraštruktúru použitú počas porovnávacej kampane vrátane charakterizácie prenášaného signálu, testovacieho miesta a experimentálneho nastavenia, ktoré účastníci použili. Okrem toho sú načrtnuté postupy merania a extrapolačné metodiky použité počas kampane, pričom sa zdôrazňujú podmienky a prístrojové vybavenie použité na zabezpečenie konzistentnosti medzi účastníkmi.

### A. INFRAŠTRUKTÚRA SIGNÁLU 5G

Porovnávacie aktivity sa uskutočnili na Katedre elektronického inžinierstva Univerzity Tor Vergata v Ríme. Katedra poskytla účastníkom signál 5G generovaný jej súkromnou sieťou, ktorá bola nasadená v rámci programu Výskum a inovácie budúcich telekomunikačných systémov a sietí s cieľom urobiť Taliansko inteligentnejším (RESTART) financovaného prostredníctvom Národného kultúrneho a sociálneho zabezpečenia (PNRR), ktorý slúžil ako referenčný zdroj signálu pre meraciu kampaň. Hlavné funkčné komponenty siete 5G sú znázornené na obr.1Podrobnejšie, uvažovaná architektúra sa skladá z 5G jadra poskytujúceho dátové služby a IP cez multimediálny subsystém (IMS) podporujúci službu Voice over New Radio (VoNR). Tieto dva moduly sú nainštalované na fyzickom serveri, ktorý je pripojený k rádiovej prístupovej sieti (RAN).

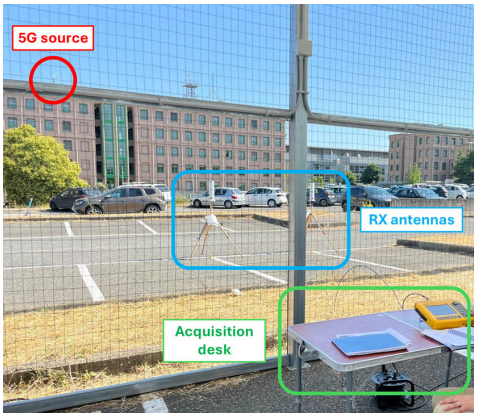



**OBRÁZOK 1.**Funkčné prvky architektúry 5G SA použité počas porovnávania.

prostredníctvom zariadení L2/L3 univerzitnej siete. RAN sa potom skladá z dvoch vonkajších sektorov (orientovaných na sever a juh), ako aj z dvoch vnútorných sektorov.

Architektúra realizuje komplexnú samostatnú sieť 5G, ktorá je úplne pod kontrolou univerzity, ktorá poskytuje operátorské služby pripojeným terminálom prostredníctvom vyhradených SIM kariet. Týmto spôsobom obmedzujeme počet aktívnych terminálov na tie, ktoré sú potrebné počas porovnávacích testov, čím poskytujeme jasnú výhodu v porovnaní s inými meracími infraštruktúrami 5G (ako sú tie komerčné), v ktorých musí byť sieť (samozrejme) používaná aj na obsluhu iných komerčných používateľov. Týmto spôsobom poskytujeme „čistú“ infraštruktúru signálu 5G, čím obmedzujeme vplyv efektov pozadia počas meraní. Toto kontrolované nastavenie slúži ako referenčná hodnota pre validáciu postupov MPE, ktoré zostávajú priamo zovšeobecniteľné pre komerčné siete. Tieto metodiky sú v skutočnosti navrhnuté tak, aby boli odolné voči dynamickej prevádzke a formovaniu lúča buď replikáciou podmienok plného zaťaženia prostredníctvom vynútenia prevádzky, alebo využitím extrapolácie založenej na SSB.

Zdroj 5G, ako je viditeľný z vybraných meracích bodov, je znázornený na obr.2a, zatiaľ čo podrobný pohľad na inštaláciu je uvedený na obr.2bKonkrétne sme použili severný sektor infraštruktúry 5G SA znázornenej na obr.1 a dva meracie body na pevnom mieste, ktoré zabezpečujú opakovateľnosť merania a zároveň podmienky priamej viditeľnosti a optimálne pokrytie signálom.




(a) View from measurement points

(b) Detail of 5G source

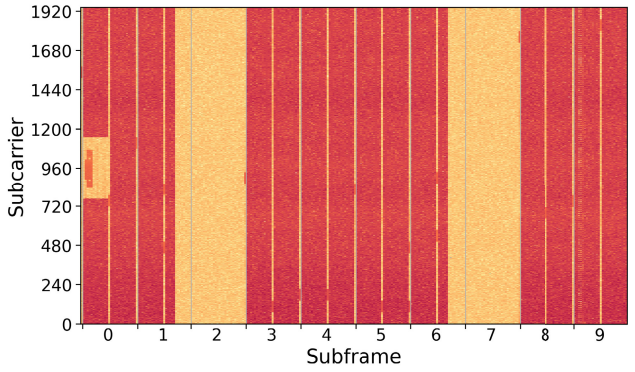
**OBRÁZOK 2.**Pohľady na zdroj signálu 5G použitý počas porovnávacej kampane.

### *B. CHARAKTERIZÁCIA SIGNÁLU 5G*

Signál 5G implementuje technológiu pevného bezdrôtového prístupu (FWA) a jej technické špecifikácie sú uvedené v tabuľke.1Presnejšie povedané, signál je vyžarovaný cez stredné pásmové frekvencie, ktoré boli univerzite licencované vďaka dohode s národným operátorom. To následne umožňuje pripojenie komerčných zariadení k... sieť, čo je ďalší dôležitý aspekt na zvýšenie spoľahlivosti výsledkov porovnávania. Maximálny výstupný výkon uvedený v tabuľke zabezpečuje plné pokrytie univerzitného kampusu a najmä miesta, ktoré bolo vybrané na merania. Zvyšné parametre podrobne opisujú konfiguráciu fyzickej vrstvy signálu 5G, ktorá je úplne zosúladená s nastavením používaným operátorom, ktorý poskytol frekvencie (neposkytoval

**TABUĽKA 1.** Charakteristiky signálu 5G.

| Parameter | Value |
|---|---|
| Operating band | n78 |
| Center frequency | 3469.98 MHz |
| Channel bandwidth | 60 MHz |
| Maximum output power | 10 W |
| SSB central frequency | 3469.44 MHz |
| SSB Case | C |
| Active SSB | 1 |
| Numerology | 30 kHz |
| Frame configuration | 8:2 |
| gNodeB ID | 2754417 |
| Downlink (DL) MIMO | massive MIMO 4×4 |
| Uplink (UL) MIMO | MIMO 2×2 |
| TDD pattern | DDDDDDDSUU |
| Special slot configuration | 6 DL + 4 Guard + 4 UL symbols |




**OBRÁZOK 3.** Rozloženie výkonu siete verzus index symbolov pre každú nosnú frekvenciu, získaný z demodulovaného signálu 5G NR.

prevádzkovateľská služba nad oblasťou univerzity s rovnakými frekvenciami).

Pred začatím aktivít boli vykonané experimentálne merania a prediktívne vyhodnotenia na charakterizáciu zdroja 5G aj testovacieho miesta. Prvý krok pozostáva z experimentálnej charakterizácie signálu prostredníctvom vektorovej demodulácie rámca 5G, počnúc IQ streamom zachyteným pomocou VSA. Demodulovaná mriežka zobrazujúca prijatý výkon pre každý RE je znázornená na obr. 3Toto meranie je kľúčové na potvrdenie špecifikácií signálu deklarovaných dodávateľom a uvedených v Tab.1, pretože umožňuje priamu a presnú identifikáciu najrelevantnejších alokácií v rámci rámca. Aby sa zabezpečila konzistentnosť so scenárom merania prijatým počas praktických cvičení, zachytávanie IQ sa vykonávalo za maximálnych podmienok dopravné podmienky, vynútené prostredníctvom špecializovaného CPE. Podrobná analýza demodulovaného rámca umožňuje okrem iného potvrdiť:

- prítomnosť jedného aktívneho SSB;
- schéma TDD implementovaná signálom;
- účinnosť systému vynucovania dátovej prevádzky na PDSCH;
- správne umiestnenie CPE, potvrdené absenciou uplinkových prenosov počas uplinkových slotov.

Ako ďalší predbežný krok na charakterizáciu signálu bola posúdená stabilita prijímaného výkonu v priebehu času. Na tento účel boli vykonané kontinuálne merania za podmienok vynútenej dátovej prevádzky počas krátkeho časového intervalu niekoľkých minút, pričom sa brali do úvahy dva ukazovatele:

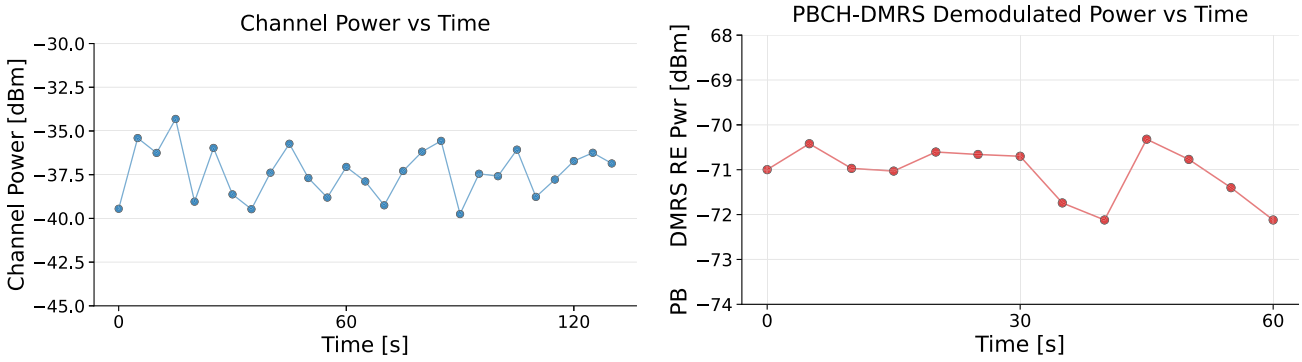
- CHP celého signálu;
- demodulovaný výkon spojený s kanálom referenčného signálu demodulácie fyzického vysielacieho kanála (PBCH-DMRS), čo je riadiaci kanál zabudovaný v SSB.

Výsledky, znázornené na obr.4, zdôrazňujú vnútornú variabilitu ovplyvňujúcu signál. Použitím rozdielu medzi maximálnym a minimálnym nameraným výkonom ako metriky variability vykazuje CHP variáciu približne 5,4 dB, čo odhaľuje nezanedbateľnú nestabilitu, ktorú je potrebné zohľadniť počas fázy analýzy. Variabilita pozorovaná pre výkon PBCH-DMRS – približne 1,8 dB, napriek tomu, že sa očakáva, že tento kanál bude vysielať s konštantným výkonom – naznačuje, že časť pozorovaných fluktuácií je inherentná zdroju a nie výlučne spôsobená schopnosťou CPE udržať saturáciu celého snímku. Okrem týchto testov bola stabilita signálu počas každej relácie zabezpečená monitorovaním protokolov priepustnosti iPerf v reálnom čase, čo potvrdzuje nepretržitú saturáciu celého snímku. Táto krátkodobá stabilita spĺňa požiadavky na postupy MPE, ktoré uprednostňujú saturované podmienky počas akvizičného okna pred dlhodobou časovou konzistenciou.

Pozorovaná variabilita výkonu odráža inherentnú rovnováhu medzi kontrolovanou a realistickou povahou experimentálneho nastavenia. Zatiaľ čo zaťaženie siete a obsadenosť rámcov boli prísne kontrolované vynútením nepretržitej dátovej prevádzky cez vyhradené CPE, aby sa zabezpečila úplná saturácia, špecifické algoritmy riadenia výkonu a riadenie podmienok rádiového kanála zostali pod autonómnou kontrolou plánovača gNodeB. Pozorované kolísanie CHP 5,4 dB preto predstavuje realistické správanie 5G systému pri plnom zaťažení, kde sú úrovne výkonu dynamicky upravované internými algoritmami riadenia, ktoré nie je možné externe prepísať, a to ani v prostredí súkromnej siete.

### *C. INFRAŠTRUKTÚRA A ZARIADENIA NA MERANIE*

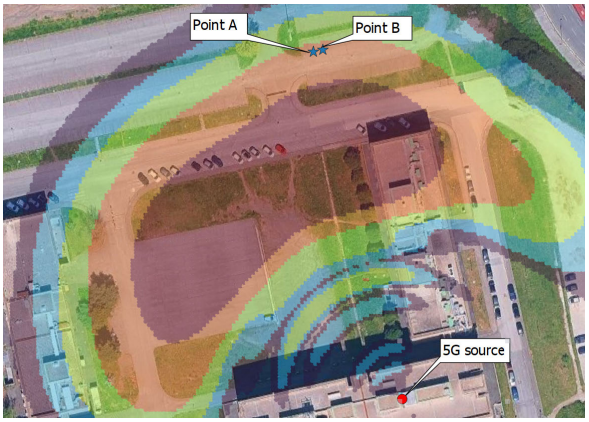
Výber meracích bodov pre porovnávacie aktivity bol riadený prediktívnou simuláciou úrovní elektromagnetického poľa generovaného v oblasti okolo oddelenia na základe prenosových parametrov deklarovaných prevádzkovateľom siete. Vzhľadom na smer zdroja a podstatnú absenciu prekážok šírenia elektromagnetických vĺn sa analýza zamerala na oblasti v podmienkach priamej viditeľnosti (LOS). Z tohto dôvodu boli meracie body identifikované jednoduchým prediktívnym posúdením vo voľnom priestore, pričom boli vybrané dva body vzdialené od seba približne 1,5 m a nachádzajúce sa približne 120 m od zdroja 5G, kde bolo možné hodnotu prijatého poľa považovať za takmer konštantnú. Prediktívna simulácia spolu s




(a) Channel Power

(b) PBCH-DMRS

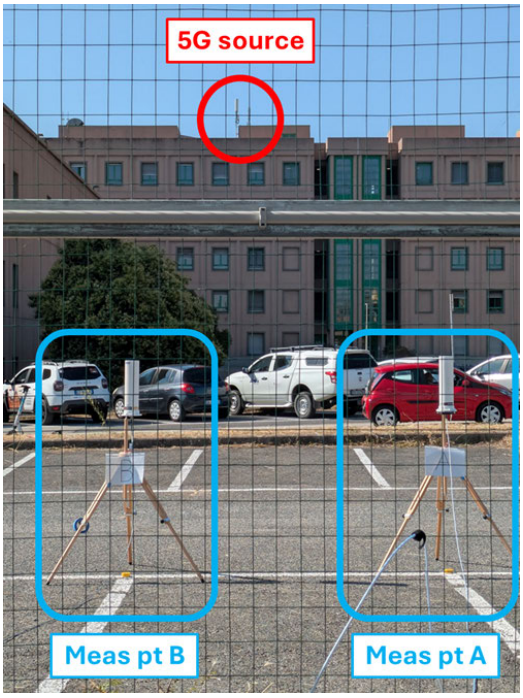
**OBRÁZOK 4.** Test stability výkonu pri vynútenej premávke): CHP (ľavý graf) a PBCH-DMRS (pravý graf).




**OBRÁZOK 5.** Prediktívna simulácia úrovne EMF generovanej zdrojom 5G.

**TABUĽKA 2.** Meracie zariadenia: značka a model.

| Brand | Model |
|---|---|
| Anritsu | MS2090 |
| Deviser | EM860F |
| Keysight | N9934B, N9960B |
| Narda | SRM3006 |
| R&S | FSVA 3007, FSVA 3044, FSH-20, FSH-8, Scanner TSMA 6 |




**OBRÁZOK 6.** Detail meranej oblasti.

Polohy vybraných bodov A a B sú znázornené na obr.5Fotografický detail bodov je tiež uvedený na obr.6Na zabezpečenie opakovateľnosti a simuláciu kontrol zhody so štandardmi boli vybrané fixné body LOS, pričom štúdia sa zamerala skôr na metodologickú reprodukovateľnosť než na priestorovú variabilitu.

Meracie body boli vybrané v bezprostrednej blízkosti vonkajšieho zariadenia Katedry inžinierstva.ja ne špeciálne venované testovaniu dronov, zobrazené naF obr.7Táto oblasť sa ukázala byť vhodná na ubytovanie účastníkov a ich meracieho vybavenia a poskytovala ochranu pred slnečným žiarením.hod. a umožnenie pohodlného pripojenia k prijímacím anténam umiestneným na vybraných meracích bodoch pomocou 10 m dlhých koaxiálnych káblov. Vonkajšie merania boli vykonané za stabilného počasia so spektrálnym monitorovanímto or ing zabezpečenie absencie významného vonkajšieho rušenia v analyzovaných pásmach.

Porovnávania sa zúčastnilo 34 zúčastnených laboratórií, rozdelených takto:

- 31 laboratórií patriacich regionálnym environmentálnym agentúram z celého územia štátu;
- 1 laboratórium z iných verejných inštitúcií;
- 2 súkromné laboratóriá.

Podrobnosti o VS Apoužívané účastníkom mravce počas vzájomné porovnanie je puvedené v tabuľke2

Zatiaľ čo nástroje Kalibrácia cie bola n nie je povinné požiadavka na časť povzbudenie široké zapojenie- ment, metrologický tr prístupnosť bola monitorované. prevažná väčšina la bstriktne oratória (32 z 34) zamestnaný meracie reťazce ckalibrované podľa ISO/IEC 1 7025 akreditované

**OBRÁZOK 7.** Pohľad na testovaciu plochu dronov, ktorá slúži na ubytovanie účastníkov.

laboratória v rámci rámca ILAC-MRA. Dvaja účastníci používajúci nekalibrované vybavenie neposkytli žiadne hodnoty neistoty, a preto boli vylúčení z analýzy PomPlot aj z výpočtu robustných konsenzuálnych hodnôt. Napriek tomu ich individuálne výsledky zostávajú zahrnuté v rozdelení z-skóre, aby sa zabezpečilo úplné a transparentné znázornenie výsledkov kampane.

Vzhľadom na veľký počet účastníkov sa merania vykonávali paralelne, pričom laboratória boli náhodne pridelené k dvom meracím bodom A a B s 10-minútovým časovým úsekom vyhradeným na meracie operácie. Meracia kampaň prebiehala počas dvoch po sebe nasledujúcich dní, aby účastníci mohli aplikovať niekoľko relevantných meracích techník za rôznych prevádzkových podmienok. Ako už bolo spomenuté, počas meraní vykonávaných v oboch dňoch bol zdroj 5G udržiavaný v podmienkach plnej saturácie rámcov PDSCH využitím CPE určeného na nepretržité vynucovanie prevádzky.

### *D. POUŽITIE EXTRAPOLAČNÝCH POSTUPOV*

Prvý deň sa zameral na porovnanie aplikácie postupov MPE, skalárnych aj vektorových. Aby sa zabezpečilo, že výsledky porovnávania odrážajú iba schopnosť laboratórií aplikovať správny postup merania a následný extrapolačný algoritmus, účastníci boli požiadaní, aby použili svoje vlastné VSA spolu s rovnakou sadou prijímacej antény a koaxiálneho kábla, akú poskytli organizátori. V meracích bodoch A a B boli nainštalované dve identické širokopásmové všesmerové antény (Keysight N6850A), každá pripojená k 10 m koaxiálnemu káblu typu N na prepojenie s VSA účastníkov. Experimentálne usporiadanie v oboch bodoch vrátane dvoch identických párov anténa-kábel je znázornené na obr.6.

Konkrétne boli účastníci požiadaní, aby poskytli odhad z $P_{5G\,maximum}$ podľa prístupu definovaného v rovnici.1, pod tri rôzne scenáre merania:

1) **Priama SSB demodulácia**, kde $P_{5G\ odkaz}$ je definovaný podľa rovnice2a získané prostredníctvom vektorovej demodulačnej analýzy prijatého výkonu 5G SSB. Treba poznamenať, že hoci testovaný systém 5G neimplementoval mechanizmus tvarovania lúča a preto, podľa definície, $F_{extBeam}$ = 1, výkon spojený s kanálom PDSCH bol dodávateľom nakonfigurovaný so statickým zvýšením výkonu. V dôsledku toho boli účastníci inštruovaní, aby odhadli toto zvýšenie priamym meraním a výslednú hodnotu použili ako efektívnu $F_{extBeam}$ v rovnici2;
2) **Meranie ZS**, kde $P_{5G\ odkaz}$ je definovaný podľa Rovnica3alebo rovnica4, v závislosti od toho, či sa akvizícia ZS vzťahuje na meranie výkonu spojeného s SSB v kombinácii s odhadom $F_{extBeam}$, alebo na priame meranie PDSCH kanála:

$$P_{5G\ odkaz} = F_{extBeam} \cdot \frac{1f}{NBW} \cdot P_{ZŠ\ SSB} \quad (3)$$

$$P_{5G\ odkaz} = \frac{1f}{NBW} \cdot P_{ZŠ\ PDSCH} \quad (4)$$

kde:

- $1f$ je rozostup subnosných,
- NBW je šírka pásma šumu analyzátora, definovaná ako súčin konštanty deklarovanej výrobcom – zvyčajne veľmi blízkej jednej – a šírky pásma rozlíšenia (RBW) nastavenej pre analýzu,
- $P_{ZŠ\ \{SSB,\ PDSCH\}}$ je úroveň výkonu spojená s SSB alebo prevádzkovým kanálom meraná v ZS.

3) **Demodulácia rámcov 5G**, kde $P_{5G\ odkaz}$ je definovaný ako priame meranie výkonu na pridružený RE s PDSCH ($P_{RE\ PDSCH}$), získané prostredníctvom demodulácia celého prijatého 5G rámca.

Vo všetkých troch prípadoch je technologicky špecifická konštanta $C$ definované v rovnici.1zostáva nezmenený a je uvedený v rovnici.5:

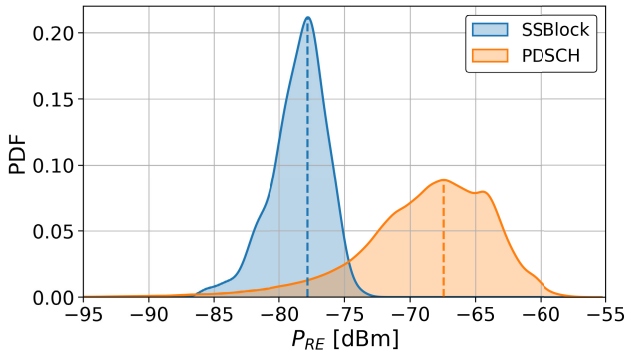
$$C = N_{sc} \cdot F_{Horná\ úvrat} \quad (5)$$

kde $N_{sc}$ zodpovedá celkovému počtu subnosných vln tvoriacich signál 5G (v tomto prípade sa rovná 1944) a $F_{Horná\ úvrat}$ = 0.743 je faktor pracovného cyklu charakteristický pre implementovanú schému TDD.

Ako predbežná aktivita, odhad $F_{extBeam}$ bol získaný z demodulovanej mriežky rekonštruovanej na obr.3 porovnaním rozloženia výkonu na RE spojeného s kanálmi SSB aj PDSCH (obr.8). Porovnaním modálnych hodnôt rozdelení sa získa hodnota $F_{extBeam}$ bola odvodená hodnota približne 10 dB. Táto hodnota sa uvádza ako kvantitatívna referencia z predbežnej charakterizácie, aby sa zdôraznil vplyv tohto parametra na konečné hodnotenia.

V rámci porovnávacieho testu boli účastníci povinní samostatne odhadnúť $F_{extBeam}$ a s tým spojenú neistotu. Táto voľba zabezpečila, že konečné výsledky odrážali plnú technickú spôsobilosť laboratórií pri zvládaní celého reťazca MPE s $F_{extBeam}$ neistota odhadu je implicitne zahrnutá do celkovej hlásenej neistoty merania.

Prevádzkové detaily metodík merania ZS a PDSCH založených na demodulácii rámcov nájdete v[10].




**OBRÁZOK 8.** Rozdelenie výkonu na RE priradené ku kanálu SSB aj PDSCH.

**TABUĽKA 3.** Antény používané meracími tímami.

| Type | Brand | Model |
|---|---|---|
| Log-periodic | R&S | HL050 |
| Omnidirectional | Electrometrics | EM 6856 |
| | | EM 6857 |
| | Keysight | NA6850 |
| Triaxial | Agos | ARIA 6000 |
| | Anritsu | 2000-1032-R |
| | Clampco | AP3000 |
| | | AT6000 |
| | Narda | 3502/01 |
| | R&S | TS-EMF B1/B2 |

### *E. MERANIE VÝKONU KANÁLA*

Počas druhého dňa merania boli účastníci požiadaní o vykonanie MPE prostredníctvom priameho merania CHP signálu 5G za plných prevádzkových podmienok PDSCH. Cieľom tejto relácie bolo porovnať výkon laboratórií v scenári merania, ktorý sa veľmi podobá bežným prevádzkovým činnostiam, a zároveň zohľadniť neistotu spôsobenú použitím rôznych prijímacích antén.

Účastníci museli vykonať meranie nasadením celého svojho meracieho reťazca, pozostávajúceho z VSA spolu s koaxiálnym káblom a prijímacou anténou. Vysoká úroveň účasti na vzájomnom porovnaní opäť umožnila testovanie širokej škály antén uvedených v Tab.3.

Dvojdňový harmonogram aktivít s jasne definovanými a odlišnými cieľmi tak umožnil samostatné posúdenie vplyvu rôznych zdrojov neistoty ovplyvňujúcich konečný výsledok merania. Stojí za zmienku, že celkový dizajn porovnávania – zahŕňajúci prístroje používané účastníkmi, špecifické nastavenia merania a skúmaný zdroj 5G (vrátane jadra, spektra a signál parametre) – f verne pripomína realistický operatívny podmienky ons.

A s tým z th e meranie použité nástroje počas interkom p podpaľovanie, pozdĺž s označením ja metodológie ea zariadenie ch bolo schopného podopierať, je dokázané ja vedené v tabuľke4 .

Ako je znázornené v Tab.4Merania , CHP a ZS zodpovedajú zavedeným metodikám, ktoré sa spoliehajú na štandardné možnosti spektrálnej analýzy, a preto sú podporované prakticky všetkými prístrojmi používanými zúčastnenými laboratóriami. Naproti tomu vektorová demodulácia SSB vyžaduje použitie vektorových spektrálnych analyzátorov, čo inherentne vylučuje staršie modely prístrojov; napriek tomu bola väčšina účastníkov vybavená modernými zariadeniami schopnými demodulovať riadiace kanály 5G. Nakoniec, extrapolácia založená na PDSCH je možná na oveľa menšej podmnožine prístrojov, pretože predstavuje ďalšie technické výzvy, ktoré vyžadujú špičkové analyzátory so širokou šírkou pásma demodulácie a špecializovaný softvér na synchronizáciu času a demoduláciu 5G v plnom rozsahu.

## V. RÁMEC HODNOTENIA ZODPOVEDNOSTI

Všetky hodnotenia spôsobilosti pre každý prístup MPE boli vypočítané podľa pokynov stanovených normou ISO 13528. [19]a ISO 17043[20]Tento rámec využíval robustné štatistické metódy, podobné tým, ktoré boli úspešne implementované v predchádzajúcom národnom porovnaní zameranom na signály 4G Long Term Evolution (LTE).[16]Vzhľadom na experimentálny dizajn zahŕňajúci opakované merania v rámci vopred definovaných priestorových pozícií a časových okien bola na určenie konsenzuálnej hodnoty (CV) x použitá robustná štatistika.$_m$pre meranú veličinu, čím sa minimalizuje vplyv anomálnych údajov. CV ($x_m$) je definovaný ako robustný priemer nameraných hodnôt, určený špecificky pomocou algoritmu A podrobne opísaného v prílohe C[19].

Znalosť každého účastníka sa primárne kvantifikuje prostredníctvom z-skóre, ktoré poskytuje normalizovanú mieru odchýlky individuálneho výsledku ($x_{ja}$) z variabilnej variácie (CV) vzhľadom na robustnú štandardnú odchýlku ($\sigma$)meranej sady. Jednotlivé z-skóre je definované v rovnici.6:

$$\text{z-skóre} = \frac{(x_{ja} - x_m)}{\sigma} \tag{6}$$

Dodržiavanie štandardných kritérií pre skúšky spôsobilosti:

- výsledok vykazuje dobrú zhodu, ak $|\text{z-skóre}| < 2$;
- výstražný signál sa spustí, ak $2 < |\text{z-skóre}| < 3$;
- Nezhoda sa deklaruje, ak $|\text{z-skóre}| > 3$.

Naopak, pre meracie metódy, ktoré neposkytujú dostatočné výsledky pre robustnú štatistickú analýzu (ako napríklad extrapolácia založená na priamom meraní výkonu PDSCH prostredníctvom plnej demodulácie 5G rámca), sa použila štandardná štatistika. V týchto prípadoch sa variačný koeficient určil ako aritmetický priemer nameraných hodnôt a štandardná odchýlka sa vypočítala ako priemer inštrumentálnych neistôt. Výsledky porovnania sú vizuálne prezentované pomocou metodiky PomPlot.[21], intuitívna grafická metóda, ktorá poskytuje súhrnný prehľad experimentálnych výsledkov bežnej meranej veličiny. PomPlot je obzvlášť užitočný, pretože umožňuje súčasné posúdenie presnosti (odchýlky od referenčnej hodnoty) a primeranosti súvisiacich

**TABUĽKA 4.** Meracie zariadenia: značka, model a použité metodiky.

| Brand | Model | CHP | ZS extr. | SSB extr. | PDSCH extr. |
|---|---|---|---|---|---|
| Anritsu | MS2090 | X | X | X | with external sw |
| Deviser | EM860F | X | X | X | |
| Keysight | N9934B | X | X | X | with external sw |
| | N9960B | X | X | X | with external sw |
| Narda | SRM3006 | X | X | X | |
| R&S | FSVA 3007 | X | X | X | X |
| | FSVA 3044 | X | X | X | X |
| | FSH-20 | X | X | | |
| | FSH-8 | X | X | | |
| | Scanner TSMA 6 | X | | X | |

hlásená neistota. Graf sa zostrojí mapovaním dvoch veličín pre výsledok každého účastníka:

1) Relatívna odchýlka na horizontálnej osi, ako je opísané v 7:

$$\frac{x - x_{odkaz}}{\text{ŠIALENÝ}} \tag{7}$$

kde čitateľ predstavuje odchýlku individuálneho výsledku od variátora a MAD je definovaný ako medián absolútnej odchýlky;

2) Relatívna neistota na vertikálnej osi, definovaná ako kombinovaná neistota normalizovaná MAD, ako je opísané v8:

$$\frac{u_y}{\text{ŠIALENÝ}} \tag{8}$$

PomPlot sa získa mapovaním kombinácie $\left(\frac{x-x_{odkaz}}{\text{ŠIALENÝ}}, \frac{u_y}{\text{ŠIALENÝ}}\right)$ pre každé meranie konkrétneho účastníka. Neistota u použitá na zvislej osi je kombinovaná neistota u malýodvodené z nezávislého súčtu neistoty u(x) hlásenej účastníkomlaboratóriumja) a neistota referenčnej hodnoty u(x odkaz). Graf obsahuje diagonálne plné čiary zodpovedajúceζ -skóre, kde |ζ| = 1,2,a 3. Tieto čiary vytvárajú pyramídovú štruktúru, ktorá uľahčuje interpretáciu, ako je znázornené na obr.1z[21]Body nachádzajúce sa na pravej strane PomPlot zodpovedajú výsledkom vyšším ako referenčná hodnota, zatiaľ čo nižšie hodnoty sú na ľavej strane. Bod nachádzajúci sa vysoko v PomPlot označuje nízku deklarovanú neistotu. Najpresnejšie výsledky – tie, ktoré preukazujú vynikajúcu konzistentnosť merania a realistické posúdenie neistoty – sa nachádzajú blízko vrcholu pyramídy. Naopak, body mimoζ=± 3 čiary sa vo všeobecnosti považujú za nezhodné s referenčnou hodnotou.

## VI. OZEULTS

Thisekta ja su bojové umenia r meria t on vonku prísťs t hodte porovnanie Kalifornistrana n, pred Sentíng výsledok s b ostatné C HP merania a Poslanec V extra apolatión p rocedyez.TonM Odborníkpoužitá hodnotený odp artemiká ipants s použitie g fnáš rozdiel nájomné et kámo s, a ho deň escria posteľ v posteli Sekcia . IV.:

1C HP ma uistiťment pod premávka c sila ing c podmienky;
2) Príklad trapéz ácia z ZS m easur emen ts;
3) Ex trapéz ácia z SSB cHanel de modul ácia;
4) Napr. trapéz ácia z PDSCH de modus latio n.

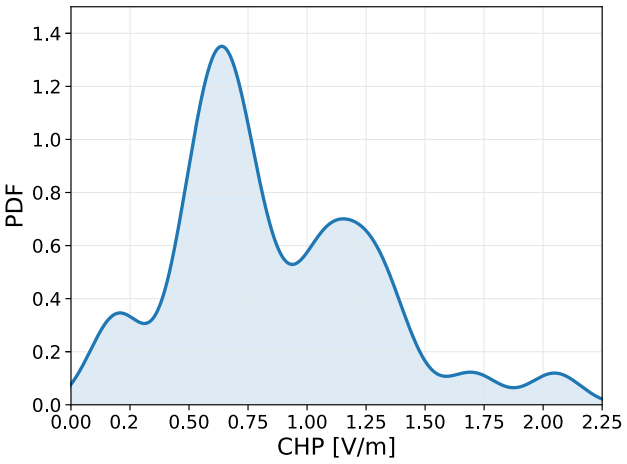
Výsledky porovnávania meraní CHP sú uvedené ako prvé (hoci tieto merania boli vykonané na druhý deň kampane), pretože CHP za podmienok plnej dopravnej sily sa bežne považuje za referenčnú hodnotu pre maximálnu expozíciu.[10].

Okrem toho sa uvádzajú agregované analýzy určení elektrického poľa na úrovni RE – získané pomocou rôznych metodík pre SSB aj PDSCH – s cieľom výlučne posúdiť meracie schopnosti zúčastnených skupín a ich prístrojových reťazcov. Nakoniec sa diskutuje o výsledkoch analýzy neistoty spojenej s rôznymi metódami, ako ich deklarovali účastníci.

### *A. VÝSLEDKY POROVNANIA PRE MERANIE CHP*

Ako už bolo uvedené, prenos v plnom rozsahu obrazu bol vynútený prostredníctvom špecializovaného zariadenia CPE umiestneného v blízkosti meracích bodov. Správna prevádzka zariadenia CPE bola monitorovaná riadením úrovne priepustnosti, čím sa zabezpečilo udržiavanie podmienok pre prenos v plnom rozsahu obrazu.

Napriek týmto podmienkam charakterizácia lokality odhalila nedostatok úplnej stability v úrovni vysielaného výkonu v rámci pásma, ako je znázornené na obr.4, čo vedie k bimodálnemu rozdeleniu výsledkov merania, ako je znázornené na obr.9.




**OBRÁZOK 9.** Rozloženie hustoty hodnôt elektrického poľa meraných pomocou odhadu výkonu kanála.

Po dňoch porovnávacích meraní operátor potvrdil, že toto správanie bolo spôsobené aktiváciou systémov riadenia výkonu implementovaných v základňovej stanici, ktoré fungujú náhodne znižovaním vysielacieho výkonu spojeného s prevádzkovým kanálom PDSCH.

Aby sa toto bimodálne správanie správne zohľadnilo, výsledky účastníkov boli agregované do dvoch dátových skupín pre vzájomné porovnanie. Prahová hodnota pre túto klasifikáciu bola objektívne určená použitím klastrovacieho algoritmu K-Means (k=2), ktorý identifikoval matematickú hranicu medzi dvoma modálnymi rozdeleniami pri 0,9 V/m. Následne boli dáta rozdelené nasledovne:

- **NÍZKA skupina**: do 0,9 V/m (19 účastníkov);
- **VYSOKÁ skupina**nad 0,9 V/m (14 účastníkov).

Obr.10a11prezentujte výsledky porovnania vo forme z-skóre a grafov PomPlot pre skupiny s nízkou a vysokou hodnotou.

*NÍZKA skupina:*Robustný priemer je 0,62 V/m s robustnou štandardnou odchýlkou 0,11 V/m (približne 18 % hodnoty elektrického poľa). V tejto skupine malo 55 % meraní $|z|<1$ a 80 % má $|z|<2$.

*HIGHgroup:*Robustný priemer je 1,22 V/m s robustnou štandardnou odchýlkou 0,19 V/m (približne 15 % hodnoty elektrického poľa). V tejto skupine malo 79 % meraní $|z|<1$ a 86 % má $|z|<2$, čo naznačuje väčšiu stabilitu a opakovateľnosť v porovnaní so skupinou LOW.

V oboch dátových skupinách možno pozorovať obmedzený počet odľahlých hodnôt. V skupine LOW sú tieto odľahlé hodnoty spojené najmä so zjavným podhodnotením elektrického poľa, zatiaľ čo v skupine HIGH zodpovedajú nadhodnoteniu. Toto správanie možno rozumne pripísať časovej nestabilite vysielaného výkonu zdroja 5G (pozri obr.4 ), čo si vyžadovalo manuálnu klasifikáciu výsledkov do skupín NÍZKYCH a VYSOKÝCH. Zaujímavým výsledkom je však to, že v prípade odľahlých hodnôt v oboch skupinách zostáva neistota spojená s meraniami veľmi obmedzená, dokonca nižšia ako hodnoty deklarované laboratóriami, ktoré spadajú do najmodernejšej oblasti PomPlot. Toto pozorovanie zdôrazňuje potenciálne kritický aspekt pri hodnotení rozpočtu neistoty, ktorý je ďalej analyzovaný v častiVI-G.

### *B. VÝSLEDKY POROVNANIA PRE MERANIA ZS*

Počas porovnávacej sekcie venovanej extrapolačným technikám založeným na meraniach ZS mohli účastníci voľne použiť buď postup založený na kombinovanom meraní SSB a $F_{\text{extBeam}}$, alebo ten založený na priamom meraní kanála PDSCH – použitím rovnice.3a rovnica.4, v uvedenom poradí. Výsledky získané z oboch prístupov boli agregované do tej istej štatistickej analýzy.

Výsledky porovnávania sú uvedené na obr.12, vyjadrené pomocou z-skóre aj grafov PomPlot.

Metódy MPE založené na prístupe ZS vo všeobecnosti preukázali dobrú opakovateľnosť medzi účastníkmi, pričom robustný priemer 1,17 V/m a robustná štandardná odchýlka 0,23 V/m, čo zodpovedá približne 20 % hodnoty elektrického poľa. V tomto prípade je 75 % z-skóre pod 1 a 88 % pod 2.

Aj v tomto prípade možno pozorovať len veľmi obmedzený počet odľahlých hodnôt, čo ďalej potvrdzuje, že merania založené na ZS predstavujú medzi zúčastnenými laboratóriami zavedenú a robustnú techniku. Konzistentne nízke hodnoty neistoty deklarované účastníkmi však naznačujú potrebu hlbšej analýzy postupov hodnotenia neistoty.

### *C. VÝSLEDKY POROVNANIA PRE SSB DEMODULÁCIU*

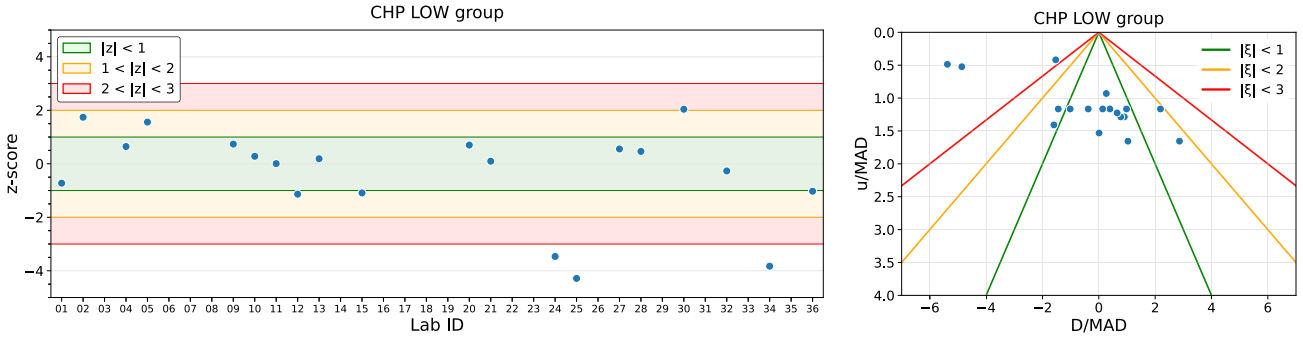
Metóda MPE založená na demodulácii SSB sa spolieha na použitie VSA, ktorá umožňuje získanie prijatej úrovne výkonu na RE priradený k riadiacim kanálom spolu s priamym vyhodnotením $F_{\text{extBeam}}$.

Stojí za zmienku, že kvôli výraznej nerovnováhe medzi úrovňami výkonu spojenými s PDSCH a SSB, približne 10 dB, ako je uvedené v kapitole...IV.— špecifická trieda VSA používaná deviatimi skupinami účastníkov vykazovala vážne problémy so správnou demoduláciou SSB. Konkrétne v šiestich z týchto skupín boli zlyhania synchronizácie také závažné, že nebolo možné zaznamenať žiadne platné meranie. Z tohto dôvodu boli výsledky poskytnuté týmito šiestimi skupinami vylúčené zo štatistickej analýzy – znázornené na obr.13– a boli riešené v následnom meraní zameranom výlučne na ne.

Je dôležité objasniť, že toto vylúčenie bolo spôsobené úplnou absenciou údajov o meraniach v dôsledku technických porúch synchronizácie, a nie odstránením anomálnych výsledkov. V dôsledku toho bolo týchto šesť skupín považovaných za neúčastníkov tejto konkrétnej relácie a ich absencia neovplyvňuje štatistickú robustnosť ani nezavádza skreslenie výberu v hlásených výsledkoch. To zdôrazňuje, ako môžu určité inštrumentálne reťazce čeliť objektívnym obmedzeniam pri správnom zachytení riadiacich signálov 5G v špecifických prevádzkových scenároch.

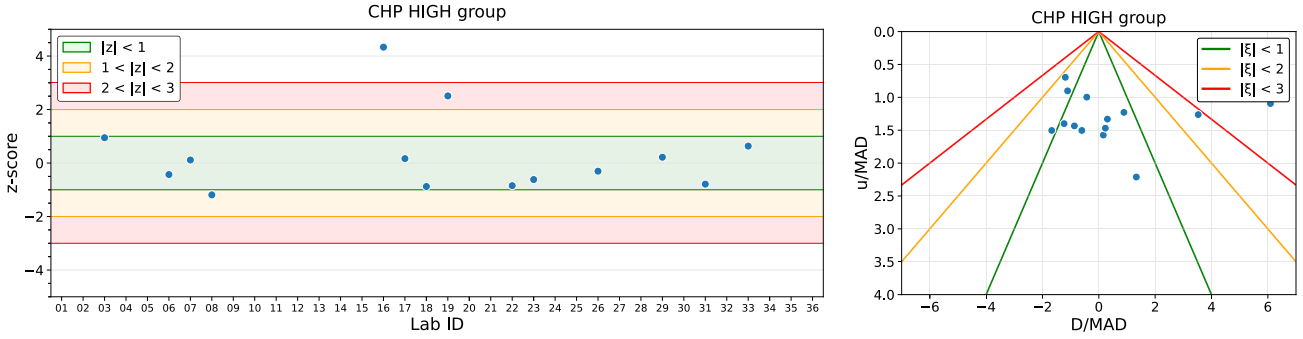
Prístup MPE založený na demodulácii SSB poskytuje robustný priemer 1,19 V/m a robustnú štandardnú odchýlku 0,31 V/m, čo zodpovedá približne 26 % hodnoty elektrického poľa. Tieto výsledky naznačujú všeobecne vyššiu variabilitu medzi účastníkmi v porovnaní s inými metódami MPE testovanými počas porovnávania. Toto je obzvlášť zrejmé pri skúmaní z-skóre, ktoré sú pod 1 iba v 61 % prípadov a pod 2 v 75 %. Dôvod pozorovaného rozptylu vo výsledkoch je dvojaký:

- vnútorná variabilita úrovní výkonu spojených s riadiacimi kanálmi, ako už bolo uvedené v kapitole...IV.;
- odozva rôznych prístrojov VSA pri spracovaní signálov charakterizovaných vynútenou prevádzkou a prenášaných s výrazným zvýšením výkonu v porovnaní s riadiacimi kanálmi.



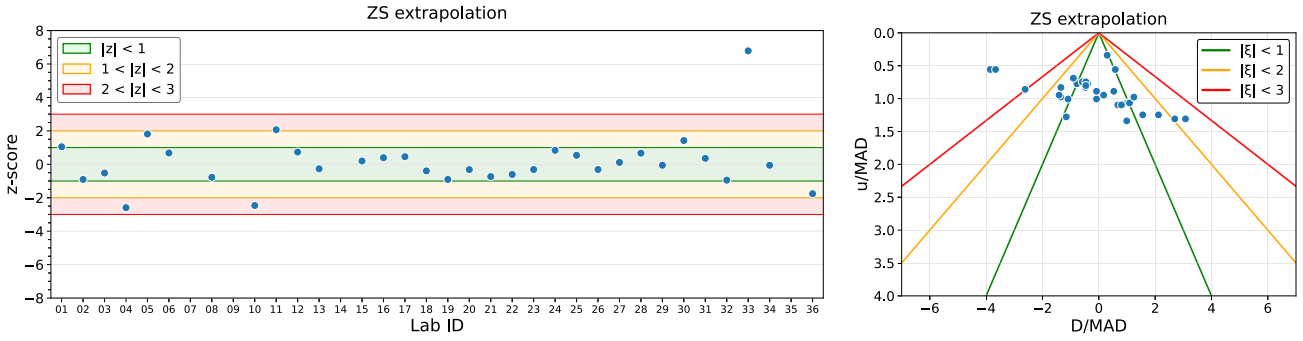

(a) z-score distribution (b) PomPlot

**OBRÁZOK 10.** Súhrnné výsledky merania kogenerácie – skupina NÍZKA.




(a) z-score (b) PomPlot

**OBRÁZOK 11.** Súhrnné výsledky merania kogenerácie – skupina HIGH.



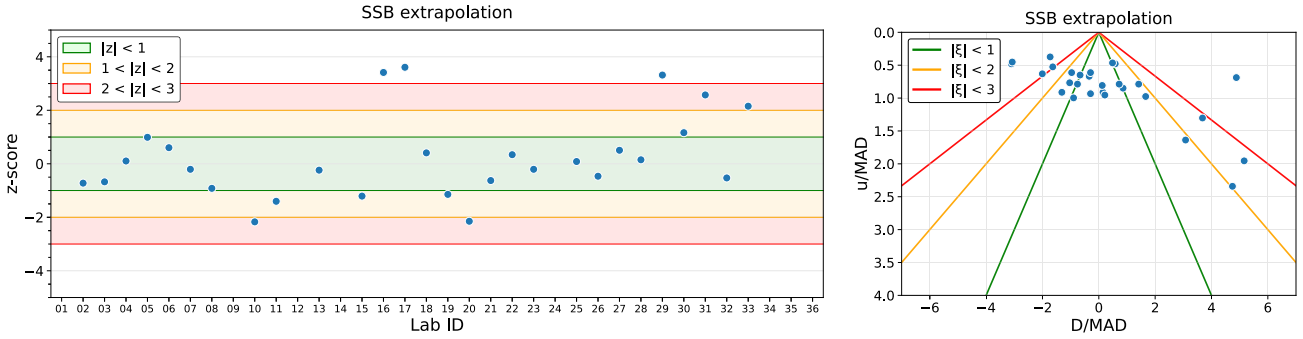

(a) z-score (b) PomPlot

**OBRÁZOK 12.** Súhrnné výsledky pre extrapoláciu ZS.

V porovnaní s predtým diskutovanými metódami vykazujú výsledky získané extrapoláciou založenou na SSB širší rozptyl vzhľadom na najmodernejšiu oblasť PomPlot. Toto správanie jasne naznačuje, že vektor demodulačné techniky, hoci sú vysoko informatívne a inovátor predstavujú pokročilé metódy merania ktoré sú citlivejšie na inštrumentálny výkon a prevádzkové nastavenia, a preto si stále vyžadujú konsolidované skúsenosti a starostlivé zaobchádzanie na dosiahnutie konzistentných a reprodukovateľné výsledky.

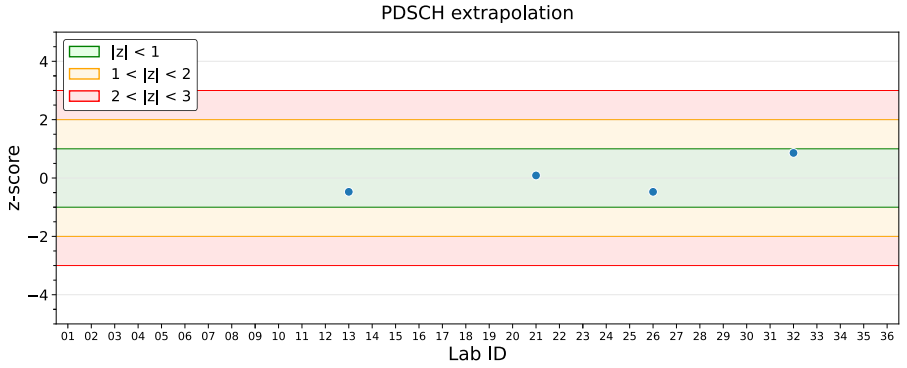
### *D. VÝSLEDKY POROVNANIA PRE MERANIE PDSCH*

Metóda MPE založená na demodulácii celého 5G rám a priame meraniet z toho úroveň výkonu e zadok spriaznený with RVs allo cated pre P. DSCH traf fikcia prenos wa platí dely al ja dem ber of par ICI pants (iba štyri). Toto malé všetky Samp le si ze jea hrozný CT Co n nasledovaný skce podpisu ní fiktívny te kapitálnická econo mikrofón challe nges ako kýkal sa s Pokročilý prístup SCH a alýza, ktorý požiadavka uires vysoký - koniec vstupy trúbenie vtip široký e m odulácia kapela šírka hje d. deň ideálny ovaný softvér

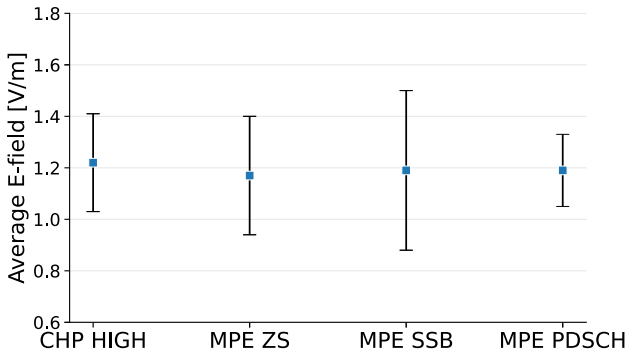



(a) z-score (b) PomPlot

**OBRÁZOK 13.** Agregované výsledky pre extrapoláciu založenú na SSB.




**OBRÁZOK 14.** Agregované z-skóre pre extrapoláciu založenú na PDSCH.




**OBRÁZOK 15.** Robustný priemer a štandardná odchýlka meraní elektrického poľa pre rôzne metodiky.

pre synchronizáciu celého obrazu – zariadenie, ktoré ešte nie je štandardom pre všetkých účastníkov. Výsledky uvedené v tejto časti preto nemajú za cieľ poskytnúť zovšeobecnený štatistické tvrdenie o reprodukovateľnosti. Namiesto toho ponúkajú predbežné a orientačné hodnotenie vysokovýkonného ja technológia, ktorá sa podľa očakávaní stane rozšírenejšou, laboratóriá modernizujú svoje trúbkové reťaze.

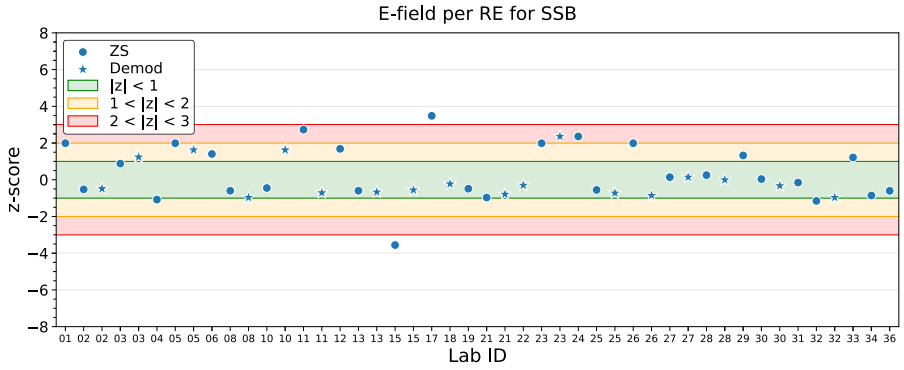
Pre tento dôvod, z-skóre boli vypočítané s použitím robustného priemeru a robustnej smerodajnej odchýlky, ktoré sú založené na aritmetickej priemere a štandardnej odchýlke, ktoré sú citlivé na odľahlé hodnoty. Napríklad, ak sú hodnoty (1,19 V/m) a (1,20 V/m) nahlásené dvoma účastníkmi a hodnota (0,14 V/m) jedným, robustný priemer a nástroj založený na mediáne sú ovplyvnené len mierne, zatiaľ čo aritmetická priemerná hodnota a štandardná odchýlka sú výrazne skreslené. Obr. 14 ilustruje z-skóre spojené s každou zo štyroch skupín, ktoré poskytli platné výsledky, potvrdzujúce vynikajúcu úroveň reprodukovateľnosti s $|z| < 1$ pre všetkých. Treba poznamenať, že vzhľadom na obmedzený počet účastníkov, ktorí použili túto metódu MPE, sa PomPlot spojený s výsledkami považoval za zbytočný.

### *E. GLOBÁLNE POROVNANIE RÔZNYCH METÓD MPE*

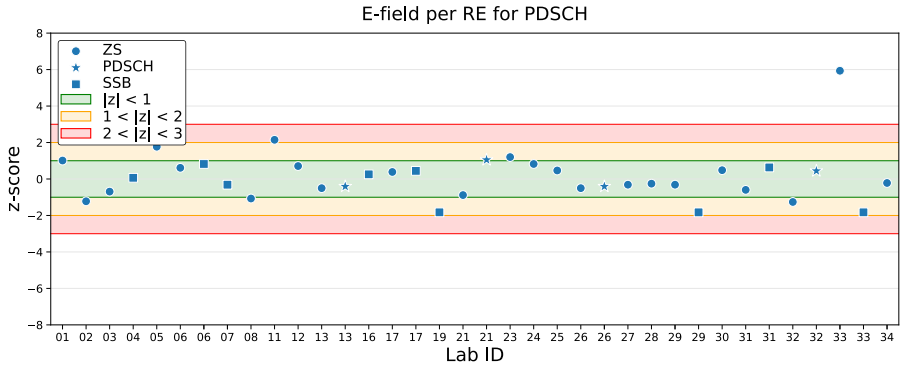
Zhrnutie celkových výsledkov je uvedené na obr. 15, ktorá zobrazuje robustné priemery a štandardné odchýlky pre rôzne metódy použité na odhad maximálnej expozície.

Graf jasne ukazuje, že výsledky rôznych metód sú plne porovnateľné z hľadiska priemerných hodnôt získaných z údajov účastníkov. Keďže prevažná väčšina účastníkov dosiahla prijateľné skóre kompatibility, tieto zistenia potvrdzujú, že laboratóriá boli schopné správne aplikovať postupy na odhad maximálnych expozícia a že pri správnej implementácii rôzne metódy

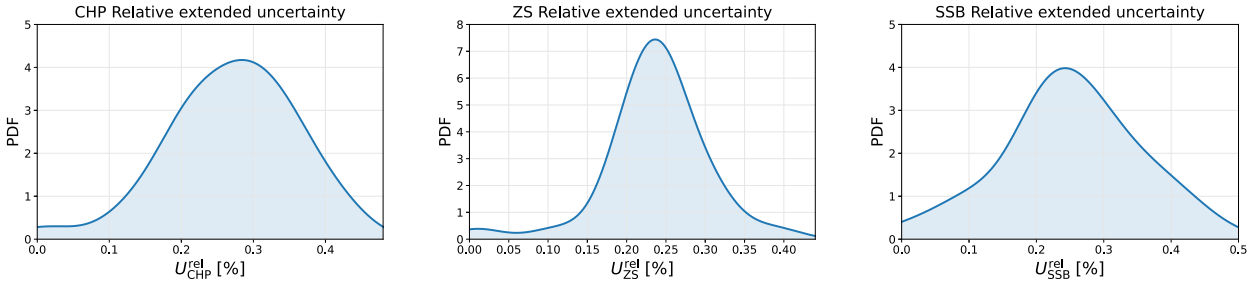
Ja to wo rth notýg tha t, pre r CHP ja aistýibe m nts
valextra striedajúcich Ted Fr om the HIGH g skupina boli v zahrnuté v
spolupráci mPariž n. Toto choice re ECTS ja zámer v zvážiť
ja asurem ent podvod dien v w vysoký tenpmoc criadiaci systém
ihneď element ed od t on tak urcebol predpoklad maby ja aktívny, teda




**OBRÁZOK 16.** Agregované z-skóre pre hodnoty E-poľa na RE v SSB.




**OBRÁZOK 17.** Agregované z-skóre pre hodnoty E-poľa na RE v prevádzkovom kanáli PDSCH.




(a) CHP measurement (b) ZS extrapolation (c) SSB extrapolation

**OBRÁZOK 18.** Rozdelenie neistoty deklarovanej účastníkmi pre rôzne techniky merania.

zabezpečenie priamej porovnateľnosti s výsledkami získanými z následne použitých techník MPE.

### *F. POROVNANIE MERANÍ ZNOVUNIVERZÁLNEJ NIVELACIE NAPRIEČ METÓDY*

V predchádzajúcich častiach sa porovnanie zameralo na extrapolácia procedures th v zahŕňa následné spracovanie surových údajov acquired v tom e pole. Do ex exkluzívne y ako ses vithe tém asu nov capabili väzby par ticipating gro typosa ten v ul:ya n vysoký Creťaze, toto n analýza bol vykonať ed čo to von aplikpl ying akýkoľvek MPE pr ocedures. Ins čajovník, elektrický pole v els za hriech gle RE boli priamo porovnávané pre riadiace kanály aj pre prenosové kanály bez ohľadu na použitú metódu merania.

Kľúčové štatistické ukazovatele pre každý typ kanála sú zhrnuté nižšie:

- **Obr.**16: z-skóre pre hodnoty elektrického poľa na RE v SSB. Robustný priemer = 0,0096 V/m, robustný štandard devia cia = 0,0027 V/m (približne 28 % z avera hodnota ge ue).
- **Obr.**17: z- skóre pre e elektrický pole hodnoty na RE v premávka c čan siete. Rtupý avera ge = 0 0,0316 V/m, robustné stáť ard de cestovanie n = 0.0053 V/m (a približne 17 % z toho e avera hodnota ge ue).

Celkovo tieto výsledky naznačujú väčšiu stabilitu a opakovateľnosť meraní prevádzkových kanálov v porovnaní s meraniami SSB, bez ohľadu na použitú metódu merania.

### *G. ANALÝZA NEISTOTY*

Aby sa posúdili schopnosti účastníkov, boli požiadaní, aby poskytli vlastný odhad štatistickej neistoty spojenej s úrovňami elektrického poľa, nameranými aj extrapolovanými počas všetkých porovnávacích aktivít. Väčšina účastníkov tejto požiadavke vyhovela, hoci hodnoty neistoty boli vyjadrené vo formátoch, ktoré neboli vždy priamo porovnateľné. Preto, aby sa umožnila konzistentná štatistická analýza, boli hlásené hodnoty predbežne spracované s cieľom extrahovať lineárnu rozšírenú relatívnu neistotu pre každú triedu merania.

Z analýzy neistôt spojených s rôznymi meraniami vyplýva, že rozdelenia sú znázornené na obr.18 rokov boli získané pre merania CHP a pre rôzne použité metódy MPE (prostredníctvom demodulácie ZS aj SSB). Pre extrapoláciu založenú na meraniach PDSCH nebolo možné odvodiť rozdelenie kvôli obmedzenému počtu dostupných údajov; preto sa brali do úvahy iba minimálne a maximálne hodnoty.

Obr.18 rokovukazuje, že pri meraniach CHP vykonaných s použitím rôznych prístrojových reťazcov (vrátane antény, kábla a analyzátora) vykazujú hodnoty neistoty relatívne široký rozptyl okolo modálnej hodnoty približne 28 %. Naproti tomu neistoty spojené s metódami MPE, kde sa merania vykonávali s použitím rovnakej antény a kábla, vykazujú nižšiu variabilitu s modálnymi hodnotami približne 24 % pre prístup s nulovým rozpätím a 22 % pre demoduláciu SSB.

Prístup ku kalibračným certifikátom – a teda k anténnym faktorom spojeným so všetkými meracími reťazcami používanými účastníkmi – umožnil identifikovať referenčnú neistotu pre každý reťazec. Táto referencia predstavuje dolnú hranicu celkovej neistoty merania, pretože zohľadňuje výlučne príspevok antény a zanedbáva ďalšie príspevky od iných prvkov reťazca.

Odhad tejto referenčnej neistoty umožnil rýchle, aj keď približné, overenie hodnôt globálnej neistoty deklarovaných účastníkmi jednoduchým porovnaním hlásenej hodnoty so zodpovedajúcou referenčnou neistotou. Prostredníctvom tohto porovnania sa v obmedzenom počte prípadov identifikovala všeobecná tendencia podhodnocovať celkovú neistotu merania, pretože niektoré deklarované hodnoty sa ukázali byť nižšie ako minimálny limit predstavovaný referenčnou neistotou. Je dôležité zdôrazniť, že podľa princípov porovnávania zodpovednosť za konzistentnosť údajov nesú účastníci, preto sa nepoužila žiadna korekčná normalizácia. Tento prístup zabezpečuje transparentné vyhodnotenie skutočných metodologických problémov pri hodnotení neistoty. Je potrebné poznamenať, že tieto hlásené neistoty boli použité iba na analýzu PomPlot a nie... neovplyvňuje výpočty z-skóre, ktoré sa spoliehajú na robustný rozptyl nameraných hodnôt.

Počet skupín, ktoré uviedli podhodnotenú hodnotu neistoty pre každú metódu, je zhrnutý nižšie:

- Merania CHP: 4 skupiny z 33;
- Extrapolácia ZS: 7 skupín z 32;
- Extrapolácia SSB demodulácie: 5 skupín z 21;
- Extrapolácia PDSCH: 2 skupiny zo 4.

Tieto výsledky jasne naznačujú, že naprieč účastníkmi a metodikami merania zostáva odhad rozpočtu neistoty kritickou otázkou, čo zdôrazňuje potrebu štandardizácie metód a špecializovaného školenia technikov.

## VII. ZÁVER A BUDUCIA PRÁCA

Národná porovnávacia kampaň poskytla komplexné vyhodnotenie úzkopásmových metodík na posudzovanie vystavenia EMF zo sietí 5G. Výsledky potvrdili, že všetky testované prístupy – CHP, ZS, demodulácia SSB a dekódovanie celého snímku – sú schopné poskytnúť konzistentné a porovnateľné odhady maximálnej expozície. Konkrétne, zatiaľ čo CHP sa ukázal ako najcitlivejší na mechanizmus riadenia výkonu implementovaný zdrojom, extrapolačné metodiky – založené na SSB aj PDSCH – ponúkli vynikajúcu stabilitu oddelením hodnotenia od fluktuácií vyvolaných prevádzkou. Napriek vnútornej zložitosti signálov 5G, ktoré sa vyznačujú dynamickými vzormi prevádzky a mechanizmami riadenia výkonu, rozptyl výsledkov účastníkov zostal relatívne obmedzený, pričom z-skóre bolo vo všeobecnosti pod 2. Skúmaním silných a slabých stránok rôznych meracích reťazcov kampaň potvrdzuje, že štandardizované metodiky prinášajú porovnateľné a spoľahlivé výsledky napriek nepredvídaným problémom – ako sú zlyhania demodulácie alebo obmedzená analýza PDSCH – čím demonštruje robustnosť postupov a uskutočniteľnosť harmonizovaného monitorovania EMF naprieč rôznymi prístrojmi.

Analýza tiež zdôraznila niektoré kritické aspekty. Aj za kontrolovaných podmienok s nútenou prevádzkou vykazoval signál 5G variabilitu parametrov, ako je alokácia výkonu a vypĺňanie rámcov, čo môže ovplyvniť stabilitu merania. Táto variabilita zdôrazňuje dôležitosť pokročilej technickej kompetencie pri konfigurácii prístrojov a interpretácii výsledkov. Okrem toho vyhodnotenie odhadov neistoty odhalilo všeobecnú tendenciu podceňovať globálnu neistotu merania, často pod minimálny príspevok, ktorý prináša faktor antény. Toto zistenie potvrdzuje, že hodnotenie neistoty zostáva kritickou otázkou, ktorá si vyžaduje osobitnú pozornosť.

Budúca práca sa zameria na zlepšenie prehľadnosti a použiteľnosti technických pokynov vrátane praktických príkladov a podrobných pokynov na podporu technikov pri správnom uplatňovaní extrapolačných metód. Ďalšie porovnávacie kampane by sa mali rozšíriť na vyššie frekvenčné rozsahy (pásma FR2) a zložitejšie scenáre zahŕňajúce

dynamické dopravné podmienky a efekty tvarovania lúča, ktoré predstavujú najnáročnejšie aspekty technológie 5G. Ďalším dôležitým smerom je integrácia pokročilých techník založených na dekódovaní a automatizovaných nástrojov na spracovanie údajov a výpočet neistoty, zameraných na zefektívnenie pracovných postupov a zníženie rizika ľudskej chyby. Toto úsilie prispeje ku konsolidácii robustného a harmonizovaného rámca pre monitorovanie elektromagnetického žiarenia v mobilných sieťach novej generácie, čím sa podporí dodržiavanie predpisov aj vedecký výskum.

## VIII. VYHLÁSENIE O DOSTUPNOSTI ÚDAJOV

Nespracované namerané údaje podporujúce zistenia tejto štúdie sú uložené na interných serveroch spoločnosti ARPAPiemonte. Tieto údaje boli spracované na odvodenie ukazovateľov výkonnosti použitých na porovnanie a vlastník údajov ich môže sprístupniť na základe odôvodnenej žiadosti, s výhradou inštitucionálneho povolenia.

## REFERENCIE


[1] *Stanovenie intenzity RF poľa, hustoty výkonu SAR v blízkosti základňových rádiokomunikačných staníc na účely hodnotenia vystavenia ľudí*, dokument IEC 62232, 2023. [Online]. Dostupné:https://webstore.iec.ch/publication/64934

[2] *Linee Guida Per La Misura Dei Campi Elettromagnetici Generati Da Sistemi Di Telecomunicazione in Tecnologia 5G*Prístup: 10. decembra 2025. [Online]. Dostupné:https://www.snpambiente.it/wp-content/uploads/2025/03/LGSNPAMisure5G.pdf

[3] S. Aerts, L. Verloock, M. Van Den Bossche, D. Colombi, L. Martens, C. Törnevik a W. Joseph, „Metodika merania in-situ na posúdenie vystavenia základňových staníc 5G NR masívnemu MIMO na frekvenciách pod 6 GHz,“*Prístup k IEEE*, zv. 7, s. 184658–184667, 2019.

[4] 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.

[5] L. Chiaraviglio, C. Lodovisi, D. Franci, S. Pavoncello, T. Aureli, N. Blefari-Melazzi a M.-S. Alouini, „Rozsiahle merania expozície 5G v meste: Metodika a výsledky“,*IEEE Open J. Commun. Soc.*, zv. 2, s. 2029–2048, 2021.

[6] MS Elbasheir, RA Saeed a S. Edam, „Meranie a simulácia v hodnotení expozície na vzdialenej vzdialenosti pre multitechnologickú bunkovú stanicu až do 5G NR,“*Prístup k IEEE*, zv. 10, s. 56888–56900, 2022.

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

[8] 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.

[9] I. Expósito, C. Hakizimali, M. García Sánchez, I. Cuiñas a J. Verhaevert, „Vystavenie ľudí elektromagnetickým poliam zo základňových staníc 5G: Analýza, hodnotenie a porovnanie rôznych metód hodnotenia“.*Meranie*, zv. 229, apríl 2024, čl. č. 114434.

[10] S. Adda, D. Franci, G. Marsico, N. Pasquino a S. Pavoncello, „Odhad maximálnej expozície RF-EMF systémami MIMO mmWave 5G pre jedného používateľa,“*IEEE Trans. Instrument. Meas.*, zv. 74, s. 1–10, 2025.

[11] S. Adda, T. Aureli, S. D'elia, D. Franci, E. Grillo, MD Migliore, S. Pavoncello, F. Schettino a R. Suman, „Teoretický a experimentálny výskum merania úrovne elektromagnetického poľa vyžarovaného základňovými stanicami 5G,“*Prístup k IEEE*, zv. 8, s. 101448–101463, 2020.

[12] 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.

[13] P. Bienkowski, „Medzilaboratórne porovnania v meraniach EMF prieskumu,“*environmentalista*, roč. 29, č. 2, s. 130–134, jún 2009.

[14] EP Nicolopoulou, IF Gonos, IA Stathopulos a E. Karabetsos, „Dva medzilaboratórne porovnávacie programy meraní EMF vykonané v Grécku,“*IEEE Elektromagnetická kompatibilita Mag.*, zv. 1, č. 2, s. 50–59, 2. štvrťrok, 2012.

[15] M. Mann, H. Brüggemeyer a P. Weiss, „Overovanie meraní elektromagnetického poľa prostredníctvom medzilaboratórnych porovnávacích meraní“,*Pokročilý rozhlasový vied.*, zv. 3, s. 83 – 89, máj 2005.

[16] L. Ardoino, S. Adda, L. Anglesio a E. Barbieri, „Selektívne elektromagnetické merania signálov 4G: Výsledky talianskeho národného porovnania,“*Prostredia*, zv. 7, č. 1, str. 5, január 2020.

[17] Talianska asociácia pre radiačnú ochranu (AIRP). (október 2019).*Program Národnej konferencie AIRP 2019 – Perugia*. [Online]. Dostupné:https: // www.airp-asso.it/wp-content/uploads/convegni/2019Perugia/Program a.pdf

[18] S. Adda, L. Chiaraviglio, D. Franci, C. Lodovisi, N. Pasquino, S. Pavoncello, C. Pedroli a R. Pelosini, „Poludnie pre mobilné siete: Krátkodobé merania elektromagnetického poľa na zachytenie dennej expozície,“*IEEE Trans. Instrument. Meas.*, zv. 72, s. 1–10, 2023.

[19] *Štatistické metódy na použitie pri skúškach spôsobilosti medzilaboratórnym porovnaním*, Norma ISO 13528, 2022.

[20] *Posudzovanie zhody – všeobecné požiadavky na spôsobilosť poskytovateľov skúšok spôsobilosti*, Norma ISO 17043, 2023.

[21] Y. Spasova, S. Pommé a U. Wätjen, „Vizualizácia výsledkov medzilaboratórneho porovnania v PomPlots“,*Zabezpečenie kvality akreditácie*, zv. 12, č. 12, s. 623–627, december 2007.

SÁRA ADDAZískala titul M.Sc. (cum laude) z fyziky a magisterský titul so špecializáciou v odbore fyzika zdravia na Turínskej univerzite v Turíne v Taliansku v rokoch 1998 a 2003. Od roku 1999 pracovala na oddelení fyzikálnych a technologických rizík ARPA Piemonte v Turíne, kde sa zaoberala kontrolou a monitorovaním neionizujúceho žiarenia a vývojom teoretických predikčných/numerických výpočtových metód, a to v nízkych aj vysokých intervaloch rádioaktívneho žiarenia. Podieľa sa aj na... v pracovných skupinách Talianskeho elektrotechnického výboru (CEI) pre vypracovanie technických noriem týkajúcich sa metód merania a hodnotenia vystavenia ľudí elektromagnetickým poliam. Zaoberá sa teoretickými a praktickými aspektmi súvisiacimi s meraním elektromagnetických polí na pracovisku. V tejto súvislosti je zástupkyňou regiónu Piemont v medziregionálnej technickej koordinačnej skupine. Zúčastňuje sa na európskych a medzinárodných kolaboratívnych projektoch zameraných na metódy a techniky merania a hodnotenia vystavenia ľudí elektromagnetickým poliam, a to na pracovisku aj v životnom prostredí.

ENRICA CAPUTOV rokoch 2000 a 2004 získala titul z fyziky a magisterský titul zo zdravotnej fyziky s environmentálnymi aspektmi na Turínskej univerzite. Od roku 2001 pracovala na oddelení fyzikálnych a technologických rizík ARPA Piemonte v Turíne v oblasti kontroly a monitorovania elektromagnetických polí. Jej hlavnými oblasťami práce je vývoj automatických monitorovacích systémov a webových aplikácií na analýzu a výpočty údajov. elektromagnetických polí, ELF aj RF. Podieľa sa na Národnom systéme ochrany životného prostredia (SNPA), najmä na pracovných skupinách pre redefiníciu metód výmeny a analýzy údajov medzi mobilnými operátormi a environmentálnymi agentúrami prostredníctvom prístupov s otvoreným zdrojovým kódom. Podieľa sa aj na spoločných projektoch medzi ARPA Piemonte a Mestským úradom pre životné prostredie v Pekingu zameraných na metódy merania a hodnotenia vystavenia ľudí elektromagnetickým poliam v obytnom a pracovnom prostredí.

LUCA CHIARAVIGLIO (Senior Member, IEEE) získal titul Ph.D. v odbore telekomunikačné a elektronické inžinierstvo na Politecnico di Torino v Taliansku. V súčasnosti je riadnym profesorom na Univerzite Tor Vergata v Ríme v Taliansku. Je spoluautorom viac ako 180 článkov publikovaných v medzinárodných časopisoch, knihách a na národných/ medzinárodných konferenciách. Niektoré z jeho článkov sú organizáciou IEEE uvedené ako Najlepšie čítania o zelenej komunikácii. Okrem toho má... bol uznaný ako autor v rebríčku 2 % najlepších svetových vedcov podľa aktualizácií celovedeckých databáz autorov so štandardizovanými citačnými indikátormi za roky 2021 – 2025. Je hlavným riešiteľom programu RESTART na Univerzite Tor Vergata v Ríme, pričom spravuje celkový rozpočet viac ako 10,2 milióna EUR. Jeho súčasné výskumné záujmy zahŕňajú siete 5G a B5G, optimalizáciu aplikovanú na telekomunikačné siete, elektromagnetické polia a hodnotenie zdravotných rizík komunikácie 5G a B5G. Získal cenu za najlepší článok na konferencii IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) – jar 2020, IEEE VTC – jar 2016 a na konferencii Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN) 2018, pričom na všetkých prácach vystúpil ako prvý autor.

DANIELE FRANCIV rokoch 2007 a 2011 získal titul M.Sc. (magna cum laude) a Ph.D. v odbore jadrová a subnukleárna fyzika na Univerzite Sapienza v Ríme v Taliansku. V rokoch 2009 až 2011 pracoval ako analytik-technológ v spoločnosti Nucleco SPA v Ríme, kde sa podieľal na rádiologickej charakterizácii rádioaktívnych odpadov z vyraďovania bývalých talianskych jadrových elektrární. V roku 2011 nastúpil do spoločnosti ARPA Lazio v Ríme, kde pôsobil ako... podieľa sa na hodnotení vystavenia ľudí rádiofrekvenčnému elektromagnetickému žiareniu. Od roku 2017 prispieva k aktivitám CEI, kde definuje technické postupy pre meranie elektromagnetického žiarenia zo zdrojov 4G/5G MIMO. V roku 2024 nastúpil do Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale v Ríme ako výskumný technológ.

FARIDA MAFIBALANIv súčasnosti študuje bakalárske štúdium inžinierskych vied na Univerzite Tor Vergata v Ríme. Jej dizertačná práca sa zaoberá analýzou meraní zhromaždených počas národného porovnávacieho testu 5G, ktorý sa konal v Ríme v júni 2025.

GIUSEPPE MARSICOsa narodil v Ríme v Taliansku v máji 1973. V rokoch 2002 a 2017 získal titul M.Sc. v odbore elektrotechnika a titul Ph.D. v odbore energetické inžinierstvo na Univerzite Sapienza v Ríme. V súčasnosti je vedúcim oddelenia neionizujúceho žiarenia v Talianskom inštitúte pre ochranu a výskum životného prostredia (ISPRA) v Ríme a poskytuje tiež technickú podporu talianskemu ministerstvu životného prostredia pri hodnotení elektromagnetického žiarenia. vplyv rádiových základňových staníc a elektrického vedenia. Je koordinátorom pracovnej skupiny pre elektromagnetické polia Národného systému ochrany životného prostredia (SNPA).

SETTIMIO PAVONCELLOsa narodil v Ríme v Taliansku v roku 1973. V roku 2001 získal titul M.Sc. v odbore telekomunikačné inžinierstvo na Univerzite Sapienza v Ríme. Od roku 2002 pracuje na oddelení EMF v Agenzia per la Protezione Ambientale del Lazio (ARPA Lazio) v Ríme. Špecializuje sa na merania elektromagnetického poľa a hodnotenie projektov EMF súvisiacich s rádiami, televízormi a systémami mobilnej komunikácie. má rozsiahle skúsenosti s používaním širokopásmových a selektívnych prístrojov. V uplynulých rokoch sa prehĺbil v problematike súvisiacej s meraniami signálov LTE a NB-IoT. Od roku 2018 sa aktívne zapája do pracovnej skupiny Talianskeho elektrotechnického výboru zameranej na definovanie postupov merania signálov mobilnej komunikácie a podieľa sa na rôznych projektoch týkajúcich sa merania signálov 5G.