Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

Tento článok bol prijatý na zaradenie do budúceho čísla tohto časopisu. Obsah je konečný v predloženej podobe, s výnimkou stránkovania.

Vystavenie ľudí elektromagnetickým poliam v 6G

Kancelárske nastavenia s technológiou RIS

Silvia Gallucci, Martina Benini, Serena Fiocchi, Emma Chiaramello, *Člen, IEEE* Gabriella Tognola a Marta Parazzini, *Člen, IEEE*

***Abstrakt*—*Ciele:*Táto štúdia hodnotí vystavenie ľudí rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam v kancelárskom prostredí vybavenom rekonfigurovateľnými inteligentnými povrchmi (RIS), kľúčovou technológiou pre siete 6G.*Metóda:*Pomocou dvojkrokovej metodiky kombinujúcej sledovanie lúčov pre odhad elektrického poľa a výpočty špecifickej miery absorpcie (SAR) sme vyhodnotili úrovne expozície celého tela (wbSAR) a mozgu (brainSAR) u ženských a mužských modelov pri viacerých konfiguráciách lúča na frekvencii 3,5 GHz. Boli skúmané dva scenáre: lúč RIS je určený na i) smerovanie k pracovným staniciam a ii) smerovanie k hypotetickému pohybujúcemu sa používateľovi. Analýza zahŕňala mapovanie priestorového rozloženia úrovní expozície, posúdenie maximálnej hodnoty SAR a štatistickú analýzu antropometrických a s držaním tela súvisiacich rozdielov medzi rôznymi konfiguráciami lúča.*Výsledky:*Výsledky ukazujú, že maximálne hodnoty brainSAR vo väčšine prípadov prevyšujú maximálne hodnoty wbSAR, pričom úrovne expozície vysoko závisia od konfigurácie lúča, polohy subjektu a jeho anatomických charakteristík. Táto štúdia ukázala, že v simulovanom scenári v interiéri sa rozdiely v úrovniach expozície súvisiace s anatómiou a polohou tela líšia v závislosti od prostredia v závislosti od relatívnej polohy ľudského tela a RIS. Je potrebné poznamenať, že nepoužívatelia môžu byť vystavení vyššej expozícii ako zamýšľaní používatelia v dôsledku zachytávania hlavného lúča v rôznych výškach. Všetky zistené úrovne expozície sú však výrazne pod limitmi odporúčanými smernicami ICNIRP.*Klinický alebo biologický vplyv:*Posúdenie expozície ukazuje, že absorpcia EMF z technológie RIS sa líši v závislosti od individuálnej anatómie a držania tela, čo má dôležité dôsledky pre navrhovanie vnútorných 6G prostredí v závislosti od rôznych používateľských profilov.

***Indexové výrazy*—Hodnotenie expozície, sledovanie lúčov, rekonfigurovateľný inteligentný povrch, 6G.**

Ja. JaÚVOD

Siete IX. GENERÁCIE (6G) sa v posledných rokoch čoraz viac etablujú s mnohými odchýlkami od pôvodného rámca, t. j. internetu vecí (IoT), napríklad internet lekárskych vecí (IoMT) alebo internet bojových vecí (IoBT).[1]Toto je možné vďaka funkciám, ktoré takáto technológia sľubuje ponúknuť: realizácia inteligentného rádiového prostredia[2]v ktorom bude implementovaná virtuálna/rozšírená realita, prepojené a monitorované zdravie, lokalizácia interiéru s vysokým rozlíšením a mnoho ďalších funkcií[3]Táto rozsiahla inovácia umožní realizovať „inteligentné prostredie“, v ktorom sa prostredie stane súčasťou celej siete interakciou s ostatnými koncovými bodmi, ktoré patria do tej istej komunikačnej infraštruktúry.

Inštalácia tzv. rekonfigurovateľných inteligentných povrchov (RIS) v prostredí 6G je sľubnou možnosťou implementácie inteligentnosti v prostredí. Technológia RIS je založená na metapovrchoch.[4]pozostávajúce z jednotkových buniek s menšími vlnovými dĺžkami s laditeľnými elektromagnetickými odozvami vrátane amplitúdy, fázy, polarizácie a frekvencie. Tieto charakteristiky je možné ovládať aj externými signálmi v reálnom čase a rekonfigurovať ich.[5]Základný princíp je založený na manipulácii s fázou prvku tvoriaceho RIS, aby sa dosiahol koeficient odrazu, ktorý týmto spôsobom už viac nedodržiava Snellův zákon.[6]Okrem toho dokáže RIS zaostriť lúč v definovanom smere, ktorý smeruje k obsluhovanému zariadeniu. V dôsledku toho umožňuje RIS prekonať limit komunikácie bez priamej viditeľnosti (NLOS) generovaním virtuálnych nových priamych viditeľností (LOS) kontrolovateľným a dynamickým spôsobom, čím sa zaručí stabilná a efektívna komunikácia.[6]Okrem toho inštalácia systému RIS umožňuje, aby sa prostredie stalo skutočne „inteligentným“: aktívnou súčasťou siete 6G, ideálne pokrytím objektov oddeľujúcich komunikačné koncové body systémami RIS.[7]RIS sa dajú využiť na mnoho rôznych účelov, od lokalizačných systémov v interiéri[8]k bezdrôtovému prenosu energie[9]a to je možné, pretože pracujú v niekoľkých frekvenčných pásmach, od pásma FR1-sub-6 GHz (410 – 7125 MHz) až po milimetrové vlny (30 – 300 GHz).[4]Môžu byť použité v interiéri aj exteriéri, kde sú prekážky rôznych typov.[10].

Integrácia tejto novej technológie do siete má vplyv na rozloženie elektrického poľa (E, V/m) v prostredí. V dôsledku toho sa môže zmeniť vystavenie ľudí elektromagnetickým poliam, čo ovplyvní tak maximálne úrovne absorpcie výkonu, ako aj najviac ovplyvnenú anatomickú oblasť.

V posledných rokoch narastá záujem aj obavy týkajúce sa vystavenia ľudí elektromagnetickým poliam, najmä v súvislosti s týmito novými technológiami. Tieto obavy boli tiež hnacou silou pre začatie začleňovania vystavenia ľudí ako metriky, ktorú treba minimalizovať v procese prideľovania zdrojov. [11]Dizajnové prístupy zamerané na túto úvahu sú

Prijaté 11. marca 2026; revidované 5. júna 2026 a 13. júla 2026; schválené 30. júla 2026. Túto prácu podporila Európska únia – Next Generation EU prostredníctvom talianskeho Národného plánu obnovy a odolnosti (NRRP) v rámci grantu PE00000001 a grantu CUP B53C22003970001.*(Autor korešpondencie: Silvia Gallucci.)*

Autori sú z Istituto di Elettronica e di Ingegneria dell'Informazione e delle Telecomunicazioni, Consiglio Nazionale delle Ricerche, 20133 Miláno, Taliansko (e-mail: silvia.gallucci@cnr.it ; martina.benini@cnr.occhi ; serena.it ; serena . emma.chiaramello@cnr.it ; gabriella.tognola@cnr.it ; marta.parazzini@cnr.it);

Identifikátor digitálneho objektu 10.1109/JERM.2026.3719474

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

Tento článok bol prijatý na zaradenie do budúceho čísla tohto časopisu. Obsah je konečný v predloženej podobe, s výnimkou stránkovania.

nazývaný*S vedomím EMF*, pričom vystavenie človeka sa berie do úvahy počas fázy návrhu siete[12], takže čistý výkon siete je vyvážený spotrebou energie a vystavením elektromagnetickým poliam. Súčasná literatúra obsahuje len málo štúdií zameraných na komunikačné siete so zabudovanými RIS, ktoré implementujú *S vedomím EMF*prístup (pozri napríklad[13],[7],[14]). Tieto práce sa zvyčajne zameriavajú na minimalizáciu environmentálneho elektrického poľa bez výpočtu,*de facto*, dávka EMF absorbovaná ľudskými modelmi.

V tomto rámci sme uskutočnili prvú štúdiu[15]posúdiť vplyv RIS na dávku EMF absorbovanú ľudským telom vo vnútornom prostredí. Skúmali sme úrovne expozície EMF v dvoch základných scenároch, pričom sme zaviedli terminológiu, ktorú používame aj ďalej: „používateľ" sa vzťahuje na subjekt, ktorého zariadenie má byť obsluhované RIS, zatiaľ čo „nepoužívateľ" označuje akýkoľvek iný subjekt, ktorý sa potenciálne nachádza kdekoľvek v rámci scenára. Štúdia zistila, že prítomnosť EMF opätovne ožiarených RIS pracujúcim v pásme pod 6 GHz má vplyv na expozíciu ľudí z hľadiska vrcholu aj rozloženia úrovní absorpcie výkonu a že v niektorých konfiguráciách môže byť expozícia nepoužívateľa väčšia ako expozícia používateľa v dôsledku relatívnej polohy a orientácie RIS vzhľadom na polohu ľudského subjektu. Táto predchádzajúca štúdia však predstavuje obmedzenia súvisiace najmä so simulovanými scenármi, pretože nie sú dostatočne realistické, pretože používajú prázdne miestnosti.

Aby sme rozšírili naše chápanie vystavenia ľudí žiareniu v každodennom prostredí pomocou RIS, táto práca skúma danú problematiku v komplexnejšom a realistickejšom scenári v interiéri, ktorý zahŕňa prvky typickej kancelárie. Konkrétne bola posúdená expozícia dvoch dospelých ľudských modelov v realistickom scenári kancelárie vybavenej RIS pracujúcim na frekvencii 3,5 GHz. Výber prevádzkovej frekvencie 3,5 GHz pre tento zjednodušený model siete 6G je ovplyvnený definíciami pásma pod 6 GHz v[7]a zavedenú literatúru pre vnútorné scenáre (pozri napríklad[19]). Cieľom RIS v kancelárii bolo opätovne ožiariť EMF generované zdrojom Wi-Fi umiestneným na chodbe, čím sa zaviedol príspevok EMF hodný samostatnej štúdie. Lúč RIS bol riadený podľa dvoch odlišných prevádzkových scenárov:*Scenár A*, kde lúč zostáva fixovaný smerom k konkrétnej pracovnej stanici a *Scenár B*, kde lúč dynamicky sleduje hypotetického používateľa pohybujúceho sa po kancelárii. Posúdenie expozície sa tu vykonalo dvojkrokovým prístupom. Najprv sme odhadli rozloženie environmentálneho elektrického poľa (E, V/m) v kancelárii metódou sledovania lúčov; po druhé sme analytickým prístupom posúdili množstvo energie absorbovanej celým ľudským telom a iba mozgom. Vyhodnotili sme úrovne expozície pre dospelých mužov aj ženy, pričom sme ich posudzovali v dvoch podmienkach: ako používateľov a ako nepoužívateľov zariadení. Analyzovali sme aj polohy modelov (t. j. sedenie a státie), aby sme zistili, ako ovplyvňujú expozíciu ľudí. V súlade s cieľom izolovať novú zložku expozície zavedenú nasadením RIS sa táto práca zameriava výlučne na príspevok RIS v rámci už existujúcej vnútornej siete a do simulácie nezahŕňa primárny zdroj EMF (t. j. prístupový bod Wi-Fi). Expozícia v dôsledku vnútorných zdrojov Wi-Fi bola rozsiahlo charakterizovaná v špecializovanej literatúre.[16],

[17]Analyzujú sa aj variácie expozície súvisiace s anatómiou a držaním tela v rôznych konfiguráciách lúča.

II. Metody

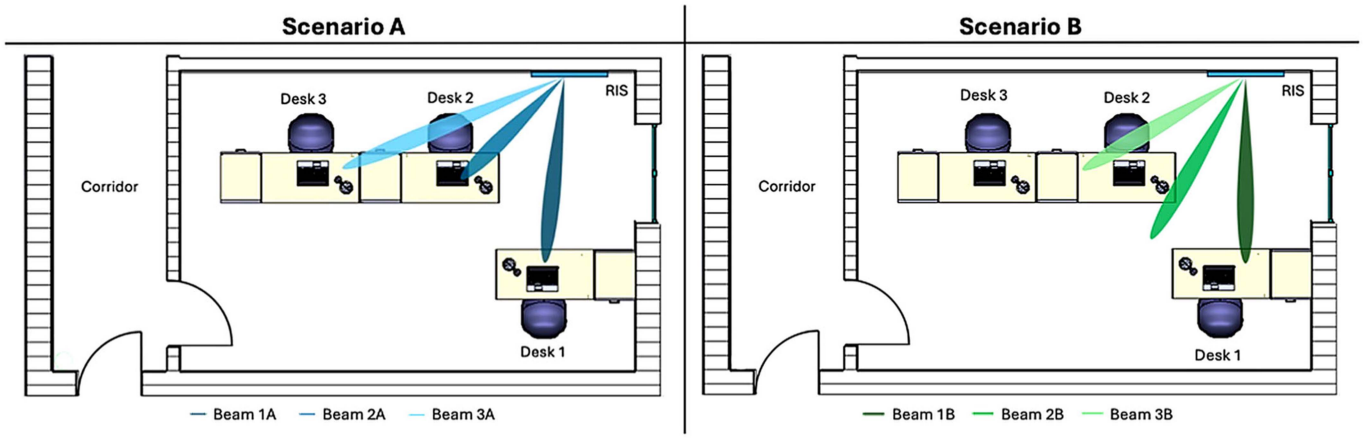
A. Vnútorný scenár

Simulovaný kancelársky scenár je znázornený na obr.1 ktorá zobrazuje celé prostredie s obvodovými stenami s hrúbkou 0,3 m, pozostávajúce z miestnosti a chodby širokej 1,4 m, kde je možné rozumne umiestniť primárny zdroj Wi-Fi. Chodba je od kancelárie oddelená vnútornou stenou s hrúbkou 0,1 m. Celkové rozmery kancelárie sú 5,5×3.4×2,7 m^3a stena oproti vchodu má okno so šírkou 1,2 m. Miestnosť je zariadená typickým kancelárskym nábytkom: tri stoly s rozmermi 1,2×0,61×0,8 m^3, pričom každá z nich je vybavená komodou a kancelárskou stoličkou. Na každom stole sa nachádza spoločný notebook a kovová lampa. RIS bol umiestnený v hornej časti ľavej obvodovej steny vzhľadom na vchod vo výške 2,2 m od zeme. Pre modelovanie RIS sme zvolili diskrétny prístup. [18]pozostávajúci z RIS modelovaného ako MIMO anténa s planárnymi prvkami 20 x 20 s rovnomerným rozostupom medzi prvkami polovičnej vlnovej dĺžky ($\lambda/2$=4,29 cm@ 3,5 GHz), naladený na 3,5 GHz s celkovým vyžarovaným výkonom (TRP) nastaveným na 0,1 W, čo zodpovedá limitu 20 dBm pre vnútorné použitie[23]RIS bol modelovaný ako dielektrická vrstva RT Rogers Duroid 5880 a vyžarujúci prvok a uzemňovacia rovina boli vyrobené z medi. Aby sa riešila priestorová variabilita riadenia lúča RIS, táto štúdia zvažovala rôzne smery, pozdĺž ktorých je lúč smerovaný. Konkrétnejšie boli implementované dve hlavné prevádzkové podmienky RIS: i)*Scenár A*(Obr.1 písm. a)), kde boli uhly nastavené tak, aby lúč smeroval k notebookom na stoloch, jeden po druhom, čo viedlo k*Nosník 1A*,*Nosník 2A*a*Nosník 3A*smerom k pultu 1, pultu 2 a pultu 3. ii)*Scenár B*(Obr.1 písm. b)), v ktorom boli definované tri uhly, ktoré pokrývali možné pohyby hypotetického používateľa v kancelárii; tu bol elevačný uhol fixný tak, aby sa dosiahlo zariadenie používateľa, ktoré sa nachádza vo výške jeho/jej pupka, zatiaľ čo azimutálne uhly sa menili podľa*Nosník 1B*,*Nosník 2B*a*Nosník 3B*, ktoré sú 0°, 30° a 60° v uvedenom poradí. Hodnoty elevácie a azimutu všetkých simulovaných lúčov sú zhrnuté v tabuľkeJaMimochodom, zvýšenie azimutu a elevácie z*Nosník 1*k*Nosník 3*v oboch scenároch to zodpovedá poklesu smerovosti RIS v dôsledku vzostupu bočných lalokov, ktoré rozptyľujú časť výkonu, ktorý by inak bol sústredený iba v hlavnom laloku.

B. Výpočet elektrického poľa a ľudské modely

Environmentálna E bola odhadnutá pomocou validovanej metódy sledovania lúčov[19]implementované v elektromagnetickom softvéri CST Studio Suite. Podrobnejšie, asymptotický riešič založený na technike Shooting and Bouncing Rays (SBR) [20]inherentne zohľadňuje priamu cestu šírenia z RIS do každého prijímacieho bodu a príspevky viaccestného šírenia vyplývajúce z odrazov od stien, podlahy, stropu a povrchov nábytku. Odrazy sa sledujú až do nakonfigurovanej maximálnej vzdialenosti lúča (2λ), pričom dielektrické vlastnosti každého materiálu (uvedeného vyššie) určujú koeficienty odrazu na každom povrchu. Minimálny počet lúčov bol stanovený na 1000,

Tento článok bol prijatý na zaradenie do budúceho čísla tohto časopisu. Obsah je konečný v predloženej podobe, s výnimkou stránkovania.



Obr. 1.*(Vľavo)*Zastúpenie*Scenár A*v ktorom sú tri lúče opätovne vyžarované RIS, každý označený inou farbou, smerované k pracovným staniciam.*(Správne)* Zastúpenie*Scenár B*, kde tri farby predstavujú lúče opätovne vyžarované RIS. V tomto scenári je každý lúč smerovaný k zariadeniu hypotetického používateľa v kancelárii. Poznámka: Toto znázornenie je ilustratívne a zobrazuje iba smer hlavného lúča; bočné laloky a viaccestné efekty sú zahrnuté v skutočných simuláciách, ale tu nie sú zobrazené.

TABUĽKA I
AZIMUTH AVLEVÁCIAAUHLYSIMULOVANÝB.EAMS VSCENÁRIOAASCENÁRIOB.

	Scenario A			Scenario B		
	Beam 1A	Beam 2A	Beam 3A	Beam 1B	Beam 2B	Beam 3B
Azimuth Angle	5.5°	45°	66°	0°	30°	60°
Elevation Angle	-22°	-54°	-54°	-54°	-54°	-54°

s minimálnou a maximálnou dĺžkou lúča 0,03λa 2λ V tomto usporiadaní sa difrakčný jav a difúzny rozptyl nezohľadnili[15].

Každý prvok scenára bol charakterizovaný vlastnými dielektrickými vlastnosťami. Obvodové a vnútorné steny boli charakterizované ako jednoročný betón (ε_r=5.47), konštrukcia stolov a komôr bola simulovaná ako hliníková (σ=3,56×10$_7$S/m), zatiaľ čo zodpovedajúce police sú ako drevo (ε_r=1.72) a nakoniec boli kancelárske stoličky modelované ako vyrobené z polypropylénu (ε_r=3.1,σ= 6,03×10$_{-4}$S/m).

Hodnota E bola odhadnutá v celom prostredí pomocou 720 prijímačov umiestnených v mriežke 36×20 bodov, ktoré sú od seba vzdialené približne 0,15 m, pozdĺž smerov x a y, aby sa získalo 2D mapovanie E. Každý prijímač predstavuje potenciálnu polohu, ktorú by osoba mohla v danom scenári zaujať. Okrem toho sme predpokladali, že v každej potenciálnej polohe sa človek môže nachádzať v dvoch hlavných polohách: sedieť alebo stáť. Pre každú z týchto dvoch polôh sa získala dávka EMF absorbovaná celým telom a iba mozgom, vychádzajúc z odhadu E v cieľových výškach: v oblasti nosa pre dávku absorbovanú mozgom a ako priemerná hodnota E odhadnutá v niekoľkých výškach, čím sa ľudské telo rozdelí na segmenty vzdialené od seba 20 cm pre dávku absorbovanú celým telom. Všetky tieto výšky sa menia v závislosti od anatomických charakteristík sledovaného ľudského modelu a jeho polohy v sede alebo stoji. Konkrétne, v tejto štúdii boli prevzaté z modelov dospelých žien a mužov z Virtuálnej populácie (ViP).[21], Ella (vek = 26 rokov, výška = 1,63 m, BMI = 21,6 kg/m^2$_2$) a Duke (vek = 34 rokov, výška = 1,77 m, BMI = 22,4 kg/m^2$_2$).

C. Odhad špecifickej miery absorpcie

Po odhade E v simulovanom prostredí, aby sa posúdila expozícia ľudí v dôsledku RIS, bola špecifická miera absorpcie pre celé telo a mozog (wbSAR, W/kg) a špecifická miera absorpcie pre mozog (W/kg) odhadnutá pomocou vzorcov v práci Liorniho a kol.[22]:

$$brainSAR(f) = (V_{vrátane}/V_{odkaz})_2 * SAR_{mozog-REF}(f) \quad (1)$$

$$wbSAR(f) = (V_{vrátane}/V_{odkaz})_2 * (BMI_{referenčný\ model}/BMI) * SAR_{wb-REF}(f) \quad (2)$$

kde E$_{vrátane}$je environmentálna E predtým odhadnutá pomocou sledovania lúčov v každom simulovanom scenári v rôznych výškach (t. j. v nose pre brainSAR a ako priemer odhadovanej E rozdelením ľudského tela na segmenty vzdialené 20 cm pre wbSAR), ako bolo uvedené predtým. Vzorce sú platné v podmienkach expozície vo vzdialenom poli, pretože sú odvodené z výpočtovej štúdie, v ktorej boli virtuálne ľudské modely ViP ožiarené súborom rovinných vĺn s E$_{odkaz}$, čo je 2,45 V/m. Index telesnej hmotnosti (BMI, kg/m$_2$) členov ViP použitých v štúdii Liorniho a kol.[22]sú hlásené v(2)ako BMI $_{referenčný\ model}$a sú normalizované na BMI skúmaného subjektu. V našej štúdii sa však zhodujú, a preto je tento pomer 1. Nakoniec, obe hodnoty SAR$_{wb-REF}$a SAR$_{mozog-REF}$sú frekvenčne závislé koeficienty uvedené v doplnkových materiáloch od Liorniho a kol.[22].

Tento článok bol prijatý na zaradenie do budúceho čísla tohto časopisu. Obsah je konečný v predloženej podobe, s výnimkou stránkovania.

TABUĽKA II
PEAKV.HODNOTY[MS/KG]SVETOVEJ BANKYSARA MOZOGSAR OZÍSKANÉ VTWOPÚSTRY VNÚTRISCENÁRIOAWITHALLB.EAMS ATWOHUMANMODELY

	Sitting Model				Standing Model			
	Ella		Duke		Ella		Duke	
	brainSAR	wbSAR	brainSAR	wbSAR	brainSAR	wbSAR	brainSAR	wbSAR
Beam 1A	2.7	3.5	3.8	5.7	5.2	2.6	7.2	2.1
Beam 2A	1.6	6	1.6	3.4	5.3	1	1.6	1.3
Beam 3A	0.6	1.2	0.7	1.3	0.8	0.3	1.9	0.9

Vďaka tomuto prístupu bolo možné získať 2D mapy expozície ľudí v celom skúmanom prostredí, čím sa preskúmala expozícia používateľov aj nepoužívateľov.

Elektrické pole prostredia z RIS sa presne vypočíta pomocou techniky sledovania lúčov SBR v celom vnútornom priestore. Rovnice(1)a(2), hoci sú odvodené pre expozíciu vo vzdialenom poli, sa potom použijú na odhad SAR z tohto rozloženia poľa. Predchádzajúce základné štúdie[23], [24]preukázali, že priestorovo spriemerované metriky SAR (celotelové a mozgové) vykazujú obmedzenú citlivosť na podmienky expozície blízkemu poľu oproti vzdialenému poľu, pretože priestorové spriemerovanie, ktoré je vlastné týmto metrikám, zmierňuje lokálne nerovnomernosti poľa. Konkrétne,[23],[24] (pozri najmä obr. 6.33 na strane 167[24]) vyhodnotil priemerný SAR ako funkciu vzdialenosti medzi zdrojom a telom v sféroidnom modeli priemerného človeka vystaveného blízkemu poľu krátkych elektrických a magnetických dipólov. Pri porovnaní týchto hodnôt s priemerným SAR získaným za podmienok absorpcie vo vzdialenom poli, v[23]Dospeli k záveru, že priemernú hodnotu SAR v rámci charakteristík blízkeho a vzdialeného poľa možno vysvetliť rovnakým spôsobom. Tento prístup bol úspešne použitý v predchádzajúcich hodnoteniach expozície RIS v interiéri aj exteriéri.[15],[25], čo potvrdzuje platnosť predpokladu vzdialeného poľa pre výpočet absorbovanej dávky.

D. Analýza údajov

Hodnoty wbSAR aj brainSAR sme analyzovali dvoma spôsobmi. Najprv sme analyzovali maximálne hodnoty získané vo všetkých scenároch. Po druhé, aby sme pochopili, ako boli hodnoty SAR priestorovo rozložené, vytvorili sme 2D mapy. Tieto mapy zobrazujú maximálnu hodnotu SAR pre každú potenciálnu pozíciu (x, y), ktorú by osoba mohla v danom scenári zaujať, berúc do úvahy tri rôzne smery lúča RIS v každom hlavnom scenári (t. j. A alebo B).

Analýza údajov sa zamerala aj na zistenie rozdielov v úrovniach expozície na základe pohlavia. V každom bode mapy sa vypočítal relatívny percentuálny rozdiel medzi mužskými a ženskými modelmi s použitím ženského modelu ako východiskovej hodnoty. Táto metrika kvantifikuje relatívnu odchýlku medzi pohlaviami; následne sa vypočítali mediánové hodnoty a interkvartilové rozpätia (IQR). Podobná analýza sa vykonala na porovnanie úrovní expozície vyvolaných v sediacej a stojacej polohe.

III. RVÝSLEDKY

V nasledujúcich podsekciách sú prezentované všetky výsledky podľa súvisiaceho scenára. Pre každú sekciu sú zobrazené maximálne hodnoty SAR, 2D mapy a stĺpcové grafy s mediánovými hodnotami a medzikvartilovými rozsahmi (IQR).

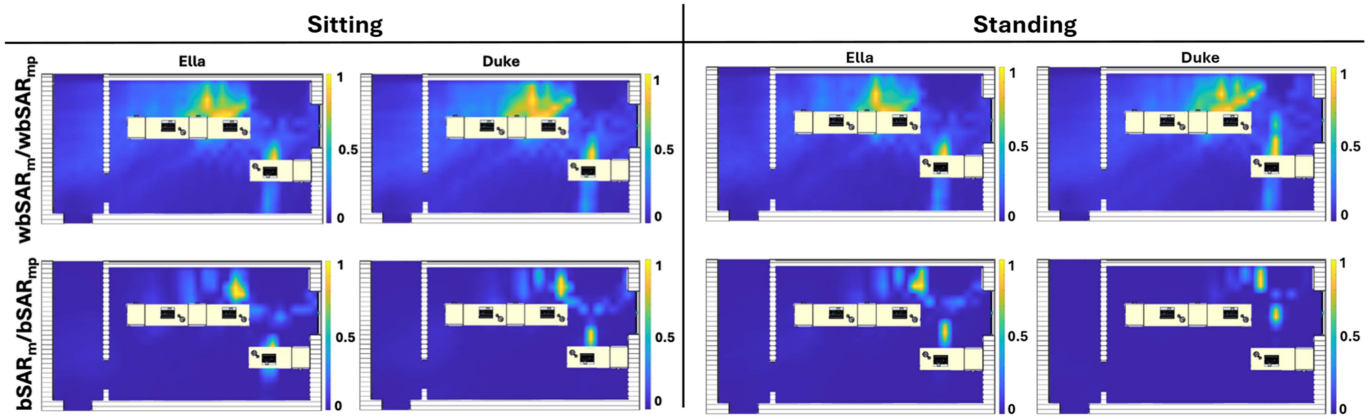
A. Scenár A

TabuľkaDruhýzhromažďuje maximálne hodnoty wbSAR a brainSAR odhadnuté vo všetkých konfiguráciách v*Scenár A*, kde je lúč rekonfigurovateľného inteligentného povrchu (RIS) smerovaný na každý zo stolov v kancelárii, ale nie súčasne. Výsledky sú uvedené pre modely Ella (žena) aj Duke (muž) v sediacej aj stojacej polohe. Porovnanie wbSAR a brainSAR v rámci každej konfigurácie ukazuje, že vo väčšine prípadov sú vrcholy brainSAR vyššie ako vrcholy wbSAR. Tento vzorec platí pre mužské aj ženské modely vo väčšine polôh s niekoľkými výnimkami v sediacej polohe. Okrem toho, porovnaním hodnôt SAR v rôznych konfiguráciách lúča, údaje v tabuľkeDruhý vykazujú konzistentný trend: najvyššie vrcholy sa vyskytujú v konfigurácii RIS s*Nosník 1A*, a to pre sedenie aj státie. Jedinou výnimkou je brainSAR stojacej Elly, kde vrcholy dosahuje pre *Nosník 1A*a*Nosník 2A*sú takmer identické, líšia sa len o približne 0,02 dB. Okrem toho sa vo všetkých konfiguráciách úrovne expozície znižujú so zvyšujúcim sa uhlom elevácie aj azimutu lúča (t. j. od*Nosník 1A*k*Nosník 3A*). To zodpovedá globálnemu poklesu smerovosti RIS s maximálnou odchýlkou 7,1 dB pozorovanou vo wbSAR pre stojacu Ellu.

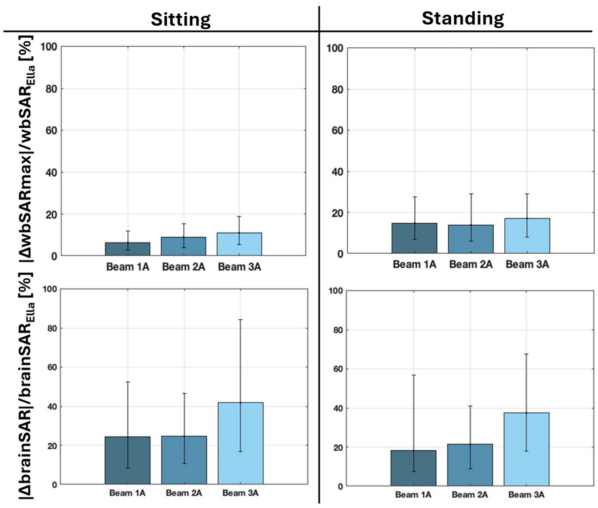
Pri porovnaní dvoch ľudských modelov sú vrcholy získané pre Ellu vo všeobecnosti nižšie ako vrcholy pre Dukea, s výnimkou wbSAR v sediacej polohe. Veľkosť týchto rozdielov závisí od konfigurácie a vo všeobecnosti je väčšia pre brainSAR; konkrétne maximálne rozdiely približne 1,5 dB a 3,7 dB boli pozorované pre sediacu polohu (*Nosník 1A*) a pre stojace (*Nosník 3A)*polohy. Pri porovnaní polôh sa najvýznamnejší rozdiel v brainSAR (5,8 dB) vyskytuje u Duke s*Nosník 2A*Naopak, zmeny wbSAR súvisiace s držaním tela sú podstatne menšie, s maximálnym rozdielom 0,8 dB v Elle s oboma...*Nosník 1A*alebo*Nosník 3A*.

Na preskúmanie priestorového rozloženia wbSAR a brainSAR, obr.2predstavuje 2D mapovanie v sede (ľavý panel) a v stoji (pravý panel), pričom zobrazuje maximálnu hodnotu wbSAR alebo brainSAR (odteraz $wbSAR_{maximum}$a brainSAR $_{maximum}$) získané medzi tromi smermi lúčov *Scenár A*Oba panely ukazujú, že najvyššie expozície sú sústredené pozdĺž smeru lúča, čo je v súlade s účelom inštalácie RIS a jeho schopnosťou tvarovať lúč. Oblasti s najväčšou expozíciou (označené žltou farbou) sa však nezhodujú s oblasťami, na ktoré je lúč smerovaný, čo naznačuje, že nepoužívatelia môžu byť vystavení vyšším úrovniam expozície ako používatelia za stolmi. Porovnanie $wbSAR_{maximum}$ a $brainSAR_{maximum}$mapy (t. j. horná a dolná mapa na obr.2)

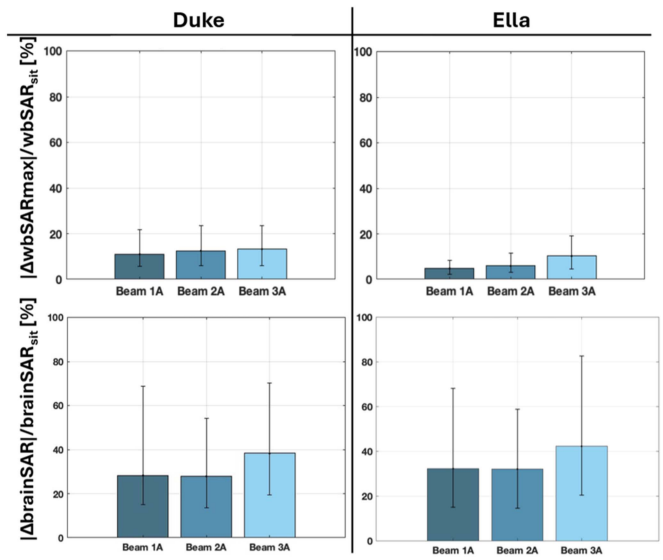
Tento článok bol prijatý na zaradenie do budúceho čísla tohto časopisu. Obsah je konečný v predloženej podobe, s výnimkou stránkovania.



Obr. 2.*2D mapy*:Priestorové rozloženie wbSARmax (horné panely) a brainSARmax (dolné panely) v celku*Scenár A*v sediacej polohe (vľavo) človeka a v stoji (vpravo). V každom priestorovom bode mapy zobrazujú maximálnu hodnotu wbSAR alebo brainSAR spomedzi troch konfigurácií lúča (t. j. lúč 1A, 2A a 3A). Hodnoty sú normalizované na maximálnu hodnotu SAR zistenú vo všetkých troch konfiguráciách lúča. Poznámka: $wbSAR_m=wbSAR_{maximum}$ $wbSAR_{poslanec}=wbSAR_{maxpeak}$ $bSAR_m=brainSAR_{maximum}$ $bSAR_{poslanec}=brainSAR_{maxpeak}$.



Obr. 3. Grafy mediánových hodnôt (stĺpce) a interkvartilových rozsahov (IQR, whiskery) rozdelení rozdielov v dôsledku pohlavia v scenári A. Ľavý panel je venovaný výsledkom modelov sedenia, zatiaľ čo pravý panel zobrazuje výsledky modelov státia. Horné panely zhromažďujú rozdiely z hľadiska wbSAR, zatiaľ čo spodné panely zobrazujú rozdiely z hľadiska brainSAR.



Obr. 4. Grafy mediánových hodnôt (stĺpce) a interkvartilových rozsahov (IQR, (whiskers) rozdelenia rozdielov v dôsledku polohy modelu v scenári A. Ľavý panel je venovaný výsledkom Duke, zatiaľ čo pravý panel zobrazuje výsledky Elly. Horné panely zhromažďujú rozdiely z hľadiska wbSAR, zatiaľ čo spodné panely zhromažďujú rozdiely z hľadiska brainSAR.

odhaľuje odlišné distribučné vzorce. Zatiaľ čo $wbSAR_{maximum}$vykazuje širšie priestorové rozloženie najvyšších hodnôt, $brainSAR_{maximum}$ Údaje sa vyznačujú extrémne lokalizovanými vrcholmi. Tento vzorec pretrváva v sede aj v stoji. Okrem toho vrcholy oboch $wbSAR_{maximum}$a $brainSAR_{maximum}$sú konzistentne lokalizované vo vzdialenostiach kratších ako sú vzdialenosti medzi RIS a cieľovým stolom, pričom táto vzdialenosť je kratšia pre Duke. Tento trend sa vyskytuje preto, lebo mužský model je vyšší ako ženský, a preto zachytáva lúč RIS v bližšej blízkosti, kde je výkon EMF vyšší v dôsledku nižších strát na dráhe. Toto zistenie je obzvlášť zrejmé u stojaceho panela.

Pre komplexné pochopenie toho, ako sú rozdiely v expozícii súvisiace s pohlavím priestorovo rozložené, boli relatívne percentuálne rozdiely vypočítané porovnaním hodnôt wbSAR alebo brainSAR medzi Ellou a Dukeom (obr.3) v každom bode a pre každý smer lúča, pričom sa lúče teraz posudzujú samostatne. Rovnaký prístup kvantifikoval rozdiely v úrovni expozície v dôsledku držania tela subjektu, pričom sa porovnávali výsledky sedenia a státia pre oba subjekty (obr.4Obr.3ukazuje, že najväčšie odchýlky súvisiace s pohlavím sa vyskytujú v údajoch brainSAR (t. j. spodný riadok), pričom dosahujú medián 40 %, zatiaľ čo v údajoch wbSAR zostávajú mediánové rozdiely pod 20 % (t. j. horný riadok). Okrem toho porovnanie medzi konfiguráciami lúčov ukazuje, že najväčšia variabilita sa konzistentne vyskytuje s*Nosník 3A*, pretože zložka bočných lalokov sa stáva významnejšou so zvyšujúcim sa fázovým posunom. Vplyv držania tela na rozdiely súvisiace s anatómiou možno pozorovať aj porovnaním IQR výsledkov wbSAR. IQR pre údaje v stoji sú širšie ako pre údaje v sede, čo naznačuje

This article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. Content is final as presented, with the exception of pagination.

TABLE III
PEAK VALUES [MW/KG] OF WBSAR AND BRAINSAR OBTAINED IN THE TWO POSTURES IN SCENARIO B WITH ALL BEAMS AND TWO HUMAN MODELS

	Sitting Model				Standing Model			
	Ella		Duke		Ella		Duke	
	brainSAR	wbSAR	brainSAR	wbSAR	brainSAR	wbSAR	brainSAR	wbSAR
Beam 1B	2.3	1.6	1.2	1.3	0.6	1.8	0.1	1
Beam 2B	4.7	1.5	5.7	1.3	1.9	1.8	1.1	1
Beam 3B	0.7	0.2	0.5	0.2	1.2	0.2	0.9	0.3

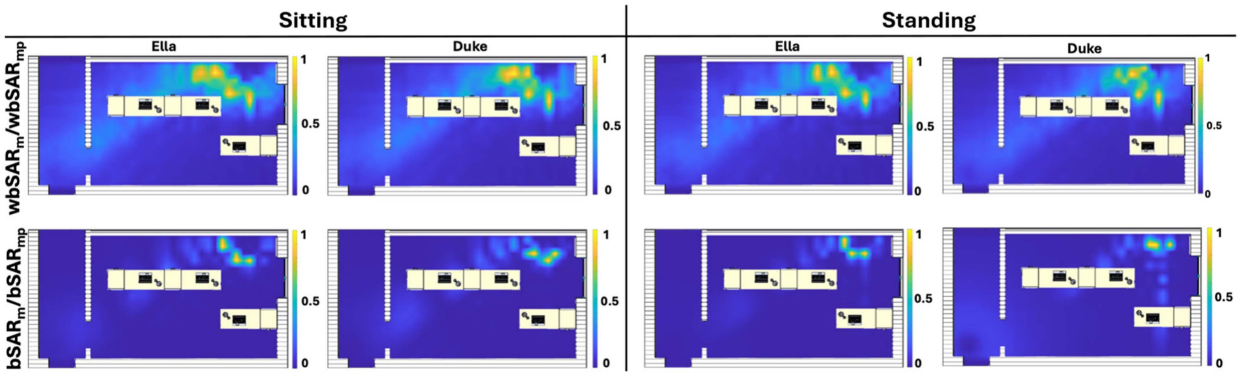


Fig. 5. *2D maps:* Spatial distribution of the wbSARmax (upper panels) and brainSARmax (bottom panels) in the whole *Scenario &Bgr;* in the sitting posture (left) of the human being and in the standing posture (right). At each spatial point, the maps display the maximum wbSAR or brainSAR value among the three beam configurations (i.e., Beam 1&Bgr;, 2&Bgr;, and 3&Bgr;). Values are normalized to the maximum SAR found across all three beam configurations. Note: $wbSAR_m$ = $wbSAR_{max}$; $wbSAR_{mp}$ = $wbSAR_{maxpeak}$; $bSAR_m$ = $brainSAR_{max}$; $bSAR_{mp}$ = $brainSAR_{maxpeak}$.

greater variability in the spatial distribution of gender differences in standing posture. The opposite trend appears in brainSAR results, where spatial distributions of anthropomorphic differences are slightly more localized in standing data. Additionally, the distributions of exposure posture-related differences for both the models (Fig. 4) again reveal that posture differences in brainSAR results exceed those in wbSAR. Moreover, the IQRs in brainSAR data are notably shifted toward values higher than the median, indicating that most of the data within 50% around the median exceeds the median value itself. Once again, median values from *Beam 3A* exceed those of other beams, particularly for brainSAR data. This occurs because increased phase shift impacts RIS directivity, resulting in EMF propagation in unintended directions. These findings are shared by both Ella and Duke. The only evident difference between the two models occurs in the wbSAR postures-differences; for Ella, these differences are consistently below 10%, indicating that the highest exposure areas are more spatially localized than those for Duke.

B. Scenár B

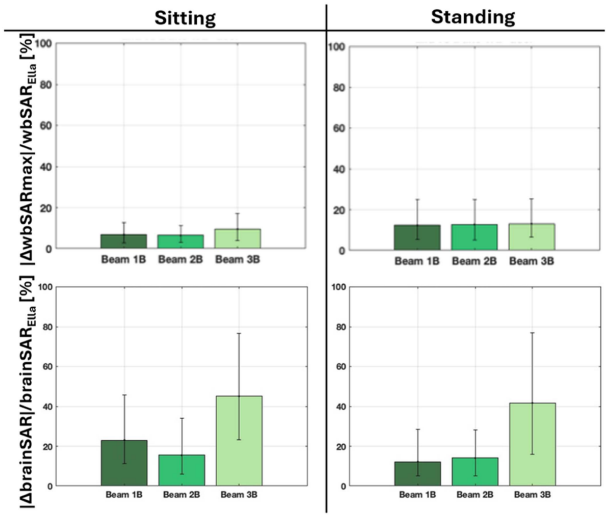
TabuľkaIII.uvádza maximálne hodnoty wbSAR a brainSAR pre Ellu a Dukea v sediacej aj stojacej polohe, keď je lúč vyžarovaný RIS nasmerovaný na hypotetického používateľa v kancelárii. Zaznamenané vrcholy ukazujú, že aj v tomto scenári hodnoty brainSAR prevyšujú hodnoty wbSAR s maximálnym rozdielom 6,3 dB pozorovaným u sediaceho Dukea s RIS v... *Nosník 2B*konfigurácia. Podobný trend sa pozoruje v Elle pri rovnakej konfigurácii s rozdielom 5 dB. Výnimky boli obmedzené na*Nosník 1B*konfigurácia: i. sediaci vojvoda (−0,4 dB), ii. stojaca Ella (−4,8 dB) a stojaci Duke (−9,7 dB).

Furthermore, comparing male and female results shows that the greatest deviation in brainSAR consistently occurs with *Beam 1B*, measuring 2.95 dB in the sitting posture and 7.4 dB in the standing posture. Moreover, *Beam 1B* is also the configuration yielding the highest deviation in brainSAR peak between sitting and standing postures, equal to 10.3 dB, in Duke model.

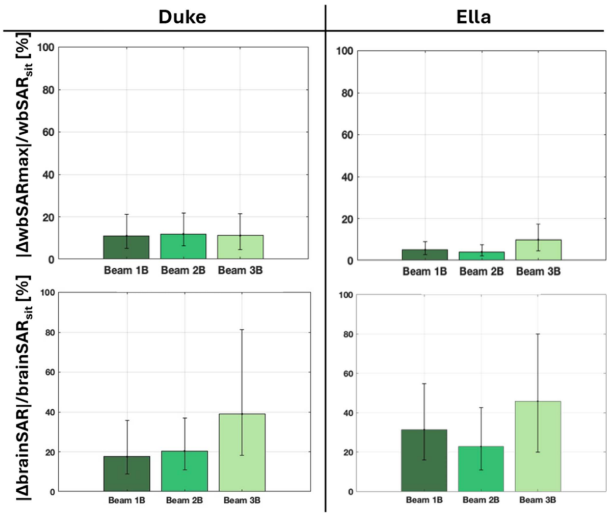
Fig. 5 presents 2D maps of maximum wbSAR or brainSAR values obtained among the three RIS configurations in sitting (left panel) and standing postures (right panel), respectively. Comparing the results of sitting postures reveals that spatial distributions of $brainSAR_{max}$ are more localized around the peaks than $wbSAR_{max}$ data. This trend also applies to maps presenting standing results. Additionally, the $brainSAR_{max}$ Mapy naznačujú, že vrcholy v stojacich modeloch sú bližšie k RIS ako vrcholy v sediacich modeloch. Je to spôsobené menšou vzdialenosťou medzi RIS a modelom pri pretínaní jeho hlavného laloku. Tieto zistenia sú v súlade s porovnaním medzi modelmi Ella a Duke, kde vrcholy sú priestorovo bližšie k RIS u mužského modelu kvôli jeho vyššej výške. Tento trend je najvýraznejší v brainSAR.$_{maximum}$mapy.

Obr.6zobrazuje mediánové hodnoty a IQR rozdielov súvisiacich s anatómiou z hľadiska wbSAR (horné panely) a brainSAR (dolné panely). Najväčšie rozdiely sa konzistentne objavujú v brainSAR, kde mediánová hodnota presahuje 40 % v*Nosník 3B*konfigurácia. Naproti tomu rozdiely wbSAR zostávajú pod 15 % a dosahujú minimum približne 7 % v*Nosník 2B*s modelom sediaceho človeka. Napriek rozdielom vo veľkosti medzi týmito štatistickými indexmi sa objavuje spoločný trend: najvyšší mediánový rozdiel sa konzistentne vyskytuje v*Nosník 3B*konfigurácia. Antropomorfný vplyv na úrovne expozície je teda priestorovo rozptýlenejší, keď anténa vykazuje nižšiu smerovosť.

Tento článok bol prijatý na zaradenie do budúceho čísla tohto časopisu. Obsah je konečný v predloženej podobe, s výnimkou stránkovania.



Obr. 6. Grafy mediánových hodnôt (stĺpce) a interkvartilových rozsahov (IQR, (whiskers) rozdelenia rozdielov v dôsledku pohlavia v scenári B. Ľavý panel je venovaný výsledkom modelov sedenia, zatiaľ čo pravý panel zobrazuje výsledky modelov státia. Horné panely zhromažďujú rozdiely z hľadiska wbSAR, zatiaľ čo spodné panely z hľadiska brainSAR.



Obr. 7. Grafy mediánových hodnôt (stĺpce) a interkvartilových rozsahov (IQR, whiskery) rozdelení rozdielov v dôsledku polohy modelu v scenári B. Ľavý panel je venovaný výsledkom Duke, zatiaľ čo pravý panel zobrazuje výsledky Elly. Horné panely zhromažďujú rozdiely z hľadiska wbSAR, zatiaľ čo spodné panely z hľadiska brainSAR.

Porovnanie wbSAR IQR navyše zdôrazňuje, že tie pre postoj v stoji sú širšie ako tie pre sed v stoji, čo naznačuje väčšiu variabilitu v priestorovom rozložení rozdielov pri státí. Naopak, výsledky brainSAR vykazujú opačný vzorec, pričom anatomické rozdiely sa zdajú byť o niečo viac lokalizované v postoji v stoji.

Nakoniec, obr.7zobrazuje mediánové hodnoty a IQR rozdielov súvisiacich s držaním tela z hľadiska wbSAR (horné panely) a brain-SAR (dolné panely). Údaje wbSAR naznačujú, že mediánové rozdiely zostávajú pod 15 % vo všetkých konfiguráciách RIS pre Duke, zatiaľ čo pre Ellu zostávajú trvalo pod 10 %. Výsledky BrainSAR potvrdili skoršie zistenia týkajúce sa*Nosník 3B*konfigurácia, kde stredná hodnota presahuje 40 %. Naopak, iné konfigurácie RIS vykazujú lokalizovanejšie rozdiely v držaní tela s priemernou strednou hodnotou 30 %. Je pozoruhodné, že rozdiely v wbSAR súvisiace s držaním tela pre model Duke sa medzi lúčmi významne nelíšili. To naznačuje, že držanie tela mužského modelu neinteraguje s azimutálnym uhlom lúča, na rozdiel od ženského modelu, kde je vplyv zmeny lúča zrejmý.

IV. Dvyprávanie

Predkladaná práca sa zaoberá hodnotením expozície ľudí v každodennom prostredí vybavenom špecifickou novou technológiou 6G, RIS, v realistickom vnútornom scenári s prvkami typickej kancelárie. Výsledky tejto štúdie ukazujú, že vrcholy brainSAR sú vo všeobecnosti vyššie ako vrcholy wbSAR. Je to preto, že RIS smeruje svoj lúč do malej, špecifickej oblasti. Keďže mozog zaberá oveľa menší objem ako celé telo, môže byť vystavený rovnomernejšej dávke energie, na rozdiel od celého tela, ktoré nie je rovnomerne vystavené rovnakému výkonu. Tento trend je badateľný aj na mapách maximálneho wbSAR a brainSAR pre oba modely v sediacej aj stojacej polohe. Žlté oblasti (predstavujúce vyššie hodnoty) sú v brainSAR obmedzenejšie.maximum
mapy v porovnaní s wbSARmaximumtie. To ukazuje, že mozogSAR maximumVrchol je vysoko priestorovo lokalizovaný, čo súvisí aj s obmedzeným objemom, ktorý zaberá mozog, a nie celé telo, vzhľadom na smer lúča. Okrem toho, brainSARmaximummapy (pozri spodný riadok obr.2a5) odhalili, že vzdialenosť medzi zdrojom EMF (t. j. RIS) a plochou píku sa znižuje so zvyšujúcou sa výškou subjektu. V simulovanom prostredí je tento trend zrejmý pri porovnaní sediacej aj stojacej polohy, pretože mozog stojaceho používateľa je umiestnený vyššie ako mozog sediaceho. Rovnaký vzorec platí aj pri porovnaní modelov Ella a Duke, pričom Duke je vyšší ako Ella. Základným trendom je, že vyššie subjekty pretínajú hlavný lalok EMF opätovne ožiareného RIS v kratších vzdialenostiach od zdroja. Tento vzorec expozície závislý od výšky podporuje aj štatistická analýza mediánov a grafov IQR. Tieto grafy jasne ukazujú, že výška významne ovplyvňuje odhadované úrovne expozície v danom scenári, pričom odhaľujú rozsah variácií súvisiacich s výškou aj ich priestorové rozloženie v kancelárskom prostredí. Štatistické analýzy naznačujú, že rozdiely v expozícii nie sú v celom danom priestore rovnomerné, ale prejavujú sa s rôznymi intenzitami na rôznych miestach, čo priamo koreluje s polohou subjektu vzhľadom na trajektóriu lúča RIS. V tejto analýze sú vplyvy výšky zachytené prostredníctvom dvoch primárnych premenných: anatomických charakteristík (Duke je vyšší ako Ella) a posturálnych variácií (stojaca verzus sediaca poloha). Mediánové a IQR grafy ukazujú, že tieto rozdiely súvisiace s výškou sa premietajú do priestorovo rozložených, a nie lokalizovaných variácií expozície, pričom mediánové rozdiely dosahujú až 40 % pre brainSAR a až 20 % pre wbSAR. Hodnoty IQR sa často posúvajú smerom k vyšším percentilom, čo naznačuje významný rozptyl údajov a potvrdzuje, že variabilita expozície sa rozširuje v celom prostredí, a nie je obmedzená na konkrétne oblasti. Tieto zistenia spoločne naznačujú, že expozícia

Tento článok bol prijatý na zaradenie do budúceho čísla tohto časopisu. Obsah je konečný v predloženej podobe, s výnimkou stránkovania.

Úrovne sú zásadne závislé od výšky subjektu vo vzťahu k vzdialenosti od RIS a ku konkrétnej polohe, ktorú subjekt zaujíma v kancelárskom priestore.

V súlade s týmito výsledkami, pri porovnaní dvoch analyzovaných scenárov, sú dve najrozdielnejšie konfigurácie z hľadiska uhla elevácie lúča, ktorý ovplyvňuje vzdialenosť, v ktorej lúč zachytáva človeka, *Nosník 1A* a *Nosník 1B*. Ako sa očakávalo, vrchol najbližšie k RIS sa vyskytuje s *Nosník 1B* ktorý má najvyšší elevačný uhol a preto pretína ľudské telo skôr vo vesmíre. Tieto zistenia sa rozšírili aj na $wbSAR_{maximum}$ výsledky, dokonca aj rozdiely na týchto mapách sú menej výrazné.

Vo všeobecnosti všetky mapy (pozri obr. 2 a 5) odhalili, že v *Scenár A* Úrovne expozície sú vždy rozložené hlavne pozdĺž smeru hlavného laloku lúča, ale v niektorých prípadoch ako *Nosník 2A* a *Nosník 3A*, EMF pokrýva oblasť v blízkosti stola 2, aj keď je obsluhovanou pracovnou stanicou stôl 3. Súbežne s tým, v *Scenár B* zóna s vysokou expozíciou je lokalizovanejšia ako v *Scenár A*, ale vrchol sa nenachádza v oblasti, kde by sa mal používateľ nachádzať. Tieto zistenia naznačujú, že úrovne expozície vyvolané u neužívateľa by mohli byť vyššie ako u používateľa. Nedávna štúdia Gallucciho a kol. [15] tiež podporuje toto zistenie, ktoré ukazuje, že za určitých podmienok môžu byť hodnoty wbSAR a brainSAR u nepoužívateľov vyššie ako u používateľov. To priamo súvisí s výškou jednotlivca a jeho vzdialenosťou od RIS.

Celkovo je dôležité poznamenať, že vo všetkých skúmaných scenároch zostala wbSAR indukovaná RIS výrazne pod limitmi odporúčanými v usmerneniach ICNIRP. [26] to je 0,08 W/kg pre danú frekvenciu. Najvyššia hodnota wbSAR získaná v modeli Duke je skutočne o viac ako jeden rád nižšia ako limit stanovený smernicami ICNIRP.

V. Záver

Článok sa zameral na vyhodnotenie expozície ľudí rádiofrekvenčnému žiareniu v budúcom scenári vnútornej kancelárie vybavenej RIS. Novosť článku spočíva v charakterizácii príspevkov RIS k expozícii EMF v rámci už existujúcej vnútornej siete a zároveň v analýze zmien expozície súvisiacich s anatomickými charakteristikami, polohou a konfiguráciou lúča. Expozícia bola analyzovaná z hľadiska wbSAR a brainSAR s použitím dvoch virtuálnych ľudských modelov z ViP: dospelej ženy (Ella) a dospelého muža (Duke). Na základe koncových bodov RIS boli vyhodnotené dva odlišné scenáre: i) RIS so zameraním na zariadenie, konkrétne na notebook na stole, ktorý žiada o službu, a ii) RIS smerujúci lúč na používateľa pohybujúceho sa v kancelárii.

Štúdia zdôraznila, že hodnoty brainSAR sú vo väčšine prípadov vyššie ako wbSAR. Priestorové rozloženie navyše ukázalo, že oblasti s vysokou expozíciou sú bližšie k zdroju poľa (t. j. RIS), čím je človek vyšší, a toto zistenie je v súlade s literatúrou. [15] Tento výsledok však znamená, že existujú určité konfigurácie, v ktorých môže byť expozícia nepoužívateľa vyššia ako expozícia používateľa, a to závisí od polohy človeka a jeho relatívnej výšky vzhľadom na lúč. Nakoniec, analýza priestorového rozloženia Rozdiely v expozícii v dôsledku pohlavia a polohy ľudského modelu ukázali, že sú priestorovo rozšírenejšie, keď je azimutálny uhol lúča najvyšší, pretože to znamená vzostup bočných lalokov s dôsledkom menej smerového žiarenia. Absorbovaná dávka indukovaná RIS však zostáva vo všetkých skúmaných scenároch výrazne pod limitmi smerníc ICNIRP. Budúci vývoj tejto práce rozšíri analýzu na kumulatívnu expozíciu vrátane primárneho zdroja EMF a zahrnie ďalšie javy šírenia, ako je difrakcia a difúzny rozptyl, čím poskytne komplexnejšiu charakterizáciu expozície ľudí vo vnútorných prostrediach 6G.

Napriek tomu, že ide o špecifický scenár, reprezentatívny charakter skúmanej konfigurácie kancelárie umožňuje týmto zisteniam poskytnúť kľúčové bezpečnostné poznatky pre nasadenie systémov 6G s podporou RIS v obývaných vnútorných prostrediach, čo dokazuje, že úrovne expozície zostávajú v rámci stanovených bezpečnostných pokynov napriek zložitému rozloženiu polí. Identifikácia variability expozície v rôznych oblastiach tela a anatomických charakteristikách subjektov je nevyhnutná pre charakterizáciu rozloženia úrovní expozície v týchto prostrediach a pre informovanie budúcnosti. *S vedomím EMF* stratégie návrhu siete.

Referencie

[1] S. Dang, O. Amin, B. Shihada a M.-S. Alouini, „Čo by malo byť 6G?“ *Prírodný elektrón.*, zv. 3, č. 1, s. 20 – 29, január 2020, doi: 10.1038/s41928-019-0355-6.

[2] Y. Pan, C. Pan, S. Jin a J. Wang, „Lokalizácia blízkeho poľa a odhad kanálov pre terahertzový systém s pomocou RIS,“ *IEEE J. Selection Topics Signal Process.*, zv. 17, č. 4, s. 878–892, júl 2023, doi: 10.1109/JSTSP.2023.3285431.

[3] M. Di Renzo a kol., „Inteligentné rádiové prostredia posilnené rekonfigurovateľnými inteligentnými povrchmi: Ako to funguje, stav výskumu a cesta vpred,“ *IEEE J. Selection Areas Commun.*, zv. 38, č. 11, s. 2450 – 2525, nov. 2020, doi:10.1109/JSAC.2020.3007211.

[4] Skupina pre priemyselné špecifikácie ETSI (ISG), „Rekonfigurovateľné inteligentné povrchy (RIS); prípady použitia, scenáre nasadenia a požiadavky“, ETSI GR RIS, 001 V1.1.1, 2023.

[5] W. Tang a kol., „Bezdrôtová komunikácia s rekonfigurovateľným inteligentným povrchom: Modelovanie strát na ceste a experimentálne meranie,“ *IEEE Trans. Bezdrôtová komunikácia.*, zv. 20, č. 1, s. 421 – 439, január 2021, doi: 10.1109/TWC.2020.3024887.

[6] M. Merluzzi a A. Clemente, „Anomálne a zrkadlové odrazy rekonfigurovateľných inteligentných povrchov: Konfiguračné stratégie a výkon systému,“ *IEEE Bezdrôtové komunikačné listy.*, roč. 13, č. 10, s. 2707–2711, október 2024, doi:10.1109/LWC.2024.3441933.

[7] A. Zappone a MD Renzo, „Optimalizácia energetickej účinnosti rekonfigurovateľných inteligentných povrchov s obmedzeniami vystavenia elektromagnetickému poľu“, *IEEE Signal Process. Lett.*, zv. 29, s. 1447 – 1451, 2022, doi: 10.1109/LSP.2022.3181532.

[8] S. Hu, F. Rusek a O. Edfors, „Za hranicami masívneho MIMO: Potenciál určovania polohy s veľkými inteligentnými povrchmi,“ *IEEE Trans. Signal Process.*, zv. 66, č. 7, s. 1761 – 1774, apríl 2018, doi:10.1109/TSP.2018.2795547.

[9] Y. Zheng, S. Bi, YJ Zhang, Z. Quan a H. Wang, „Inteligentný odrazový povrch zlepšil spoluprácu používateľov v bezdrôtových komunikačných sieťach,“ *IEEE Bezdrôtové komunikačné listy.*, zv. 9, č. 6, s. 901 – 905, jún 2020, doi:10.1109/LWC.2020.2974721.

[10] I. Yildirim, A. Uyrus a E. Basar, „Modelovanie a analýza rekonfigurovateľných inteligentných povrchov pre vnútorné a vonkajšie aplikácie v budúcich bezdrôtových sieťach,“ *IEEE Trans. Commun.*, zv. 69, č. 2, s. 1290 – 1301, február 2021, doi:10.1109/TCOMM.2020.3035391.

[11] A. Subhash, A. Kammoun, A. Elzanaty, S. Kalyani, YH Al-Badarneh a M.-S. Alouini, „Optimalizácia maximálneho a minimálneho SINR pre uplinkovú komunikáciu s podporou RIS s Greenovými obmedzeniami,“ *IEEE Bezdrôtové komunikačné listy.*, zv. 12, č. 6, s. 942–946, jún 2023, doi:10.1109/LWC.2023.3244519.

Tento článok bol prijatý na zaradenie do budúceho čísla tohto časopisu. Obsah je konečný v predloženej podobe, s výnimkou stránkovania.

[12] E. Chiaramello, CF Chiasserini, F. Malandrino, A. Nordio, M. Parazzini a A. Valcarce, „Rozhodovanie zamerané na človeka v bezbunkových 6G sieťach“,*Počítačová sieť.*, zv. 270, október 2025, čl. č. 111522, doi: 10.1016/j.comnet.2025.111522.

[13] H. Ibraiwish, A. Elzanaty, YH Al-Badarneh a M.-S. Alouini, „Celulárne siete s podporou EMF v prostrediach s podporou RIS“,*IEEE Commun. Lett.*, zv. 26, č. 1, s. 123 – 127, január 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3120688.

[14] FE Airod, M. Merluzzi, A. Clemente a EC Strinati, „Modrá komunikácia pre edge computing: Príležitosť rekonfigurovateľných inteligentných povrchov“, in*Zborník GLOBECOM IEEE Glob. Commun. Conf.*, 2022, s. 6396–6401, doi:10.1109/GLOBECOM48099.2022.10001599.

[15] S. Gallucci, M. Benini, S. Fiocchi, G. Tognola a M. Parazzini, „6G RIS vo vnútornom prostredí: Posúdenie variability expozície u používateľov a nepoužívateľov“,*IEEE Open J. Šírenie antén.*, zv. 6, č. 2, s. 487 – 496, apríl 2025, doi:10.1109/OJAP.2025.3529980.

[16] D. Plets, W. Joseph, S. Aerts, K. Vanhecke, G. Vermeeren a L. Martens, „Predpoveď a porovnanie lokalizovaných hodnôt SAR elektrického poľa pre downlink a uplink pre realistické plánovanie bezdrôtových sietí v interiéri,“ *Dozimetria radiačnej ochrany*, zv. 162, č. 4, s. 487–498, december 2014, doi: 10.1093/rpd/ncu019.

[17] N. Zentai a kol., „Charakterizácia a hodnotenie komerčného systému WLAN pre štúdie provokácie u ľudí“,*Medzinárodný výskumný ústav BioMed*, zv. 2015, s. 1 – 10, 2015, doi:10.1155/2015/289152.

[18] S. Droulias a A. Alexiou, „Rekonfigurovateľný inteligentný povrch: MIMO alebo vyžarujúca vrstva?“,*IEEE Trans. Bezdrôtová komunikácia.*, zv. 23, č. 4, s. 2726–2739, apríl 2024, doi:10.1109/TWC.2023.3302577.

[19] Štúdio, CST Microwave, „Štúdio CST Microwave“, 2008.

[20] Z. Yun a MF Iskander, „Sledovanie lúčov pre modelovanie šírenia rádiových vĺn: Princípy a aplikácie,“*Prístup k IEEE*, zv. 3, s. 1089–1100, 2015, doi:10.1109/ACCESS.2015.2453991.

[21] M.-C. Gosselin a kol., „Vývoj novej generácie anatomických modelov s vysokým rozlíšením pre hodnotenie zdravotníckych pomôcok: Virtuálna populácia 3.0,“ *Fyzika. Lekárska biológia.*, roč. 59, č. 18, s. 5287–5303, september 2014, doi: 10.1088/0031-9155/59/18/5287.

[22] I. Liorni a kol., „Vyhodnotenie špecifickej miery absorpcie v oblastiach vzdialeného poľa, blízkeho poľa a blízkeho poľa pre integratívne hodnotenie expozície rádiofrekvenčnému žiareniu,“*Dozimetria radiačnej ochrany*, roč. 190, č. 4, s. 459–472, október 2020, doi:10.1093/rpd/ncaa127.

[23] MF Iskander, H. Massoudi, CH Durney a SJ Allen, „Merania absorpcie rádiofrekvenčného výkonu v sféroidných ľudských a zvieracích fantómoch vystavených blízkemu poľu dipólového zdroja,“*IEEE Trans. Biomed. Eng.*, zv. BME-28, č. 3, s. 258–264, mar. 1981, doi: 10.1109/TBME.1981.324698.

[24] CH Durney, H. Massoudi a MF Iskander, „Príručka dozimetrie rádiofrekvenčného žiarenia“, 1986. [Online]. Dostupné:https://www.goaegis.com/RF_Dosimetry_Handbook.pdf

[25] M. Benini, S. Gallucci, S. Fiocchi, M. Parazzini, P. Ravazzani a G. Tognola, „Vystavenie ľudí rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam z aktívnych RIS vo vonkajšom prostredí: Prípadová štúdia komunikácie vo vozidlách,“*IEEE Open J. Šírenie antén.*, zv. 7, č. 1, s. 6 – 17, február 2026, doi: 10.1109/OJAP.2025.3625767.

[26] ICNIRP, „Usmernenia pre obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz)“,*Zdravotná fyzika.*, roč. 118, č. 5, s. 483–524, máj 2020, doi:10.1097/HP.0000000000001210.

Silvia GallucciV roku 2019 získala magisterský titul v odbore biomedicínske inžinierstvo na Univerzite v Pise v Taliansku a doktorát v odbore bioinžinierstvo na Politecnico di Milano v Miláne v Taliansku so zameraním na interakcie medzi elektromagnetickým žiarením a človekom. Od roku 2024 pôsobí ako vedecká pracovníčka v Inštitúte elektroniky, počítačového a telekomunikačného inžinierstva, Consiglio Nazionale delle Ricerche. Jej súčasný výskum sa zameriava na hodnotenie expozície elektromagnetickým poliam pomocou numerickej dozimetrie, najmä z vysokofrekvenčnej mobilnej komunikácie.

Martina BeniniZískala titul MS v biomedicínskom inžinierstve a titul PhD. v bioinžinierstve na Politecnico di Milano v Miláne v Taliansku v rokoch 2020 a 2024. V súčasnosti pôsobí ako vedecká pracovníčka v Inštitúte elektroniky, informačného inžinierstva a telekomunikácií, Consiglio Nazionale delle Ricerche. Jej súčasné výskumné záujmy zahŕňajú štúdium interakcie medzi elektromagnetickými poľami a ľudským telom pomocou deterministickej aj stochastickej dozimetrie so zameraním na antény používané v automobilovom priemysle na prepojenie vozidiel.

Serena Fiocchizískala v rokoch 2009 a 2013 magisterský titul v odbore biomedicínske inžinierstvo a doktorát v odbore bioinžinierstvo na Polytechnickej univerzite v Miláne v Taliansku. V súčasnosti pôsobí ako vedúca výskumníčka v Inštitúte elektroniky, počítačového a telekomunikačného inžinierstva Národnej výskumnej rady Talianska v Ríme. Jej výskumné záujmy zahŕňajú štúdium interakcie medzi elektromagnetickými poľami (EMP) a biologickými systémami so zameraním na hodnotenie expozície ľudí EMP, výpočtovú techniku.
cionálne modelovanie neinvazívnych techník stimulácie mozgu a miechy a na návrh a optimalizáciu biomedicínskych technológií využívajúcich elektromagnetické polia na diagnostické a terapeutické účely.

Emma Chiaramello(Členka IEEE) získala v rokoch 2009 a 2013 magisterský a doktorský titul v biomedicínskom inžinierstve na Politecnico di Torino v Turíne v Taliansku. V súčasnosti pôsobí ako vedúca výskumníčka v Inštitúte elektroniky, počítačového a telekomunikačného inžinierstva Národnej výskumnej rady Talianska v Ríme v Taliansku. Jej výskumné záujmy zahŕňajú štúdium interakcií medzi elektromagnetickým žiarením a biologickými systémami, a to ako s deterministickou dozimetriou založenou na výpočtových elektromagnetických metódach, tak so stochastickou dozimetriou založenou na náhradnom modelovaní.

Gabriella TognolaZískala magisterský titul v odbore elektronické inžinierstvo a doktorát v odbore bioinžinierstvo na Politecnico di Milano v Miláne v Taliansku. V súčasnosti je riaditeľkou výskumu v Consiglio Nazionale delle Ricerche, Inštitúte elektroniky, počítačového a telekomunikačného inžinierstva. Jej výskumné záujmy zahŕňajú hodnotenie expozície elektromagnetickým poliam pomocou numerickej dozimetrie a metód strojového učenia a modelovanie elektromagnetických polí pre biomedicínske aplikácie a inovatívne aplikácie EMF v prepojených vozidlách.

Marta Parazzini(Členka IEEE) je v súčasnosti riaditeľkou výskumu v Inštitúte elektroniky, počítačového a telekomunikačného inžinierstva Talianskej národnej výskumnej rady v Ríme v Taliansku. Medzi jej súčasné výskumné záujmy patrí štúdium interakcií elektromagnetických polí s biologickými systémami, deterministická a stochastická výpočtová dozimetria a medicínske aplikácie elektromagnetických polí, najmä techniky neinvazívnej stimulácie mozgu.

Financovanie otvoreného prístupu poskytnuté „Consiglio Nazionale delle Ricerche“ v rámci dohody CRUI CARE