Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com

Fyzika v medicíne a biológii

PRIJATÝ RUKOPIS •OTVORENÝ PRÍSTUP

Simulácie vystavenia dospelých a detí vzdialenému poľu environmentálnym a automaticky indukovaným RF-EMF medzi 450 MHz a 26 GHz

Citácia tohto článku pred publikovaním: Robin Wydaeghe*a kol.*2026*Fyzika. Lekárska biológia.*v tlačihttps://doi.org/10.1088/1361-6560/ae97ac

Verzia rukopisu: Prijatý rukopis

Prijatý rukopis je „verzia článku prijatá na publikovanie vrátane všetkých zmien vykonaných v dôsledku procesu partnerského hodnotenia, ktorá môže zahŕňať aj pridanie hlavičky článku, ID článku, titulnej strany a/alebo vodoznaku „Prijatý rukopis“ vydavateľstvom IOP Publishing, ale s výnimkou akýchkoľvek iných úprav, sadzby alebo iných zmien vykonaných vydavateľstvom IOP Publishing a/alebo jeho poskytovateľmi licencií“.

Tento prijatý rukopis je**© 2026 Autor(i). Vydané v mene Ústavu fyziky a inžinierstva v medicíne vydavateľstvom IOP Publishing Ltd.**.

Kedže verzia záznamu tohto článku bude/bola publikovaná na základe zlatého otvoreného prístupu pod licenciou CC BY 4.0, tento prijatý rukopis je okamžite k dispozícii na opätovné použitie pod licenciou CC BY 4.0.

Každý má povolené použiť celý alebo časť pôvodného obsahu v tomto článku za predpokladu, že bude dodržiavať všetky podmienky licencie. https://creativecommons.org/licences/by/4.0

Hoci bolo vynaložené primerané úsilie na získanie všetkých potrebných povolení od tretích strán na zahrnutie ich obsahu chráneného autorskými právami do tohto článku, ich úplná citácia a riadok s autorskými právami nemusia byť uvedené v tejto prijatej verzii rukopisu. Pred použitím akéhokoľvek obsahu z tohto článku si, prosím, prečítajte verziu záznamu na IOPscience po jej publikovaní, kde nájdete úplné informácie o citáciách a autorských právach, pretože môžu byť potrebné povolenia. Všetok obsah tretích strán je plne chránený autorskými právami a nie je publikovaný na základe zlatej otvorenej licencie CC BY, pokiaľ to nie je výslovne uvedené v popise obrázka vo verzii záznamu.

Zobraziťčlánok online pre aktualizácie a vylepšenia.

Tento obsah bol stiahnutý z IP adresy 188.167.251.119 dňa 01.09.2026 o 20:02

Krížová značka

PRIJATÉ
dd Mesiac 2026

REVIDOVANÉ
dd Mesiac 2026

Fyzika v medicíne a biológii PAPIER

Simulácie vystavenia dospelých a detí vzdialenému poľu environmentálneho a autoindukovaného RF-EMF medzi 450 MHz a 26 GHz

Robin Wydaeghe[1,*] Bram Stroobandt[1] Silvia Gallucci[2], Marta Parazzini[2] Gabriella Tognola[2] Joe Wiart[3] Günter Vermeeren[1], Mònica Guxens[4,5,6,7,8] Emmeric Tanghe[1] a Wout Joseph[1]

[1]Katedra informačných technológií, Gentská univerzita - imec, WAVES Research Group, Technologiepark-Zwijnaarde 126, 9052 Gent, Belgicko

[2]Inštitút elektroniky, počítačového a telekomunikačného inžinierstva, Národná výskumná rada Talianska (CNR-IEIIT), Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Miláno, Taliansko

[3]Katedra komunikácie a elektroniky (COMELEC), Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris, 19 Place Marguerite Perey, 91120 Palaiseau, Francúzsko

[4]ISGlobal, Barcelona Institute for Global Health, C/ Doctor Aiguader 88, 08003 Barcelona, Spain

[5]ICREA, str. Llu's Companys 23, 08010 Barcelona, Španielsko

[6]Universitat Pompeu Fabra, C/ Doctor Aiguader 88, 08003 Barcelona, Španielsko

[7]Španielske konzorcium pre výskum epidemiológie a verejného zdravia (CIBERESP), Instituto de Salud Carlos III, Av. de Monforte de Lemos 3-5, 28029 Madrid, Španielsko

[8]Oddelenie detskej a adolescentnej psychiatrie/psychológie, Erasmus MC, Univerzitné lekárske centrum, Dr. Molewaterplein 40, 3015 GD Rotterdam, Holandsko

*Autor, ktorému má byť adresovaná akákoľvek korešpondencia.

E-mail:robin.wydaeghe@ugent.be

Kľúčové slová:Expozícia RF-EMF, špecifická miera absorpcie (SAR), hustota absorbovaného výkonu (APD), FDTD, 6G, detská dozimetria, tvarovanie lúča

Abstrakt

*Cieľ.*Vystavenie detí rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam (RF-EMF) nad 6 GHz nie je úplne charakterizované. Žiadna štúdia nezahŕňa subGHz bunkové pásma až po milimetrové vlny a nezahŕňa ani detské fantómy. Táto štúdia kvantifikuje špecifickú mieru absorpcie (SAR) a hustotu absorbovaného výkonu (APD) u dvoch dospelých a dvoch detských anatomických fantómov v 15 frekvenciách od 450 MHz do 26 GHz.

*Prístup.*Vykonali sme 550 simulácií v časovej doméne s konečnými rozdielmi (FDTD), ktoré pokrývali environmentálnu (rovinnú vlnu) a autoindukovanú (formovanie lúča) expozíciu. SAR a APD boli vypočítané podľa noriem IEC/IEEE 62704-1 a IEC/IEEE 63195-4. Simulácie po prvýkrát zahŕňali celotelovú dozimetriu pri 26 GHz u fantómových modelov detí a dospelých a APD detí v pásme 15 GHz. Výsledky boli normalizované na referenčné úrovne ICNIRP 2020 pre expozíciu širokej verejnosti.

*Hlavné výsledky.*Deti vykazujú 1,5 – 1,9-krát vyššiu hodnotu SAR pre celé telo ako dospelí pri všetkých frekvenciách pod 6 GHz. 6-ročné dieťa dosiahne pri frekvencii 2 140 MHz 93 % limitu SAR pre celé telo 8 W/kg, spriemerovaného pre 12 konfigurácií rovinných vĺn, a 145 % v najhoršej konfigurácii. Hranice zhody pod 6 GHz určuje SAR pre celé telo, nie lokálny SAR. SAR mozgu sa znižuje o 96 % z 450 MHz na 5,8 GHz, keď sa absorpcia posúva na pokožku. SAR oka klesá 77-násobne zo 7 na 26 GHz, keď hĺbka prieniku klesá pod hrúbku očného viečka. Pri zjednodušenom tvarovaní lúča MRT, psSAR$_{10\,g}$ pri 3500 MHz prekračuje limit 2 W/kg hlavy/trup pre všetky štyri fantómy (131 – 158 %). APD pri 7 GHz presahuje 20 W/m^2 pre 6-ročné dieťa o 2,5 %. Najhorší prípad SAR pre celé telo sa zhoduje s údajmi v literatúre s toleranciou 2 %.

*Význam.*Výsledky identifikujú kombinácie frekvencií a fantómov, kde sa zužujú hranice zhody: 3500 MHz a 7 GHz pri tvarovaní lúča a deti blízko 2 GHz pri vystavení environmentálnemu žiareniu. Údaje o SAR špecifické pre orgány, mozog, oči, pokožku a genitálie podporujú epidemiologické hodnotenie expozície a modelovanie dávok v súčasných a perspektívnych bezdrôtových pásmach.

Účet časť Manuscript

1 Úvod

S nasadením bezdrôtovej technológie 5G sa počet základňových staníc a antén na základňovú stanicu výrazne zvýšil v porovnaní so 4G (GSMA 2024). Siete 5G v súčasnosti obsluhujú 2 miliardy predplatiteľov vo viac ako 100 krajinách. Cieľom komerčného nasadenia 6G je do roku 2030 (GSMA 2024). Tieto siete pokrývajú tri frekvenčné rozsahy: FR1 (450 MHz – 6 GHz), FR2 (24 – 52,6 GHz pre 5G mmWave) a perspektívny FR3 (7 – 15 GHz pre 6G) (Katwe*a kol.*2024,Ďalšia G Aliancia 2023). Keď základňová stanica s masívnym MIMO (MaMIMO) smeruje k aktívnemu používateľovi pomocou lúča, výsledná expozícia je*samoindukovaný*(Velghe*a kol.*2021), poloha používateľa vyvoláva expozíciu. Pre používateľov, ktorí nepoužívajú technológiu Beamforming, je expozícia*environmentálny*Toto rozlíšenie je dôležité, pretože autoindukovaná expozícia sústreďuje energiu smerom k používateľovi, zatiaľ čo expozícia z prostredia prichádza zo všetkých smerov. Vyvíjajúce sa tkanivá detí môžu reagovať na rádiofrekvenčné (RF) – elektromagnetické pole (EMF) inak ako u dospelých (Peyman*a kol.*2009), motivujúce k posudzovaniu expozície špecifickej pre daný vek.

Výpočtová dozimetria kvantifikuje špecifickú mieru absorpcie (SAR) a hustotu absorbovaného výkonu (APD) indukované v ľudských tkanivách vonkajšími elektromagnetickými poľami (Ruka 2008,Hirata*a kol.* 2021a). Predchádzajúce štúdie vzdialeného poľa charakterizovali celotelový a lokalizovaný SAR z expozície rovinným vlnám pomocou anatomicky realistických fantómov.Dimbylow (2002) stanovili základné hodnoty SAR pre model pre dospelých (NORMAN) od 10 MHz do 3 GHz vrátane škálovaných detských verzií.Uusitupa *a kol.*(2010) rozšíril toto na 15 voxelových modelov (18 – 105 kg) od 300 MHz do 5 GHz. Celotelový SAR na referenčnej úrovni Medzinárodnej komisie pre ochranu pred neionizujúcim žiarením (ICNIRP) sa priblížil k základným obmedzeniam pre malé deti. Poloha, polarizácia a smer dopadu významne ovplyvnili výsledky. Bakker*a kol.*(2010) porovnávali indukovaný SAR u detských a dospelých modelov od 10 MHz do 5,6 GHz a zistili, že SAR celého tela prekročil u malých detí základné obmedzenie až o 45 % na referenčnej úrovni.Kühn*a kol.*(2009) aVermeeren*a kol.*(2008a) ukázali, že referenčné úrovne odvodené zo zjednodušených modelov nie sú vždy konzistentné so základnými obmedzeniami pri hodnotení na detailných anatomických fantómoch alebo realistických viaccestných prostrediach.Vermeeren*a kol.*(2008b) aplikoval stochastickú metódu na hodnotenie SAR celého tela v realistických viaccestných prostrediach kombináciou simulácií metódou konečných diferencií v časovej doméne (FDTD) s jednou rovinnou vlnou.

Tieto štúdie sa zamerali na frekvencie pod 6 GHz a izotropné (environmentálne) vystavenie rovnomerne rozloženým rovinným vlnám. Smernice ICNIRP z roku 2020 (ICNIRP 2020) zaviedol APD ako základné obmedzenie nad 6 GHz, čím nahradil volumetrický SAR s povrchovou metrikou spriemerovanou na 4 cm^2. Hirata*a kol.*(2021b) preskúmali štúdie výpočtovej dozimetrie podporujúce tento prechod a potvrdili, že APD koreluje so zvýšením teploty tkaniva pri milimetrových vlnových frekvenciách. Nedávne štúdie APD nad 6 GHz používali zjednodušené modely: plochá doska (Nakae*a kol.*2020), guľové hlavy (Lojić Kapetanović a Poljak 2022), izolované štruktúry ucha (Lojić Kapetanović*a kol.* 2023), zvyčajne na jednotlivých frekvenciách bez porovnania s rôznymi fantómami. Priemerná hodnota SAR pre celé telo bola vypočítaná až do 100 GHz u modelov pre dospelých (Kuhara*a kol.*2021), ale detské fantómy neboli zahrnuté. Žiadna štúdia nehodnotila APD v realistických celotelových fantómoch v hornom strednom pásme 6G (7 – 15 GHz) a žiadna necharakterizovala „automaticky indukovanú“ expozíciu, ktorá vzniká, keď základňová stanica MaMIMO smeruje lúč smerom k zariadeniu používateľa. Predchádzajúca práca MaMIMO spojila sledovanie lúčov s FDTD pre špecifické scenáre (Šichantsov*a kol.*2020,Wydaeghe*a kol.*2022) a vonkajšie (Wydaeghe*a kol.*2026) prostredia, ale tieto štúdie špecifické pre daný scenár neposkytujú odhady expozície priamo porovnateľné medzi fantómovými modelmi, frekvenciami a technológiami.

Tri medzery obmedzujú súčasné chápanie expozície RF-EMF v vzdialenom poli v ére 5G/6G: (1) Žiadna samostatná štúdia nepokrýva celý spektrálny rozsah od subGHz bunkových pásiem cez horné stredné pásmo 6G až po milimetrové vlny (26 GHz) a zároveň nezahŕňa detské fantómy, ktoré by zachytili, ako sa dozimetrické metriky vyvíjajú s klesajúcou hĺbkou prieniku z desiatok milimetrov na jeden milimeter. (2) Expozícia detí zostáva pri vyšších frekvenciách nedostatočne charakterizovaná. Existujúce štúdie zvyčajne zahŕňajú jeden alebo dva detské modely, čo sťažuje prísnejšie interindividuálnej variability. (3) Automaticky indukovaná expozícia, pri ktorej tvarovanie lúča môže lokalizované horúce miesta v blízkosti tela, nebola systematicky hodnotená podľa základných obmedzení ICNIRP 2020 pre fantómy a frekvencie.

Táto štúdia rieši tieto medzery pomocou FDTD simulácií pokrývajúcich 15 frekvencií (450 MHz – 26 GHz) v štyri fantomy virtuálnej populácie (ViP) (Gosselin*a kol.*2014) (dvaja dospelí, dve deti) a dva expozičné scenáre: environmentálny (izotropné osvetlenie rovinnou vlnou z 12 smerov s dvoma polarizáciami v každom smere, ako vBakker*a kol.*(2010),Uusitupa*a kol.*(2010)) a autoindukované štvorsmerné tvarovanie lúča s maximálnym pomerom prenosu (MRT) smerom k hypotetickému umiestneniu používateľského zariadenia (UE)). Vypočítame $psSAR_{10\,g}$, celotelový SAR a orgánovo-špecifický SAR podľa normy IEC/IEEE 62704-1 (IEC/IEEE 2017) pod 6 GHz a APD podľa normy IEC/IEEE 63195-4 (IEC/IEEE 2022) pri frekvencii 6 GHz alebo vyššej. Podľa vedomostí autorov ide o prvú štúdiu, ktorá vykonala celotelovú dozimetriu pri frekvencii 26 GHz na detských fantómoch

Accepted Manuscript

Tabuľka 1: Komplexné parametre simulácie FDTD a výpočtové požiadavky.

Parameter a jednotka	Popis	5G FR1 / sub-6 GHz									6G FR3					FR2
Frekvencie a scenáre																
Frekvencia [MHz]	Sínusoidný	450	700	835	1450	2140	2450	3500	5200	5800	7000	9000	11000	13000	15000	26000
Technológia	Bezdrôtový štandard	LTE 5G NR	GSM-850	LTE	LTE	Wi-Fi	5G NR Wi-Fi	Wi-Fi 6G				6G	6G	6G	6G	5G NR
Environmentálne	Rovinná vlna, izotropná	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Automaticky indukované	UE lúčové tvarovanie, MRT		✓					✓			✓	✓	✓	✓	✓	
Základné množstvá																
SAR [W/kg]	Normálne do 1 W/m2	psSAR10g, SARwb, SARosa, skupina SAR (mozog, koža, oči, genitálie), podľa normy IEC/IEEE 62704-1									Thelonious z jedného smeru					
APD [W/m2]	Normálne do 1 W/m2	✗									4 cm2 priemerná APD, normy IEC/IEEE 63195-4					
Priestorové a časové rozlíšenie																
Veľkosť bunky Δx[mm] Časový krok Δt[ps] Perforácia [%]	Courantova limita	2,5 2,5 4,81 4,81		2,5 4,81	2,5 4,81	1,694 3,26	1,482 2,85	1,0	1,0	1,0	0,6	0,5	0,5	0,45	0,4	0,3 0,58
	Otvory zo sieťoviny na koži	13,1 13,1		13.1	13,1	1,0	0		0		0		0	0	0	0
Bunky na δ90 [ ]	Koža, δ90/bunka	24	21	19	15	17	18 rokov	19	11	10	13		8	7	6	4
Bunky na stranu kocky s hmotnosťou 10 g [ ]	21,5 mm / bunka	9	9	9	9	13	15	22	22	22	36	43	48	54		72
Hĺbka absorpcie výkonu 90 % δ90																
Oko (Sklovec) [mm]	Úzke miesto	36	33	32	28	23	21	15	8,8	7,5				2.1	1,7	0,8
Koža [mm]	Povrch (0,5–4 mm)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,8	2,9	2,4		1.1
Sval [mm]	Hromadné	59	53	50	39	29	26	17	10	8,7	6,6	4,5		2.6	2.1	1.1
Bunky na vlnovú dĺžku (CPW)																
Oko (Sklovec) [ ] Sval [ ]	*εr*: 69→31	32	21	17	10	10	10	10	7	6	9	9	7	7	7	7
	εr: 57→26	35	23	19	11	11	11		8	7	10	10	9	8	8	8
Koža [ ]	*εr*: 46→18 rokov	39	26	22	13	13	13	14	10	9	12	12	10	10	10	9
Veľkosť výpočtovej domény v miliónoch buniek (MCells)																
Výškový faktor *hod.*[ ] Duke (M, 34r.) [MCells]	(Δx/Δx7 GHz)3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,00	0,58	0,58	0,42	0,30	1
	Celý: 54×28×181 cm Znížená: *x*/2×*y*×*z*·*hod.* Plný: 50×28×163 cm	28	28	28	28	83	12	376	376	376	750	744	744	742	740	✗
Ella (Ž, 26r.) [MCells]	Znížená: *x*/2×*y*×*z*·*hod.* Plný: 45×23×139 cm Znížená: *x*/2×*y*×*z*·*hod.*	23	23	23	23	70	103	318	318	318	630	625	625	623	622	✗
Eartha (Ž, 8r.) [MCells]		16	16	16	16	4	69	2	210	210	408	404	404	403	401	✗
Thelonious (M, 6r.) [MCells] Úplný: 37×21×118 cm	Znížené: *x*/2×*y*×*z*·*hod.* Polovica (pre SAR): *x*/2×*y*×*z*	11	11	11	11	2	4	142	142	142	268 241	266 411	266 411	265 559	264 788	1844

Poznámka: ✗ označuje simulácie, ktoré sa pre danú kombináciu fantómovej frekvencie nevykonali.

Tabuľka 2: Základné obmedzenia ICNIRP 2020 pre vystavenie širokej verejnosti (ICNIRP 2020).

Množstvo	Frekvenčný rozsah	Limit	Priemerný čas
$psSAR_{10\,g}$	<6 GHz (hlava/trup)	2 W/kg	6 minút
$psSAR_{10\,g}$	<6 GHz (končatiny)	4 W/kg	6 minút
$SAR_{svetový\ bank}$	Všetky frekvencie	0,08 W/kg	30 minút
APD	> 6 GHz	20 W/m^{2}2	6 minút

a charakterizovať detské APD v pásme 7 – 15 GHz. 550 simulácií umožňuje porovnanie medzi fantómovými modelmi a frekvenčným pásmom, ktoré odhaľuje, ako sa hranice zhody so základnými obmedzeniami ICNIRP 2020 menia v závislosti od veľkosti tela, frekvencie a scenára expozície. Porovnanie odhaľuje výsledok, ktorý referenčné úrovne nezohľadňujú. Pri frekvenciách 3500 MHz a 7 GHz automaticky indukované tvarovanie lúča prekračuje referenčnú úroveň ICNIRP, ale prekračuje základné obmedzenie. Pod 6 GHz je metrikou zhody SAR celého tela. Nad ňou je metrikou APD.

Výsledky informujú regulačné orgány identifikáciou kombinácií frekvencie a fantómu, kde sa zužujú hranice zhody (napr. autom. indukovaná expozícia 7 GHz u detských fantómov). Smernice ICNIRP nestanovujú žiadne základné obmedzenie špecifické pre jednotlivé orgány. Epidemiologické štúdie používajú dávku na úrovni orgánov na prepojenie expozície s dlhodobými biologickými výsledkami zo skúmaných vzorcov používania (van Wel *a kol.*2021, Liorni *et al.* 2020, Birks *a kol.*2021). Takéto modelovanie dávok vyžaduje orgánovo špecifickú SAR naprieč mnohými frekvenciami, fantómovými modelmi a expozičnými scenármi. Uvádzame otvorený súbor údajov o metrikách zhody a orgánovo špecifickej SAR pre dospelých a deti od 450 MHz do 26 GHz (Konzorcium GOLIAT 2022).

2 Metódy

Tabuľka 1 uvádza kompletnú konfiguráciu simulácie použitú v tejto časti.

2.1 Výber frekvencie a mapovanie technológií

15 frekvencií v tabuľke 1 sa pohybuje od 450 MHz do 26 GHz, čo pokrýva tri spektrálne oblasti používané súčasnými a budúcimi bezdrôtovými komunikačnými systémami.

Pásmo pod 6 GHz (FR1) zahŕňa deväť frekvencií predstavujúcich nasadené mobilné a Wi-Fi technológie: 450 MHz (pásmo LTE 31, verejná bezpečnosť), 700 MHz (5G NR n28, spektrum digitálnej dividendy), 835 MHz (GSM-850), 1450 MHz (pásmo LTE 32, doplnkový downlink), 2140 MHz (downlink LTE pásma 1), 2450 MHz (pásmo Wi-Fi 2,4 GHz ISM), 3500 MHz (5G NR n78, pásmo C),

Prijatý rukopis

a 5200/5800 MHz (pásma Wi-Fi 5 GHz UNII). Tieto frekvencie boli vybrané tak, aby vzorkovali najbežnejšie bezdrôtové pásma a zároveň zabezpečili rovnomerné pokrytie RF spektra až do 6 GHz.

Pásmo FR2 je reprezentované frekvenciou 26 GHz (5G NR n258). Milimetrové vlnové pásma ponúkajú široké súvislé šírky pásma (až 400 MHz na kanál) a podporujú prenosové rýchlosti viacerých gigabitov. Vysoká strata signálu obmedzuje praktické nasadenie na scenáre s krátkym dosahom a priamou viditeľnosťou.Rappaport*a kol.* 2019). V simuláciách FDTD sa výpočtové náklady škálujú so štvrtou mocninou frekvencie (f^4): zdvojnásobenie frekvencie znižuje veľkosť bunky na polovicu vo všetkých troch rozmeroch a časový krok, čím sa pracovné zaťaženie zvyšuje 16-násobne. Jedna simulácia celého tela pri 26 GHz s rozlíšením 0,3 mm vyžaduje niekoľko miliárd mriežkových buniek. Preto bola analýza pri tejto frekvencii obmedzená na jeden fantóm (Thelonious) z jedného smeru dopadu.

Horné stredné pásmo (7–15 GHz), označované aj ako centimetrová vlna (cmWave) alebo časť perspektívneho frekvenčného rozsahu FR3 (Ďalšia G Aliancia 2023), je vzorkované pri piatich frekvenciách: 7, 9, 11, 13 a 15 GHz. Toto spektrum je aktívne skúmané pre systémy 6G (Katwe*a kol.*2024), pretože vyvažuje obmedzenia šírky pásma pod 6 GHz s problémami šírenia milimetrových vlnových frekvencií. Medzinárodné regulačné procesy skúmajú spektrum v tomto rozsahu, pričom pásmo 7,125 – 8,4 GHz je na programe WRC-27 pre potenciálnu identifikáciu IMT (GSMA 2024Frekvencie FR3 sa stanú dôležitejšími pre súlad s APD, keďže toto pásmo sa bude rozširovať.

2.2 Metriky expozície a normalizácia

Smernice ICNIRP z roku 2020 (ICNIRP 2020) definujú základné obmedzenia, ktorými sú limity pre veličiny indukované v tele (SAR, APD), a referenčné úrovne, ktoré sú odvodené pre veličiny vonkajšieho poľa, ktoré zabezpečujú súlad so základnými obmedzeniami za typických podmienok. Táto štúdia sa zameriava na prvé, pričom druhé slúži ako vstupná hustota výkonu na určenie súladu.

Pre frekvencie pod 6 GHz je príslušným základným obmedzením maximálna priestorová hodnota SAR na akejkoľvek 10 g kubickej hmotnosti tkaniva ($psSAR_{10\,g}$), vypočítané podľa normy IEC/IEEE 62704-1 (IEC/IEEE 2017). Pre frekvencie 6 GHz alebo vyššie je základným obmedzením priemerná hodnota APD na ľubovoľných 4 cm^2 štvorcová plocha, extrahovaná z povrchu kože v súlade s normou IEC/IEEE 63195-4 (IEC/IEEE 2022).

Všetky simulácie boli vykonané s amplitúdou dopadajúceho poľa 1 V/m. Výsledky boli následne normalizované na hustotu dopadajúceho výkonu 1 W/m^2, zodpovedajúcej amplitúde elektrického poľa $V_0 \approx 27.5$ V/m vo voľnom priestore. Keďže SAR sa škáluje ako V^2, normalizačný faktor je $(27.5)^2 \approx 754$. Táto normalizačná konvencia sa líši od dozimetrie blízkeho poľa, kde sú výsledky typicky normalizované na vstupný výkon 1 W na napájacom zdroji antény. Pre osvetlenie vzdialeného poľa rovinnou vlnou je hustota výkonu prirodzenou normalizačnou veličinou, pretože je merateľná a nezávislá od zdroja.

2.3 Scenár expozície životného prostredia

Obrázok 1a znázorňuje nastavenie scenára expozície voči environmentálnym vplyvom. K expozícii voči environmentálnym vplyvom dochádza, keď okolité elektromagnetické polia osvetľujú objekt zo všetkých smerov. Tento scenár sa vzťahuje na nepoužívateľov, ktorí sú vystavení základňovým staniciam, a na technológie ako 4G LTE, ktoré využívajú všesmerový prenos namiesto tvarovania lúča špecifického pre používateľa. V mestskom prostredí s viacerými základňovými stanicami a odrazmi dopadajúce polia prichádzajú z mnohých smerov súčasne.

Na charakterizáciu tohto scenára expozície voči prostrediu boli vypustené rovinné vlny zo šiestich ortogonálnych smerov zarovnaných s anatomickými osami fantómu: $\pm x$ (vľavo/vpravo), $\pm y$ (predná/zadná časť) a $\pm z$ (hore/dole). Pre každý smer, oba θ a ϕ Simulované boli polarizácie, čo viedlo k 12 nezávislým FDTD simuláciám na kombináciu fantómovej frekvencie.

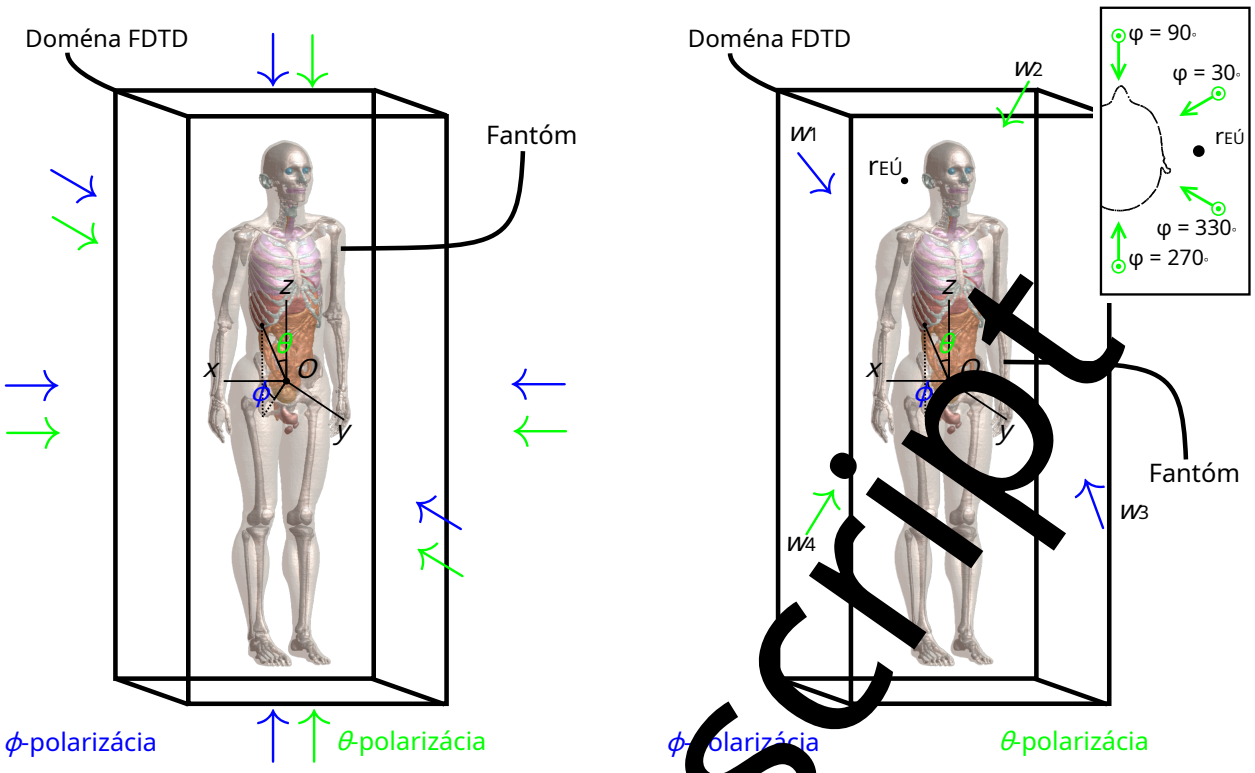
Týchto 12 simulácií je možné kombinovať na približné určenie expozície z ľubovoľných smerov dopadu a polarizácií.

2.4 Scenár autoindukovanej expozície

Obrázok 1b znázorňuje scenár automaticky indukovanej expozície s tvarovaním lúča špecifickým pre používateľa. K automaticky indukovanej expozícii dochádza, keď základňová stanica MaMIMO smeruje tvarovanie lúča smerom k zariadeniu používateľa, pričom koncentruje elektromagnetickú energiu v lokalizovanom hotspote v blízkosti tela. Na rozdiel od expozície z prostredia, dopadajúce pole vykazuje konštruktívnu interferenciu v ohnisku určenom algoritmom tvarovania lúča. Systémy 5G NR a predpokladané systémy 6G používajú tvarovanie lúča špecifické pre používateľa na maximalizáciu kvality pripojenia.

Predchádzajúca práca spojila tvarovanie lúča MaMIMO s prostredím šírenia špecifickým pre dané miesto. Hybridné metódy sledovania lúčov a FDTD umožňujú realistické posúdenie expozície pre vnútorné (Šichantsov*a kol.*2020,Wydaeghe*a kol.*2022) a vonkajšie (Wydaeghe*a kol.*2026) scenáre vrátane stochastických modelov kanálov zachytávajúcich skutočné štatistiky šírenia. Tieto štúdie ukazujú, že expozícia závisí

Manuálny kritický účtu



(a) Nastavenie environmentálnej expozície. Zobrazených je všetkých 12 rovinných vĺn (šípky), pričom každá zodpovedá samostatnej simulácii FDTD s amplitúdou dopadajúceho žiarenia 1 V/m.θ aϕ Polarizácie sú označené horným indexom na každom smer[illegible] označení.

(b) [illegible]stavenie automaticky indukovanej expozície. Tvarovanie lúča MRT za[illegible]áva niekoľko rovinných vĺn (šípky) tak, aby sa zaostrili na miesto UE. Každá vlna má komplexnú váhuw_{ja}ktoré môžu prísť z [illegible]hok[illegible]ek smeru. Vložka zobrazuje náš výber smerov. Fázy zarovnávajú príspevky poľa, zatiaľ čo amplitúdy zostávajú rovnaké.

Obrázok 1: Scenáre expozíci[illegible]pozíc[illegible] prostredia z 12 izotropných smerov. (b) Autoindukovaná expozícia s tva[illegible]aním lúča zo 4 smerov.

na prostredie, pozíciu používateľa a realizáciu kanála. Volíme iný prístup: namiesto modelovania špecifických prostredí a agregácie naprieč realizáciami kanálov hľadáme odhady expozície porovnateľné naprieč fantómovými modelmi a frekvenciami bez štatistického bootstrappingu (Vermeeren*a kol.*2008b,Wydaeghe*a kol.*2022).

195 Na simuláciu tohto scenára automaticky indukovanej expozície boli vypustené rovinné vlny zo štyroch azimutálnych smerov (ϕ=270°,330°,30°,90°)pri pevnej koelevácii (θ=90°),predstavujúce osvetlenie polopriestoru z pravej strany fantómu. Zvolili smeθ= 90° (horizontálny dopad), pretože základňové stanice sú zvyčajne umiestnené vo výške hlavy alebo nad ňou, čo robí horizontálny dopad bežným a táto geometria maximalizuje vertikálnu zložku elektrického poľaVIbaθpolarizácia bola zohľadnená, pretože vytvára
200 dominantnú vertikálnu zložku poľa relevantnú pre prepojenie prenosných zariadení (Šichantsov *a kol.*2020).

*2.4.1 Var[illegible]vania lúča*V systémoch MaMIMO je MRT bežnou technikou predkódovania, ktorá s[illegible]uje tva[illegible]vanie lúča (Björnson*a kol.*2017). Pre kanálový vektorhod.$\in\mathbb{C}^N$predstavujúce komplexné [illegible]sky[illegible]MN prenos pokynov do UE je vektor predkódovania MRT (Frobeniusovo normalizovaný)

$$w = \frac{\text{hod.}^*}{\|\text{hod.}\|}, \tag{1}$$

205 čo maximalizuje výkon prijímaného signálu $|y|^2 = |\text{hod.}^T w|^2$(Björnson*a kol.*2017). Zápis každého prvku kanála v polárnom tvare,$hod._{ja} = |hod._{ja}|\exp(j\phi_{ja})$, hmotnosť sa stáva

$$w_{ja} = \frac{|h_{ja}|}{\|\text{hod.}\|}\exp(-j\phi)_{ja} \tag{2}$$

Manuscript
Accepted

Fázový člen exp(−*jϕja*) konjuguje fázu kanála tak, že všetky príspevky prichádzajú do prijímača vo fáze. Toto je mechanizmus, ktorý vytvára konštruktívnu interferenciu. Amplitúdový člen |*hja*|/‖hod.‖prideľuje viac energie smerom so silnejším ziskom kanála.

V našom rámci interpretujeme každý kanál*hod.ja*úmerne vertikálnej zložke elektrického poľa v mieste UE v dôsledku*ja*-tý smer dopadu:*hod.ja*∝*Vz,ja*(r0). Predpokladáme, že anténa UE je vertikálne polarizovaná, čo je typické pre prenosné zariadenia. Pretože každá*hod.ja*je kanál pre jednotlivé smery v uhlovej doméne, a nie kanál pre jednotlivé antény, ide o formuláciu predkódovania MRT v priestore lúča. Amplitúdové váženie v (2) by vyžadovalo znalosť toho, ktoré smery majú silnejšie kanály, čo je informácia, ktorá závisí od prostredia šírenia.

Pri simulácii mnohých prostredí pomocou deterministických alebo stochastických modelov kanálov (napr. raytracing alebo QuaDRiGaWydaeghe*a kol.*2026)) a spriemerovaním výslednej expozície cez všetky realizácie kanálov,*v*žiadny azimutálny smer neprevláda konzistentne. Všetky amplitúdy sú preto nastavené na |*wja*|=1/*N*, poddajný

$$w_{ja} = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(-j \arg\left(V_{z,ja}(\mathbf{r}_0)\right)\right). \tag{3}$$

S touto voľbou,‖*w*‖2=1 (celkový výkon jednotky) pri zachovaní fázovej konjugácie MRT. Kombinované pole v ľubovoľnom boderje potom

$$V_{\text{kombinované}}(\mathbf{r}) = \sum_{ja=1}^{N} w_{ja} V_{ja}(\mathbf{r}). \tag{4}$$

Predpokladáme dokonalú informáciu o stave kanála a nezávislé riadenie každého smeru dopadu, takže rovnica (4) poskytuje hornú hranicu dosiahnuteľnej koncentrácie poľa pre daný celkový vysielaný výkon.

Superpozícia v rovnici (4) je presná, pretože tkanivo je lineárne. Každá*Vja*je riešenie FDTD s plnou vlnou, ktoré už obsahuje rozptyl, difrakciu a penetráciu vlny*ja*do tkaniva. Kombinované pole je preto definované v celom tele, na povrchu aj vo vnútri. psSAR10 gsa potom spriemeruje na 10 g kubickej hmotnosti vo vnútri tkaniva (IEC/IEEE 62704-1) a APD na 4 cm2plocha povrchu kože (IEC/IEEE 63195-4).*N*komponenty spolu tesú hustotu dopadajúceho výkonu jednej rovinnej vlny. Referenčná úroveň ICNIRP sa preto uplatňuje priamo. Podrobné mapy polí hotspotov sú uvedené vHerssens a Thielens(2025) aŠichantsova *kol.*2020) pre rovnakú predkódovaciu rodinu a fantómy.

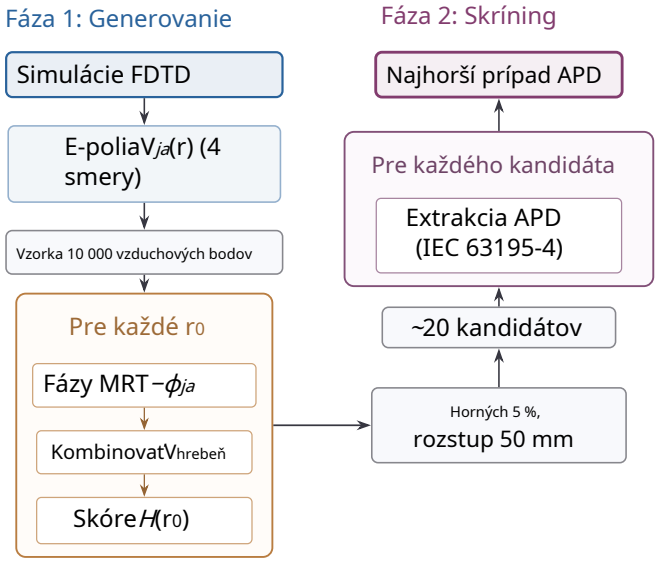
Štyri azimutálne smery vyvažujú reprezentatívnosť a výpočtové náklady. Pri viaccestnom šírení je efektívna poradie kanála obmedzená. Základ singulárnych hodnôt ukazuje, že niekoľko hlavných komponentov zachytáva väčšinu energie kanála (Björnson*a kol.*2017,Wydaeghe*a kol.*2022). Štyri smery preklenujúce azimutálny priestor zachytávajú dominantné módy typických kanálov, ktoré nie sú v priamom kontakte, pričom simulácie FDTD zostávajú zvládnuteľné.

*2.4.2 Vyhľadávanie bodu zaostrenia*Obrázok 2 znázorňuje najhorší prípad postupu vyhľadávania APD. Základňová stanica s MIMO formuje lúč smerom k anténe UE, držanej v ruke alebo vo vrecku, vždy vo vzduchu, v určitej vzdialenosti od pokožky. Preto sa bod zaostrenia formovania lúča nachádza vo vzduchu blízko povrchu tela, nie vo vnútri tela. Lúč sa zbieha v tomto mieste vo vzduchu a osvetľuje blízku pokožku, kde dochádza k absorpcii.

Vyhľadávací priestor pozostáva zo vzduchových voxelov v 20 mm plášti obklopujúcom povrch fantómu. Táto hrúbka pokrýva realistické vzdialenosti medzi používateľským zariadením a telom, pričom vylučuje voxely, ktoré sú príliš ďaleko na to, aby spôsobili podstatnú expozíciu pokožky. Z tohto priestoru bolo náhodne vybratých 10 000 kandidátskych zaostrovacích bodov, čo viedlo k priemernej vzdialenosti približne 10 mm vzhľadom na vzdialenosť 1,8 m.2plocha povrchu kože dospelého fantómu.

Pre simulácie FR3, ktoré počítajú iba APD, dodatočné odsadenie 20 mm (*x*-smer) a 10 mm (*y*-smer) bol pridaný, aby sa prispôsobili zaostrovacím bodom za fantómom (napr. blízko chrbta alebo ramien). Pri frekvenciách FR1 (700 MHz a 3500 MHz) bola vyhľadávacia oblasť rozšírená na 50 mm (z 20 mm pri FR3). Pri vlnových dĺžkach subGHz lúč zaostrený ďalej od povrchu stále vytvára zmysluplný hotspot na koži. Minimálna kandidátska vzdialenosť bola zvýšená na 100 mm, čo je v súlade s 20×dlhšia vlnová dĺžka pri 700 MHz (*λ*=430 mm) v porovnaní s FR3. Kandidátsky súbor sa zdvojnásobil na 40 na fantóm s nižším percentilom výberu (80 % oproti 95 % pri FR3), pretože proxy korelácia je pri týchto frekvenciách slabšia (pozri časť 3.3). Pri frekvenciách 3500 MHz a FR3 bola kombinácia polí obmedzená na 50 mm kocku okolo každého fokusového voxelu. Vrchol SAR pri týchto frekvenciách sa vyskytuje v milimetroch od fokusu na povrchu kože. Pri 700 MHz sa vrcholy SAR môžu objaviť ďaleko od fokusového bodu (pozri časť 3.3), preto sa namiesto toho použila kombinácia s plným objemom po celom tele.

Prijatý rukopis



Obrázok 2: Dvojstupňový skríning znižuje výpočtové náklady 600-krát. Fáza 1 hodnotí 10 000 kandidáti používajúci efektívne skóre hotspotu na základe intenzity elektrického poľa v blízkych voxeloch kože. Fáza 2 vykonáva úplnú extrakciu APD podľa IEC/IEEE 63195-4 iba na prvých 20 kandidátoch.

*2.4.3 Skóre hotspotu pre efektívnu identifikáciu najhoršieho pr*identifikácia najhoršieho prípadu ohniska si vyžaduje vyhodnotenie APD pre každé kandidátske miesto. Úplná extrakcia APD podľa normy IEC/IEEE 63195-4 (IEC/IEEE 2022) je výpočtovo náročná integrácia povrchu nad 4 cm^2spriemerovanie oblastí po celom povrchu fantómu.

Vyvinuli sme*skóre hotspotu*ktorý aproximuje A bez úplnej extrakcie, využívajúc vzťah medzi intenzitou elektrického poľa a APD. Pre daný bod ohniska r_0, skóre hotspotu je definované ako:

$$H(r_0) = \frac{1}{N_{koža}} \sum_{k=1}^{N_{koža}} \left| V_{kombinované}(r_k) \right|^2, \quad (5)$$

kde je súčet celkovo $N_{koža}$ kožné voxely v kocke s rozmermi 50 mm so stredom na r_0 a $V_{kombinované}$ je vážené pole z rovnice (4) s váhami vypočítanými pre bod ohniska r_0 pomocou rovnice (3).

Skóre hotspotu funguje, pretože $APD \propto \sigma |V|^2$, kde σ je vodivosť tkaniva. Výpočet skóre hotspotu vyžaduje iba odčítanie vopred vypočítaných hodnôt E-poľa v miestach voxelov kože a vykonanie váženej kombinácie. Nie sú potrebné žiadne ďalšie simulácie FDTD ani povrchové integrácie. To umožňuje rýchle vyhodnotenie všetkých 10 000 kandidátskych zaostrovacích bodov. Kandidáti v horných 5 % podľa skóre hotspotu boli ponechaní pre úplnú extrakciu APD. Aby sa predišlo zhlukovaniu, bola vynútená minimálna vzdialenosť 50 mm: kandidáti boli vyberaní postupne v zostupnom poradí podľa skóre hotspotu, pričom sa vynechal akýkoľvek kandidát do 50 mm od už vybraného bodu.

2.5 Rámec numerickej simulácie

Všetky simulácie sme vykonali pomocou programu Sim4Life 8.2 (ZMT Zurich MedTech AG 2024), riešič FDTD akcelerovaný GPU založený na Yeeovom algoritme (Yee 1966,Taflove a Hagness 2005). Jednoosová dokonale zhodná vrstva (UPML) so 7 absorpčnými vrstvami ukončila výpočtovú doménu. Formulácia celkového poľa/rozptýleného poľa (TF/SF) (Taflove a Hagness 2005) realizovalo osvetlenie vzdialeného poľa. Všetky zdroje boli harmonické excitácie na frekvenciách uvedených v tabuľke 1 s amplitúdou dopadu 1 V/m. Trvanie simulácie bolo trikrát dlhším časom prechodu diagonálou domény vo voľnom priestore (6 cyklov pri 450 MHz, 500 cyklov pri 26 GHz).

Vzhľadom na rozsah štúdie (550 simulácií naprieč 15 frekvenciami, 4 fantómy, viaceré smery a polarizácie), w vyvinuli open-source framework v jazyku Python automatizujúci pracovný postup simulácie. Každá simulácia je definovaná konfiguračným súborom JSON pre reprodukovateľnosť.

2.6 Výpočty nálna metodika

Priestorová diskretizácia ácia použila frekvenčne závislú schému: 2,5 mm články pri 450–1450 MHz (10–32 buniek na vlnovú dĺžku (CPW) v sklovci), pričom sa zmenšuje na 1,0 – 1,7 mm pri 2 140 – 5 800 MHz, a 0,3–0,6 mm na frekvenciách FR3. Časové krokovanie✓ nasledoval Courant-Friedrichs-Lewyho (CFL) limit stability (Kurant*a kol.*1928) ($\Delta t = \Delta x_{min}/(c_0\sqrt{3})$), čo predstavuje 4,81 ps pri 450 MHz až 0,58 ps

Rukopis Accepted

pri 26 GHz. Rozlíšenie mriežky bolo zvolené tak, aby vyvážilo numerickú presnosť (zameranie na 10 CPW v tkanivách s vysokou permitivitou), perforáciu kožnej sieťky (minimalizovanú pri $\Delta x \leq 1.5$ mm) a výpočtové náklady (škálovanie štvrtou mocninou veľkosti bunky bez redukcie domény). Hĺbka absorpcie výkonu 90 % (δ_{90}) klesá z ~60 mm vo svale pri 450 MHz až 1,1 mm v koži pri 26 GHz, čo odôvodňuje hrubšie mriežky pri nízkych frekvenciách, kde je penetrácia hlboká. Pri frekvenciách pod 6 GHz nie je absorpcia obmedzená iba na vrstvu kože. Úplné podrobnosti o stratégii diskretizácie, analýze perforácie aδ_{90}Výpočet je uvedený v doplnkových informáciách.

2.7 Anatomické fantómy

Použili sme štyri anatomicky realistické modely ľudského tela z ViP nadácie IT'IS (Gosselin*a kol.*2014): dvaja dospelí a dve deti, jedno pre každé pohlavie. Modely ViP (verzia 3.1) majú 500μm izotropné prirodzené rozlíšenie v celom tele. Duke (dospelý muž, 34 rokov) a Ella (dospelá žena, 26 rokov) predstavujú dospelých. Thelonious (muž, 6 rokov) a Eartha (žena, 8 rokov) predstavujú deti. Každý fantóm obsahuje viac ako 300 anatomických štruktúr s tkanivovo špecifickými dielektrickými vlastnosťami. Frekvenčne závislé dielektrické vlastnosti (ε_r, σ) a hodnoty hustoty hmoty pochádzajú z databázy vlastností tkanív IT'IS (verzia 5) (Nadácia IT'IS 2024).

18 rokov

Okrem celotelového a maximálneho priestorovo priemerného SAR bol vypočítaný aj regionálny SAR pre štyri anatomické skupiny relevantné pre hodnotenie expozície rádiofrekvenčnému žiareniu: mozog, oči, koža a genitálie. Tieto oblasti sa často objavujú v epidemiologických štúdiách a regulačných diskusiách. Regionálny SAR je definovaný ako hmotnostne vážený priemer hodnôt SAR vo všetkých tkanivách v skupine.*mozgová skupina* zahŕňa šedú hmotu, bielu hmotu, mozoček, hipokampus, talamus, hypotalamus, stredný mozog, mostík, predĺženú miechu, hypofýzu, epifýzu, prednú komisúru, zadnú komisúru a cerebrospinálny mok. The *skupina očí*pozostáva z rohovky, šošovky, bielka a sklovca.*skupina* zahŕňa, ako je definované v Sim4Life, entity „skin“ a „ear skin“.*skupina genitálií* zahŕňa pohlavne špecifické reprodukčné orgány. V prípade mužských fantómov (Duke, Thelonious) zahŕňa semenníky, nadsemenník, prostatu a penis. V prípade ženských fantómov (Ella, Eartha) zahŕňa vaječník, maternicu a vagínu.

2.8 Stratégie výpočtovej efektívnosti

Pri frekvenciách FR3 a FR2 vytvára jemné rozlíšenie mriežky výpočtové domény so stovkami miliónov až miliardami buniek. Dve stratégie redukcie domén a cloudová infraštruktúra umožnili tieto simulácie zvládnuť.

*2.8.1 Symetria polovice tela*Pre simulácie dodávku osvetľujúce iba jednu stranu tela (napr. + x(osvetľujúca pravú stranu), doména bola skrátená tak, aby zahŕňala iba osvetlenú polovicu. Hranica bola umiestnená v sagitálnej stredovej rovine s ukončením Perfectly Matched Layer (PML). Toto funguje, pretože hĺbka prieniku vysokých frekvencií je dostatočne malá, aby sa polia na osvetlenej strane neviazali s opačnou stranou. „xOznačenie /2” v tabuľke 1 označuje túto redukciu. Tkanivá, ktoré sa nachádzajú v stredovej rovine, ležia oproti tejto hranici, takže ich metriky sú vylúčené tam, kde sa použije redukcia (časť /2).

*2.8.2 Zníženie výškového faktora*Nad 7 GHz bola výška domény ďalej znížená frekvenčne závislým výškovým faktorom*hod.*Ako referenčnú frekvenciu sme zvolili 7 GHz, pretože pri tejto frekvencii dosahuje doména približne 800 miliónov buniek pre dospelých fantomov, čo je praktický limit, za ktorým majú GPU problémy s pamäťou aj v konfiguráciách s viacerými GPU. Zníženie výšky začína odstránením spodnej časti tela (chodidiel a nôh), pretože vrchol absorpcie v automaticky indukovanom scenári nastáva v oblasti hlavy a hornej časti trupu.

Výškový faktor bol vypočítaný ako:

$$hod. = \left(\frac{\Delta x_f}{\Delta x_{7\ \mathrm{GHz}}} \right)^3, \tag{6}$$

kde Δx_fje veľkosť bunky pri frekvencii$f$a $\Delta x_{7\ \mathrm{GHz}}$=0.Referenčná veľkosť bunky pri 7 GHz je 6 mm. Toto kubické škálovanie udržiava počet buniek mriežky zhruba konštantný so zvyšujúcou sa frekvenciou: počty buniek pre Duke, Ella, Eartha a Thelonious zostávajú v rámci 2 % ich hodnôt pri 7 GHz v celom pásme FR3 (Tabuľka 1). Napríklad pri 15 GHz,*hod.*= (0.4⁄0.6)^3≈0.30, čo znamená, že simuluje sa iba horných 30 % výšky fantómu.

Túto redukciu sme overili pomocou simulácií celého tela (doplňujúce informácie). Pri frekvencii 3,5 GHz, odstránením dolných 70 % tela (*hod.*=0.30) mení lokálne špičkové metriky, psSAR$_{10\ g}$a SAR orgánov hlavy o menej ako 4 %. Zníženie sa uplatňuje iba nad 7 GHz, kde je penetrácia

Prijatý manuál

hĺbka je kratšia a chyba menšia. Rovnaký rozptyl pri 450 MHz posúva metriky až o 53 %, a preto sa zachováva celé telo na všetkých frekvenciách.≤7 GHz.

Bez tohto zníženia výšky by simulácie pri 15 GHz vyžadovali približne 2,8 miliardy buniek na fantóm, čo je viac ako trojnásobok základnej čiary pri 7 GHz. Časový krok sa tiež znižuje s frekvenciou (z 1,16 ps pri 7 GHz na 0,77 ps pri 15 GHz), čo zvyšuje výpočtové náklady. Pri simulácii pri 26 GHz sa nepoužil prístup s výškovým faktorom (*hod.*=1) vypočítať $SAR_{\text{svetový bank}}$Namiesto toho bol simulovaný iba najmenší fantóm (Thelonious) z jedného smeru dopadu s použitím redukcie symetrie polovičného telesa. Rovnaký prístup s jedným smerom bol použitý pre Thelonious pri frekvenciách FR3, aby sa umožnila extrakcia SAR pre porovnanie s APD („položky „Polovica (pre SAR)“ v tabuľke 1“). Aj s týmito zjednodušeniami si simulácia s frekvenciou 26 GHz vyžadovala 1,84 miliardy buniek a viacero 48 GB GPU.

*2.8.3 Výpočtové zdroje a rozsah kampane*Simulácie sme vykonali na prenajatých cloudových staniciach GPU (TensorDock) s grafickými kartami NVIDIA H100, RTX 5090 a RTX 6000, niekedy na pracovných staniciach s viacerými GPU, spárovaných s 32 – 256 GB RAM. Cloudová infraštruktúra bola zvolená pred tradičnými vysokovýkonnými výpočtami (HPC), pretože naše možnosti HPC vyžadujú kvóty a front a Sim4Life vyžaduje Windows s licenciou vhodnejšou pre pracovné stanice.

Kampaň zahŕňala 550 individuálnych behov FDTD vo všetkých kombináciách fantómovej frekvencie a polarizácie smeru. Simulácie sa pohybovali od 11 miliónov buniek (Thelonious pri 450 MHz) do 1,84 miliardy buniek (Thelonious pri 26 GHz). Výpočtové náklady sa značne líšili v dôsledku... škálovanie. Duke pri 450 MHz dokončí prácu za menej ako 5 minút, pri 5,8 GHz za 25 minút a pri 26 GHz (iba Thelonious, polovica tela) za viac ako 2 hodiny, pričom fázy nastavenia a extrakcie viazaných na I/O trvali podobne dlho.

18 rokov

3 výsledky

Simulácie vytvorili rozsiahly viacrozmerný súbor údajov. Táto časť sumarizuje hlavné zistenia. Doplňujúce informácie obsahujú ďalšie údaje: hodnoty SAR pre jednotlivé tkanivá pre každú frekvenciu a smer, krivky frekvenčnej odozvy pre jednotlivé orgány, mapy priestorových hotspotov a porovnania krížových fantomov.

Pre porovnanie so základnými obmedzeniami ICNIRP pre vystavenie širokej verejnosti sú limity 0,08 W/kg pre priemernú hodnotu SAR pre celé telo a 2 W/kg pre lokálnu hodnotu $psSAR_{10\,g}$(hlava a trup) a 20 W/m^2 pre APD nad 6 GHz (Tabuľka 2).

3.1 Expozícia životného prostredia FR1

Všetky hodnoty SAR v tejto časti sú normalizované na hustotu dopadajúceho výkonu 1 W/m^2.Referenčné úrovne vystavenia verejnosti podľa ICNIRP z roku 2020 sú $S_{\text{odkaz}} = f_{\text{MHz}}/200$ W/m^2 pre frekvencie pod 2 GHz a 10 W/m^2 pri 2 GHz a viac. Hodnoty SAR je možné škálovať pomocou týchto faktorov, aby sa získali hodnoty na referenčnej úrovni.

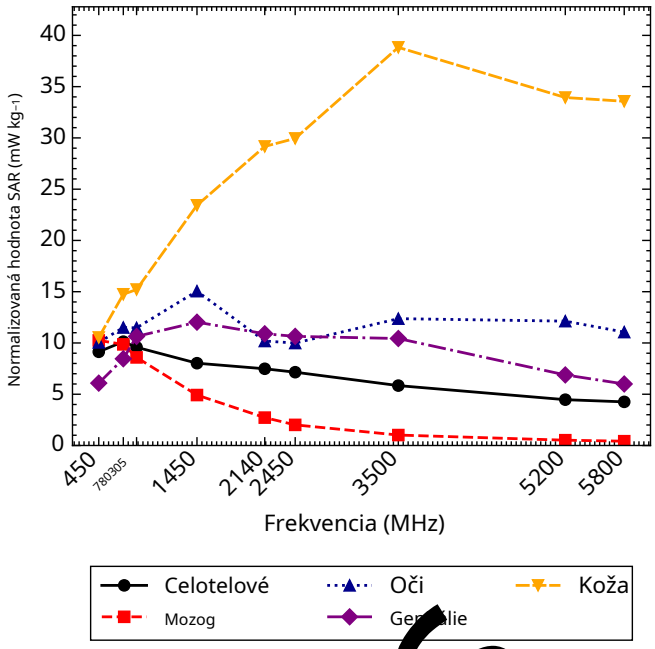
*3.1.1 Hĺbka prieniku určuje frekvenčnú odozvu*Obrázok 3 zobrazuje normalizovanú hodnotu SAR ako funkciu frekvencie. Hĺbka absorpcie výkonu pri 90 % (δ_{90}) na tele sa znižuje z ~60 mm pri 450 MHz až ~10 mm pri 5800 MHz. Tento posun od objemovej k povrchovej absorpcii riadi všetky metriky SAR.

Obrázok 3 ukazuje opačné trendy pre rôzne skupiny tkanív. SAR kože sa medzi 450 MHz a 5800 MHz zvyšuje 3,2-krát, pretože energia sa koncentruje povrchovo. SAR mozgu sa medzi 450 MHz a 5800 MHz znižuje o 96 %, pretože lebka a nadložné tkanivá absorbujú väčšinu energie skôr, ako sa dostane do mozgu. SAR celého tela sa medzi 450 MHz a 5800 MHz znižuje 2,1-krát, pretože celkový absorbovaný výkon sa znižuje, keď sa absorpcia obmedzuje na tenkú povrchovú vrstvu.

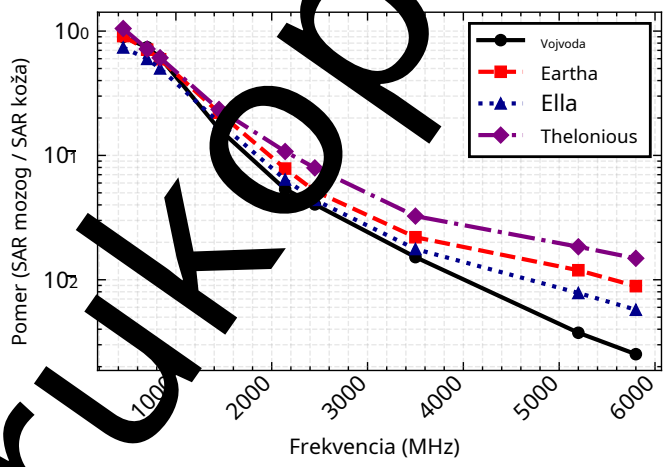
Obrázok 4 znázorňuje prechod pomeru SAR medzi mozgom a pokožkou vo všetkých fantómoch. Pri frekvencii 450 MHz sa pomer pohybuje od 0,74 do 1,05, čo znamená, že SAR mozgu a pokožky je porovnateľný. S rastúcou frekvenciou pomer výrazne klesá pre všetky fantómy. Pri frekvencii 5800 MHz sa pomery znižujú na hodnotu medzi 0,003 a 0,015. Detské fantómy si udržiavajú vyššiu relatívnu penetráciu pri vyšších frekvenciách v porovnaní s dospelými. Tento pokles o dva rády v pásme FR1 ukazuje posun od penetračnej k povrchovej absorpcii.

*3.1.2 Tkanivovo špecifická absorpcia*Obrázok 5 zoradí 20 tkanív s najvyššou priemernou hodnotou SAR na základe hmotnosti, spriemerovanou vo všetkých frekvenciách a smeroch. Chrupavka ucha (36,9 mW/kg) a koža ucha (29,5 mW/kg) absorbujú výrazne viac energie na jednotku hmotnosti ako objemová koža (21,5 mW/kg). To vysvetľuje ich periférna poloha a tenká geometria: ušnica je odkrytá z viacerých smerov a chýba jej podkladové tkanivo, ktoré by absorbovalo dopadajúcu energiu.

Prijatý manuálny kód



Obrázok 3: SAR kože sa zvyšuje 3,2-krát, zatiaľ čo SAR mozgu sa zníž[a] o 96 % v rámci FR1. Hmotnostne spriemerovaná SAR podľa skupiny tkanív pre Thelonious, spriemerovaná cez všetkých 12 smeroch a polarizáciách. Oči vykazujú nemonotónnu odozvu.



Obrázok 4: Pomer SAR mozgu ku koži naprieč fantómovými modelmi. Expozícia mozgu klesá rádovo v porovnaní s pokožkou so zvyšujúcou sa frekvenciou. Detské fantómy vykazujú vyššiu relatívnu expozíciu mozgu pri vysokých frekvenciách v porovnaní s dospelými.

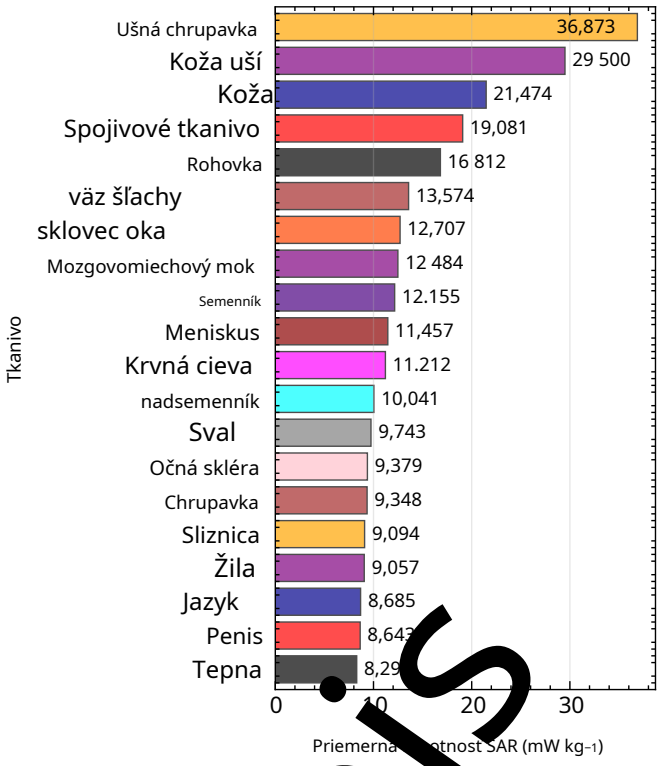
R[ohovka] je na piatom mieste (16,8 mW/kg), čo zodpovedá exponovanej polohe oka. Semenníky sú na deviatom mieste. (12,2 mW/kg), pričom pacienti dostávajú značné čelné ožiarenie napriek tieneniu panvy z iných uhlov. Meniskus je [chrupka]ty (11,5 mW/kg). Vnútri lebky sa mozgovomiechový mok (CSF) umiestňuje na [druhé] miesto (12,5 mW/kg), vyššie ako sivá hmota (5,6 mW/kg) a biela hmota (3,2 mW/kg) kvôli [vysokému] obsahu vody a vodivosti.

[Pre] ps[SAR10 g], priemerný objem 10 g vyhladzuje tkanivovo špecifické variácie. Dominuje koža (83,5 [mW]/kg), nasledovaný podkožným tukom (81,4 mW/kg), svalmi (75,7 mW/kg) a kosťami ([11,7] mW/kg). Malé tkanivá, ako napríklad chrupavka ucha (celková hmotnosť 7 g), nedokážu zaplniť kocku s hmotnosťou 10 g, a preto [dosahujú] [vyššie] [hodnoty] [SAR] v [tomto] poradie.

3.13 Kapitola Celkom hodnotí vyšší celotelový SAR ako dospelí Obrázok 6 porovnáva SAR celého tela v rámci [troch] [fantómov] [detí] [a] [dvoch] [dospelých] adults (Dukeov[ia], Ella) [pri] [rovnakej] [frekvencii] [a]. Pri 700 MHz dosahuje Thelonious 10,1 mW/kg v porovnaní s Dukeovými 5.5 mW/kg (a[ko] [tiež] [5] [.8]).

[Th]e [hodnotenie] SAR [u] [detí] [podľa] WHO vyplýva zo vzťahu medzi SAR, absorpciou

Prijatý rukopis



Obrázok 5: Tkanivá ucha absorbujú dvakrát viac energie na jednotku hmotnosti ako objemová koža. Top 20 tkanív zoradených podľa priemernej hodnoty SAR pre Thelonious, spriemerovanej naprieč všetkými frekvenciami vo FR1 a smeroch. Rohovka, semenník a meniskus sa tiež umiestnili v prvej desiatke.

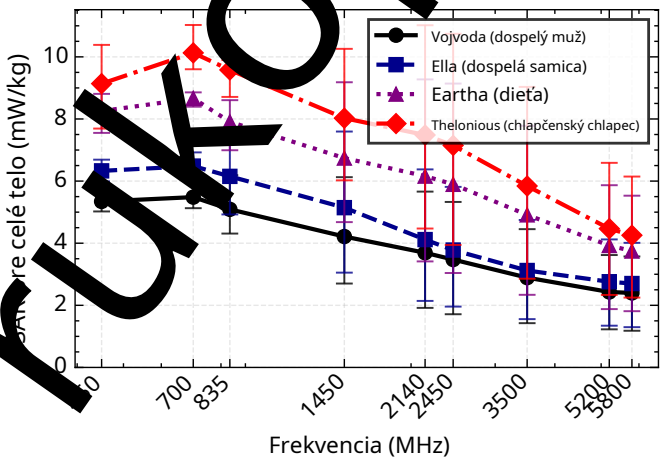


Figura 6: Deti vykazujú 1,5–1,9-krát vyššia hodnota SAR pre celé telo ako u dospelých na všetkých bars = 1 c ate standa de frekvenciách. Chyba v 12 kombináciách smeru a polarizácie.

k sek ss on (ACS) a telesná hmotnosť (Bamba*a kol.*2015):

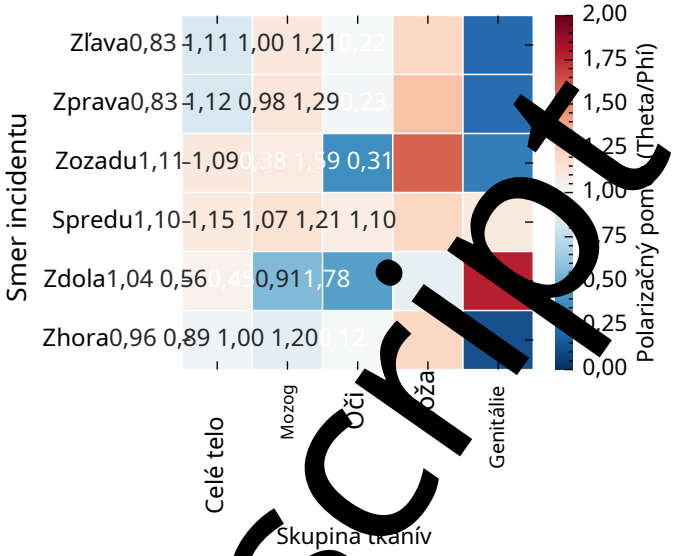
$$SAR_{\text{svetový bank}} = \frac{ACS_{\text{svetový bank}} \times S}{m} \quad (7)$$

w d. $ACS_{\text{svetový bank}}$ je the op. rierez absorpcie celého tela (v m^2), S je hustota dopadajúceho výkonu, ande e body mass. Hl ci deti majú menší $AKS_{\text{svetový bank}}$ ako dospelí (menší povrch tela), t od. ss je plan ort v oa eľa menší. Pomer $ACS_{\text{svetový bank}}/m$ je približne o 50 % vyššia v 6-yuch old ň n v an ad u o znamená, že deti absorbujú viac energie na kilogram telesnej hmotnosti. Pri nižších ako GHz f re t y Enc es, body dizmienky sa približujú zlomkom vlnovej dĺžky (λ=43 cm pri 700 MHz), asi- postan ly profesionálny vojvoda ing q t y rezonančné efekty, ktoré sa líšia medzi veľkosťami tela.

Prijatý rukopis

Tabuľka 3: Smerová variácia v metrikách SAR (Thelonious, frekvenčne priemerované hodnoty).

Metrika	Max (mW/kg)	Minimálna (mW/kg)	Max./Min.
SAR očí	28,9 (vpredu)	1,4 (zadná strana)	20×
SAR genitálií	30,5 (vpredu)	0,7 (nižšie)	44×
SAR mozgu	6,5 (nižšie)	1,8 (vyššie)	4×
SAR pokožky	41,3 (vpredu)	9.2 (vyššie)	4×
SAR pre celé telo	10,3 (späť)	5.3 (nižšie)	2×



Obrázok 7: Pomer polarizácie (θ/ϕ) pre rôzne skupiny tkanív a smery dopadu. Hodnoty blízke 1 naznačujú necitlivosť. Genitálie vykazujú silnú polarizačnú citlivosť (pomer = 1,8 zdola). SAR celého tela zostáva necitlivý.

*3.1.4 Závislosť smeru a polari*Tabuľka 3 sumarizuje smerovú variáciu pre každú metriku SAR (Thelonious, frekvenčne priemerované hodnoty). Podobné vzorce sa pozorujú aj pre ostatné fantómy: frekvenčne priemerovaná celotelová SAR sa pohybuje v rozmedzí 2,0 – 2,3.×cez fantómy, koža 4,5–6,4×, oči 20–36×a mozog 3,6–6,0×(všetky fantómy, pozri tabuľky S3–S6 v doplnkových informáciách). Genitály vykazujú najväčší rozdiel v smerovej variácii medzi fantómami, v rozmedzí od 9 do 10×pre ženy (Ella, Eartha) do 46 – 6×pre mužov (Duke, Thelonious). U Theloniousa vykazujú oči 20-násobnú variabilitu: čelná expozícia prináša 28,9 mW/kg oproti 1,4 mW/kg zozadu, pretože rohovka je odkrytá, zatiaľ čo lebka chráni zadnú časť. Genitálie vykazujú 44-násobnú variabilitu medzi čelným a spodným smerom. Telo chráni panvovú oblasť z väčšiny uhlov. Mozog vykazuje iba 4-násobnú variabilitu: lebka chráni zo všetkých smerov. SAR celého tela sa líši 2-násobne.

Polarizácia má vo všeobecnosti menší vplyv ako smer. Obrázok 7 znázorňuje polarizačný pomer pre rôzne skupiny tkanív a smery dopadu.θ/ϕPolarizačný pomer sa pohybuje od 0,8 do 1,6 pre SAR pokožky a celého tela. Výnimkou sú genitálie. Zdola pomer dosahuje 1,8, čo naznačuje silnú väzbu na vertikálne polarizované polia. Zhora klesá na 0,12. Výsledky môžu byť podhodnotené, pretože vlastnosti materiálov z databázy IT'IS sú izotropné.

Databáza IT'IS tiež priraďuje dielektrické vlastnosti nezávislé od veku. Detské fantómy majú preto detskú anatómiu, ale vlastnosti tkaniva dospelého človeka. Vlastnosti nezávislé od veku sú štandardom v numerickej dozimetrii (Bakker*a kol.*2010,Kühn*a kol.*2009,Gosselin*a kol.*2014). Uzavretý Fresnel Airy konzervatívne posúva APD a SAR celého tela o 6 – 10 %. Tento posun je porovnateľný so 4 – 9 %, ktorý spôsobuje 10 – 20 % neistota dielektrických parametrov prenáša na rovnaké metriky. Naša Závery o súlade sú preto odolné voči posunu tohto rozsahu a Doplňujúce informácie uvádzajú úplnú analýzu.

Tieto vplyvy zhromažďujeme do jedného rozpočtu neistoty (doplnkové informácie). Dominantnými náhodnými príspevkami sú rozptyl tkanivového dielektrika a numerická chyba FDTD. Kombinované v kvadratúry, poskytujú rozšírenú neistotu približne±12 % na metrikách absorbovaného výkonu pri 95 % pravdepodobnosti pokrytia. Vplyvy veku a skrátenia domény pôsobia jedným smerom, konzervatívne.

Accepted Manuscript

Tabuľka 4: Smerovo priemerovaná hodnota SAR pre celé telo pri referenčných úrovniach ICNIRP (FR1).

Frekvencia (MHz)	S_{odkaz} (W/m2)	Vojvoda (M, 34 r.)	Ella (Ž, 26 r.)	Eartha (Ž, 8 rokov)	Thelonious (M, 6 rokov)	% limitu*a*
		Smerovo priemerovaný $SAR_{svetový\ bank}$(mW/kg)				
450	2,25	12,0	14.2	18,6	20,6	26 %
700	3,50	19.2	22,7	30,3	35,5	44 %
835	4.18	21,3	25,7	33,1	40,0	50 %
1450	7,25	30,5	37,3	48,9	58,2	%
2140	10,0	36,9	41,2	61,6	74,8	93 %
2450	10,0	34,7	37,8	59,0	71,5	9 %
3500	10,0	28,9	31.2	49,1	58,4	3 %
5200	10,0	24,3	27,6	39,3	44.7	56 %
5800	10,0	24,0	27,0	37,5	42,6	53 %

*a*Maximálne pre všetky štyri fantomy. Základné obmedzenie $SAR_{svetový\ bank}$=80 mW/kg

18 rokov

*3.1.5 Korelácia medzi metrikami SAR*Korelačná matica vo všetkých 432 simulačných konfiguráciách ukazuje, že väčšina metrík je nezávislá s jedným ochranným účinkom. SAR pokožky a SAR mozgu korelujú negatívne (r=−0.45,p <0.001): vysoká absorpcia pokožkou znižuje energiu dostupnú pre hlbšie preniknutie. Povrchová absorpcia chráni hlboké tkanivá.

SAR celého tela a SAR pokožky sú takmer nekorelované (r=−0.0). Pri nízkych frekvenciách dominujú hlboké tkanivá (svaly, orgány) v SAR celého tela. Pri vysokých frekvenciách SAR celého tela klesá, aj keď sa zvyšuje podiel kože. Tieto protichodné trendy sa vyrušia.

$psSAR_{10\ g}$hodnoty pre rôzne orgány sú do značnej miery nezávislé. Koža a genitálie korelujú iba r=0.14. Mozog a oči korelujú vr=0.54 (obe metriky sa týkajú oblasti hlavy). Najhorší možný prípad expozície pre jeden orgán nepredpovedá najhorší možný prípad pre ostatné.

*3.1.6 Rozpätia zhody na referenčných úrovniach*Tabuľka 4 porovnáva smerovo spriemerovanú hodnotu SAR pri referenčných úrovniach IC-NIRP so základnými obmedzeniami. Referenčná úroveň S_{odkaz}zvyšuje sa z 2,25 W/m2 pri 450 MHz až 10 W/$m^2$2pri 2 GHz a viac. Stĺpec úplne vpravo zobrazuje percento základného obmedzenia dosiahnutého maximálnou hodnotou SAR vo všetkých štyroch fantómových zariadeniach.

Celotelový SAR dosahuje vrcholy v blízkosti 2140 MHz pre všetky fantómové zariadenia, čo poskytuje najmenšiu rezervu v pásme FR1. Thelonious dosahuje na tejto frekvencii 93 % základného obmedzenia. Detské fantómové zariadenia (Thelonious, Eartha) prevyšujú dospelých faktorom 1,7 – 1,9 vo všetkých frekvenciách. Pohlavie predstavuje menej ako 20 % variáciu v rámci každej vekovej skupiny. Dospelé fantómové zariadenia zostávajú pod 52 % základného obmedzenia na všetkých frekvenciách.

Tieto hodnoty sú spriemerované z 12 smerov. Najhoršia jednotlivá konfigurácia (dopad spredu alebo zozadu) je 1,5 – 1,6-krát vyššia. V tejto konfigurácii oba podradené fantomy prekračujú základné obmedzenie v blízkosti 2140 MHz. Thelonious je na 145 % limitu a Eartha na 122 %. Štyri z dvanástich konfigurácií prekračujú limit pre každú z nich. Duke a Ella sú pod 82 % v každej konfigurácii.

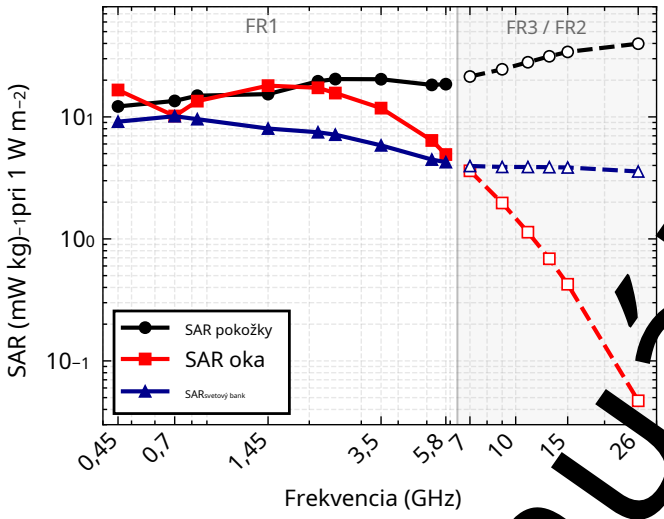
Tieto hodnoty sa vyskytujú na referenčnej úrovni ICNIRP. Meracia kampaň v desiatich krajinách zistila hustotu environmentálneho výkonu 0,33 – 1,72 mW/m^2.2, tri až štyri rády pod 10 W/m2 referenčná úroveň (Veludo*a kol.*2025). Na najvyššej nameranej úrovni je najhoršia konfigurácia pre Thelo sa 4000-krát pod základným obmedzením.

Pre $psSAR_{10\ g}$okraje sú podstatne väčšie. Kožný $psSAR_{10\ g}$dosahuje 909 mW/kg pri 2140 MHz pre D a referenčnej úrovni (45 % limitu 2000 mW/kg). Mozog a oči $psSAR_{10\ g}$dosahujú 178 mW/kg a 7 m (9 % a 7 % limitu). Ide tiež o smerovo spriemerované hodnoty. V najhoršej konfigurácii je Eart na úrovni 129 % obmedzenia 2 W/kg pre hlavu a trup pri frekvencii 2 140 MHz. Vrchol sa nac v ruke, kde namiesto toho platí obmedzenie pre končatiny 4 W/kg. Oproti tomuto bmedzeniu je Eartha na úrovni 65 % psSAR.$_{10\ g}$je preto pod platným obmedzením v každej kon urácii prostredia. Limitnou metrikou pre vystavenie životnému prostrediu FR1, pre smerový priem a pre najhorší prípad je celotelový, nie lokálny SAR.

3.2 Trendy SAR rozšírené na FR3 a FR2

Všetky hodnoty SAR v tejto časti sú normalizované na 1 W/m^2.2incident a zakryte Theloniusa (M, 6 rokov) pri osvetlení z pravej strany (θpolarizácia) pri 7–26 GHz. SAR mozgu je vylúčený: štruktúry na sagitálnej reznej ploche polovičného fantómu vykazujú rastúci SAR s frekvenciou, oproti

Prijatý manuscript



18 rokov

Obrázok 8: SAR oka sa znižuje 77-násobne zo 7 na 26 GHz, keď hĺbka prieniku klesne pod hrúbku očného viečka. SAR pokožky stúpa v celom pásme. Hmotnostne spriemerovaný SAR pre Theloniusa. Plné čiary: FR1. Prerušované čiary: FR3 a FR2. SAR pokožky a oka: osvetlenie pravou stranou v celom pásme. SAR celého tela: FR1 plná čiara = 12-smerový izotropný priemer, FR3/FR2 prerušovaná čiara = jeden smer pravej strany. SAR mozgu a genitálií je vylúčený kvôli artefaktom na hraniciach PML v polovičnom fantome FR3.

fyzické očakávanie pre hlboké tkanivo (artefakt hranice PML). SAR genitálií je vylúčená rovnakým mechanizmom: penis a prostata prebiehajú pozdĺž sagitálnej stredovej roviny a sú prerezané a odkryté voči tvári PML.

3.2.1 SAR pokožky a očí v celom pásme. Obrázok 8 zobrazuje SAR pokožky, oka a celého tela od 450 MHz do 26 GHz. SAR pokožky naďalej rastie: 18,6 mW/kg pri 5800 MHz (FR1, pravá strana), 21,5 mW/kg pri 7 GHz a 39,8 mW/kg pri 26 GHz. δ_{90} tela padá z ~10 mm pri 5800 MHz až 1,1 mm v koži pri 26 GHz, pričom sa absorpcia sústreďuje v postupne tenšej povrchovej vrstve.

Hodnota SAR oka klesá zo 4,92 mW/kg pri 5800 MHz na 3,62 mW/kg pri 7 GHz a potom na 0,047 mW/kg pri 26 GHz, čo predstavuje 77-násobný pokles v rámci FR3 a FR2. Theloniousov fantóm má zatvorené oči. Koža na očných viečkach zakrýva rohovku. Pri 26 GHz, δ_{90} v koži klesá na 1,1 mm, čo je porovnateľné s hrúbkou očného viečka, a dopadajúca energia sa absorbuje v očnom viečku predtým, ako dosiahne rohovku. Hranica FR1/FR3 je hladká pre SAR pokožky aj oka. SAR celého tela je normalizovaný hmotnosťou celého tela. Tieňovaná polovica absorbuje oba difrakciu od rovinnej vlny, obmedzenú na 7 GHz, takže osvetlená polovica nesie absorbovaný výkon tela. Hodnota je 4,0 mW/kg pri 7 GHz (jeden smer), čo je spojitá s priemerom 4,3 mW/kg v 12 smeroch pri 5800 MHz. SAR celého tela zostáva stabilný v blízkosti 3,6 – 4,0 mW/kg v rámci FR3 a FR2.

3.2.2 psSAR$_{10\,g}$ pokračovanie psSAR$_{10\,g}$ plynule sa spája na hranici pásma: 63,5 mW/kg pri 5800 MHz, 60,4 mW/kg pri 7 GHz a 50,3 mW/kg pri 26 GHz. Pokles je 21 % z 5800 MHz na 26 GHz. Priestorové priemerovanie na 10 g vyhladzuje čoraz obmedzenejšiu povrchovú absorpciu. Keďže sa energia koncentruje v tenšej vrstve, rozloženie píku na pevnom objeme 10 g sa mení pomaly. 12-smerový izotropný psSAR$_{10\,g}$ pri 5800 MHz je približne 116 mW/kg, čo je zhruba dvojnásobok hodnoty jedného smere. Hodnoty FR3 a FR2 tiež podceňujú izotropný najhorší prípad.

3.3 Automaticky indukovaná expozícia FR1

Všetky hodnoty sú normalizované na 1 W/m^2 dopad a mierka proporcionálne na referenčnej úrovni (S_{odkaz} = 3.5 W/m^2 at 700 MHz a 10 W/m^2 pri 3500 MHz). Základné obmedzenia ICNIRP (2020) pre lokálne SAR sú 4 W/kg pre psSAR$_{10\,g}$ (hlava/trup) a 4 W/kg (končatiny). Pre celotelovú expozíciu, SAR$_{svetový\ bank}$ = 2 mW/kg.

3.3.1 psSAR$_{10\,g}$ pri 700 MHz a 3500 MHz Tabuľka 5 porovnáva autoindukované a environmentálne psSAR$_{10\,g}$ a SAR$_{svetový\ bank}$ na obe frekvencie. Pri 3500 MHz, automaticky indukovaný psSAR$_{10\,g}$ prekračuje základné rasnr ia fo tyr phod

2 W/kg hlava/t orsolimto, vrcholom SAR lokalizovaným v trupe, hrudníku alebo krku pre všetky štyri fantómy.

Akceptovaný manuál

Tabuľka 5: Automaticky indukovaná psSAR$_{10\,g}$a SAR$_{\text{svetový bank}}$v porovnaní s najhorším scenárom vplyvov prostredia. Všetky hodnoty sú pri 1 W/m$_2$incident. Stĺpec s % limitom uvádza psSAR$_{10\,g}$ako percento z príslušného miestneho základného obmedzenia SAR vS_{odkaz}.

	700 MHz (S_{odkaz}=3.5 W/m^2$_2$)			3500 MHz (S_{odkaz}=10 W/m^2$_2$)	
	psSAR$_{10\,g}$ [mW/kg]	SAR$_{\text{svetový bank}}$ [mW/kg]	% limit	psSAR$_{10\,g}$ [mW/kg]	% limit
Fantóm	Obálka	Automatická obálka	naS_{odkaz}	Obálka Auto.	naS_{odkaz}
Vojvoda (M, 34 rokov)	129	253 6,7 6,5	22 %*a*	156 266	133 %*b*
Eartha (Ž, 8 rokov)	173	339 11,2 11,6	30 %*a*	159 305	152 %*b*
Ella (Ž, 26 rokov)	168	280 8,3 7,5	49 %	132 275 12,4	135 316 158 %*b*
Thelonious (M, 6 rokov)	11,7		48 %	197 262	131 %*b*

*a*Vrchol v dolnej časti nohy. Platí limit pre končatiny (4 W/kg).

*b*Vrchol v oblasti trupu/hrudníka/krku. Platí limit pre hlavu/trup (2 W/kg).

Pozri doplňujúce informácie o rozdelení telesnej výšky.

18 rokov

Pri frekvencii 700 MHz všetky fantómy spĺňajú požiadavky. Duke a Eartha dosahujú vrchol v dolnej časti nohy, kde platí limit 4 W/kg pre končatinu, pričom dosahujú 22 %, respektíve 30 %. Ella a Thelonious dosahujú vrchol v trupe (49 % a 48 % limitu 2 W/kg).

Pri frekvencii 3500 MHz dosahuje environmentálna hodnota pre Theloniusa už 98 % základného obmedzenia priS_{odkaz},a tvarovanie lúča spôsobuje nesúlad pri všetkých štyri fantómy. Tento scenár používa zjednodušené tvarovanie lúča MRT zo štyroch smerov a nepredstavuje hornú hranicu. Zisk koherentného poľa rastie s počtom prvkov antény (Marzetta*a kol.*2016). Bohaté prostredie šírenia poskytuje viac viaccestných zložiek pre konštruktívnu interferenciu, takže vyššie lokálne hodnoty SAR sú fyzikálne uskutočniteľné. Reálne nasadenia menia smer lúča s pohybom používateľa a dynamikou kanála (napr. s časovým delením viacnásobného prístupu (TDMA)), čo znižuje časovo priemerovanú expozíciu.

Tieto hodnoty sa vyskytujú na referenčnej úrovni ICNIRP. Meracia kampaň v desiatich krajinách zistila 2,61 – 11,12 mW/m$_2$pri 3500 MHz pri nepretržitom sťahovaní v najhoršom prípade, čo je o tri rády menej ako táto úroveň (Veludo*a kol.*2025). Realistická expozícia je výrazne pod základnými obmedzeniami.

Pri frekvencii 700 MHz je hodnota prostredia v rámci súladu s normami a tvarovanie lúča zhruba zdvojnásobuje psSAR.$_{10\,g}$s dostatočnou rezervou k limitu. Slabá proxy korelácia pri 700 MHz (časť 3.3.2) znamená, že hlásené hodnoty nemusia predstavovať absolútne najhorší prípad vo všetkých možných bodoch zamerania. Rezerva k základnému obmedzeniu lokálneho SAR (maximálne 49 % priS_{odkaz}) je dostatočne veľká na to, aby táto neistota neovplyvnila záver o súlade.

SAR$_{\text{svetový bank}}$pri 700 MHz s tvarovaním lúča v podstate nemení. Automaticky indukovaný SAR$_{\text{svetový bank}}$rozsahy 6,5 – 11,7 mW/kg naprieč fantómami pri 1 W/m$_2$, v rámci rozpätia environmentálnych hodnôt (4.1–12,4 mW/kg v 12 smeroch). Koherentné zaostrovanie prerozdeľuje absorpciu priestorovo bez zvýšenia celkového absorbovaného výkonu.

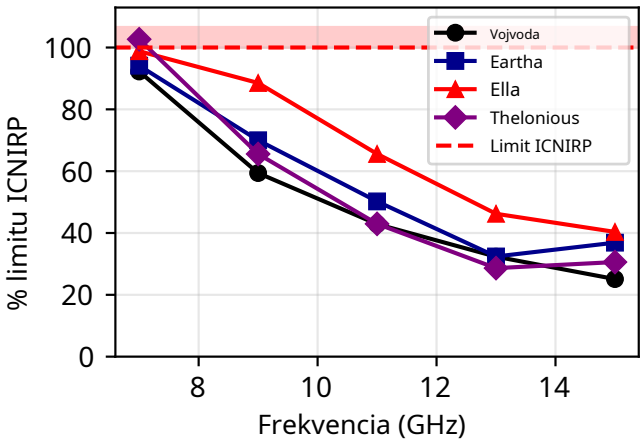
*3.3.2 Spoľahlivosť zástupcu pri vyhľadávaní kandidátov*Proxy hotspot-skóre, ktoré spoľahlivo identifikuje najhorší prípad APD na FR3, má odlišné výsledky v rámci dvoch frekvencií FR1. Pri 3500 MHz Spearmanova poradová korelácia medzi proxy skóre a psSAR$_{10\,g}$pohybuje sa odρ= 0.70 ku 0.80 (p <0.001) naprieč fantómami. Najhorší kandidát sa umiestni medzi prvými 8 pre všetkých fantómov (prvé 2 pre Dukea a Ellu, prvý 1 pre Theloniusa).

Pri 700 MHz klesá korelácia poradia naρ= 0.27–0.42. Najhorší prípad Dukeovej univerzity sa podľa proxy skóre umiestnil na 36. mieste zo 40. Pri tejto frekvencii (λ=430 mm), rozmery tela sa blížia k rezonancii, difrakcia obaľuje polia okolo tela a umiestnenie píku SAR sa oddeľuje od bodu zaostrenia lúča. Duke ilustruje tento efekt: voxel zaostrenia leží v oblasti hlavy, ale pík SAR sa vyskytuje v dolnej časti nohy (10 % telesnej výšky). Zástupca predpovedá koncentráciu poľa blízko povrchu, ale nie absorpciu v hlbokých tkanivách pri vlnových dĺžkach subGHz (pozri doplnkový materiál pre zaostrenie-$z$vs. vrchol-$z$bodové grafy). Väčší počet kandidátov, 40 na fantóm, kompenzoval slabú rozlišovaciu schopnosť proxy pri 700 MHz.

3.4 Automaticky indukovaná expozícia FR3

Všetky hodnoty APD v tejto časti sú normalizované na hustotu dopadajúceho výkonu 1 W/m^2.$_2$Pri referenčnej úrovni ICNIRP 10 W/m$_2$((platí nad 2 GHz), hodnoty sa škálujú faktorom 10. Základné obmedzenie je APD = 20 W/m$_2$v priemere nad 4 cm$_2$.

Prijatý skriptMan



Obrázok 9: Thelonious (6 rokov) prekračuje základné obmedzenie ICNIRP pri 7 GHz (103 %). Percentuálny podiel základného obmedzenia oproti frekvencii pre autoindukovanú expozíciu pri 10 W/m²referenčná úroveň. Tieňovaná oblasť nad 100 % označuje nesúlad. Pri 15 GHz všetky fantómové signály klesnú pod 40 %.

Tabuľka 6: Najhorší prípad APD podľa fantómu a frekvencie (W/m2pri 1 W/m2incident).

Fantóm	7 GHz	9 GHz	11 GHz	13 GHz	15 GHz
Vojvoda	1,84	1.19	0,8	0,65	0,50
Ella	1,98	1,77	1,31	0,92	0,81
Eartha	1,88	1,40	1,0	0,65	0,74
Thelonious	2,05	1,3	0,8	0,57	0,61

3.4.1 Prekročený limit ICNIRP na frekvencii 7 GH Obrázok 9 zobrazuje APD každého fantómu ako percento základné obmedzenie v pásme FR3. Thelonious (6 dosahuje 103 % základného obmedzenia pri 7 GHz, čo je jediná konfigurácia prekračujúca limit IC P. Najhorší prípad APD na referenčnej úrovni je 20,5 W/m², presahujúci 20 W/m2 o 2, %. Predchádzajúce štúdie zaznamenali prekročenia základných obmedzení pri splnení referenčn ovní, najmä u malých detí pri nižších frekvenciách (Vermeeren*a kol.*2008a).

Pri 7 GHz dosahujú všetky fant y 90 % alebo viac základného obmedzenia: Duke (92 %), Eartha (94 %), Ella (99 %) a Thelonious (103 %). Hran hody sa zlepšujú pri vyšších frekvenciách: pri 15 GHz všetky fantomy klesajú pod 40 % z dného obmedzenia. Vysvetľuje to vzťah medzi vlnovou dĺžkou a priemerovacou plochou pri 7 G 43 mm), lúč zaostrený MRT vytvára hotspot porovnateľný so 4 cm2 priemerovacia plocha maximalizujúca priemerovanú hustotu výkonu. Pri 15 GHz (*λ*=20 mm), menšia veľkosť hotspotu rozprestiera v na menšiu časť priemerovacej oblasti.

*3.4.2 Vrch APD klesá s frekvenciou*Tabuľka 6 uvádza najhorší prípad APD pre každú kombináciu fantómovej frekvencie. Vrcholové APD sa znižuje o 3–4×od 7 GHz do 15 GHz pre všetky fantomy. Thelonious vykazuje najvyššiu hodnotu pri 7 GHz (2,05 W/m2pri 1 W/m2incident). Duke vykazuje najnižšiu (1,84 W/m2). Pomer detí k dospelým je pri 7 G približne 1,1, čo je menej ako pomer 1,5 – 1,9 pre SAR celého tela vo FR1.

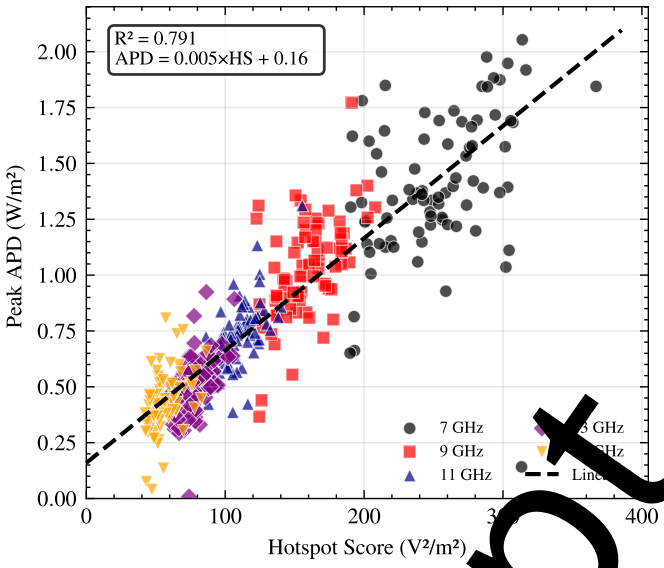
*3.4.3 MRT zameriava vertikálnu zložku poľa*Štvorsmerové tvarovanie lúča MRT generuje konštruk u interferenciu pozdĺž vertikálneho smeru (*z*) os. Vrchol *V*2*v* hotspote je približne 1,8 V/m pri 1 W/m2incident. *Vx*a *Vy*sú 0,8–0,9 V/m. Vertikálna zložka je teda 2×silnejší ako horizo l zložka enty, ako očakávané pre vertikálnu orientáciu antény UE.

Vpredu horúce pmiesto ns dis trebrá cez trup, krk a hlavu. Trup vykazuje najvyššie skóre v oblastiach s najvyššími (~250–315 V2/m2) Bývalýbodmi, tremory (chodidlá, ruky) ukazujú 5×nižšie hodnoty (~40–80 V2/m2). Všetky štyri atom exponát t jeho otec trybár.

*3.4.4 H otspot sco re predi cts APD*Obrázok 10 znázorňuje vzťah medzi skóre hotspotu (rovnica (5)) a 20×4×5 a mňa Supravený AP D pre všetkých= 400 kandidátskych hotspotov. Lineárna regresia prináša

$$\mathrm{APD} = 0.0050 \times H + 0.16 \quad (R^2 = 0.79,\ str. \approx 0) \tag{8}$$

Prijatý rukopis



Obrázok 10: Skóre hotspotu predpovedá skutočný APD (R_2=0.79). Body zafarbené podľa frekvencie: kandidáti na 7 GHz (čierni) sa zhlukujú s vysokým skóre hotspotu a vysokým APD. kandidáti na 15 GHz (oranžoví) sa zhlukujú s nízkymi hodnotami.

kde *H* je skóre hotspotu vo V2/m2 a APD je vo W/m

Frekvenčne závislé zhlukovanie je zrejmé: kandidáti na 7 GHz (čierni) zaberajú oblasť v pravom hornom rohu s vysokým skóre hotspotov (200 – 350 V2/m2) a vysokým APD (1,5 – 2,0 W/m2). Kandidáti s frekvenciou 15 GHz (oranžoví) zaberajú oblasť v ľavom dolnom rohu. Skóre efektívneho hotspotu spoľahlivo predpovedá skutočnú APD, čo potvrdzuje, že dvojstupňový [illegible] úspešne identifikuje kandidátov s najvyššími hodnotami.

3.5 Porovnanie s literatúrou

Štúdie v literatúre uvádzajú najhoršiu konfiguráciu s jednou rovinnou vlnou. Tabuľka 4 uvádza priemer z 12 konfigurácií, ktorý je 1,5 – 1,6-krát nižší. Preto porovnávame s hodnotami pre jednotlivé konfigurácie uvedenými v tabuľke 7.

Bakker*a kol.*(2010) simulujú rovnaké štyri fantómy a rovnakých 12 konfigurácií rovinných vĺn. Uvádzajú 145 % (Thelonious) a 122 % (Eartha) základného obmedzenia, oproti 145 % a 122 % v tejto práci. Štyri najhoršie hodnoty SAR pre celé telo sa líšia maximálne o 2 %.Uusitupa*a kol.* (2010) simulujú tri rovnaké fantómy, hodnota 154 % pre Theloniusa. Tieto tri hodnoty sa líšia maximálne o 12 %.Kühn*a kol.*(2009) hodnotí 6-ročný fantóm nad obmedzením na 100 MHz a nad 1450 MHz. Najhoršia konfigurácia v tejto práci ho najprv prekoná na 1450 MHz. Všetky tieto rozdiely sú v rámci rozšírenej neistoty 12 % (*k*=2).

Dimbylow(2002) simuluje NORMAN, iný fantóm. Jeho hmotnosť je 73 kg, oproti 72,6 kg pre Duke. Zhoda je do 1450 MHz v rozmedzí 4 %. Nad 2450 MHz Duke absorbuje o 14 – 15 % viac. NORMAN je voxelov model s veľkosťou 2,077 mm, menej ako 7 buniek na vlnovú dĺžku vo svale pri 3 GHz. Hrubé voxely nedostatočne rozlišujú povrch tela, kde je absorpcia sústredená pri týchto frekvenciách.

Žiadna hodnota SAR pre celé telo detského fantómu nebola hlásená nad 6 GHz. Pre FR3 a FR2 preto porovnávame s uzavretým modelomKodera*a kol.*(2024). Nad 10 GHz absorpčný prierez rovnice konverguje k $ACS_{svetový\ bank} \approx A_p T_s$ presnosťou do 5 %. Tu A_p je premietaná plocha telesa orientovaná zo smeru dopadu a T_s je Fresnelov koeficient prenosu energie na povrchu kože. Pre Theloniusovo bočné osvetlenie A_p=0.132 m2Model udáva 3,61 mW/kg pri 26 GHz, oproti 3,57 mW/kg v tejto práci. Prebytok oproti modelu monotónne klesá z 20 % pri 7 GHz na 1 % pri 26 GHz, ako sa očakávalo v limite geometrickej optiky. Model vynecháva difrakciu do oblasti tieňa. Tento príspevok sa znižuje s elektricky väčším telesom.

4 Záver

Charakterizovali sme expozíciu RF-EMF od 450 MHz do 26 GHz pomocou 550 FDTD simulácií na štyroch fantómoch, dvoch expozičných scenároch a 15 frekvenciách. Celotelový SAR v prostredí prekračuje základné obmedzenie pre oba detské fantómy v blízkosti 2140 MHz v štyroch z dvanástich rovinných vĺn.

Accepted manuscript

Tabuľka 7: Porovnanie s celotelovou SAR z literatúry:Bakker*a kol.*(2010),Uusitupa*a kol.* (2010), Dimbylow(2002) a model uzavretej formyKodera*a kol.*(2024Všetky hodnoty sú SAR.svetový bank v mW/kg pre konfiguráciu s jednou rovinnou vlnou pri 1 W/m2incident. Pomer je táto práca vydelená hodnotou literatúry.

	Najhorší prípad blízko vrcholu 2 GHz				Vojvoda, vpredu[c]		Thelonious, vedľa[deň]		
	Bakker (2010)[a]		Uusitupa (2010)[b]		Dimbylow (2002)		Kodera (2024)		
Fantóm	Ich	Náš pomer	Ich	Náš pomer	MHz	Ich	Náš pomer	GHz	Ich	Náš pomer
Vojvoda	6,24	6,21 1,00	6,16	5,77 0,94	400 (450)	6,29	6,34 1,01	7	3,29	3,96 1,20
Ella	6,76	6,60 0,98	7,53	6,60 0,88	900 (835)	6,40	6,45 1,01	11	3,34	3,88 1,16
Eartha	9,68	9,76 1,01	–	–	– 1400 (1450)	6,33	6,11 0,96	15	3,40	3,85 1,13
Thelonious	11,60	11,61 1,00	12,32	11,61 0,94	2450	4,75	5,48 1,15	26	3,61	3,57 0,99
					3000 (3500)	3,99	4,55 1,14			

[a]Eartha a Thelonious z ich textu, Duke a Ella z ich obrázku 4 s použitou korigendom.[b]Vzorkované na frekvencii 2100 MHz, pri polarizácii, ktorú hlásia: vertikálna pre Dukea a Theloniusa, horizontálna pre Ellu. Naša hodnota je maximálna v našich smeroch pri rovnakej polarizácii. Ich VF Male, VF Female a VF Boy sú tie isté subjekty ako u Dukea, Elly a Theloniusa. Nezahŕňajú Earthu.[c] NORMAN, 73 kg oproti 72,6 kg pre Duke. Naša frekvencia je uvedená v zátvorkách, kde sa líši.[deň]Uzavretý model ACSsvetový bank≈$A_p T$, sA_p=0.132 m2bočná premietaná plocha Theloniusa aTFresnelov koeficient prenosu energie cez kožu.

konfigurácie. Dospelé fantómy zostávajú pod obmedzením v každej konfigurácii. Pri tvarovaní lúča sú základné obmedzenia prekročené, keď sú dosiahnuté referenčné úrovne pri 3500 MHz (psSAR10 g: 131 – 158 % limitu hlavy/trup pre všetky štyri fantómy) a pri 7 GHz (APD: 103 % pre 6-ročné dieťa). Pri 700 MHz tvarovanie lúča zdvojnásobuje psSAR.10 gpričom všetky fantómy zostávajú v rámci limitov. SARsvetový bank zostáva nezmenený. Koherentné zaostrovanie prerozdeľuje absorpciu priestorovo bez zvýšenia celkového absorbovaného výkonu. Pri 15 GHz sa rozpätia zhody rozširujú na 25 – 40 % základného obmedzenia. Tieto výsledky naznačujú, že referenčné úrovne ICNIRP pri 3500 MHz a 7 GHz nezaručujú súlad so základnými obmedzeniami, keď tvarovanie lúča koncentruje energiu na telo. Referenčné úrovne boli odvodené z rovnomernej expozície rovinnej vlny pri pevnej hustote dopadajúceho výkonu a nezohľadňujú tento scenár. Zložky s rovnakým výkonom sa v bode zaostrenia kombinujú vo fáze, takže lokálna absorpcia sa koncentruje, zatiaľ čo hustota dopadajúceho výkonu zostáva na referenčnej úrovni. Pri 3500 MHz objemová 10 g psSAR10 g v trupe prekračuje limit a pri 7 GHz 4 cm2Povrchové APD ju prekračuje. Nameraná expozícia v nasadených 5G sieťach zostáva o tri až štyri rády pod touto referenčnou úrovňou (Veludo*a kol.*2025), takže realistická expozícia zostáva hlboko pod základnými obmedzeniami.

Deti vykazujú 1,5 – 1,9-krát vyššiu hodnotu SAR pre celé telo ako dospelí pri všetkých frekvenciách pod 6 GHz. Tento rozdiel vysvetľuje ich vyšší pomer absorpčného prierezu k telesnej hmotnosti (rovnica (7)). Pri frekvencii 2 140 MHz dosahuje Thelonious 93 % limitu 80 mW/kg spriemerovaného pre 12 konfigurácií a 145 % v najhoršej konfigurácii. Toto je najtesnejšia hranica FR1. Hodnota SAR pre celé telo určuje hranice zhody s FR1. psSAR10 gdosahuje iba 7 % svojho limitu, keď hodnota SAR pre celé telo dosiahne 93 %, a zostáva pod platným obmedzením v každej konfigurácii prostredia. Najhorší prípad hodnoty SAR pre celé telo sa zhoduje s literatúrou s toleranciou 2 % pre tie isté štyri fantómy a s modelom uzavretého absorpčného prierezu s toleranciou 1 % pri 2 GHz.

Hĺbka prieniku určuje tkanivovo špecifickú absorpciu. Nižšie frekvencie vedú k vyššej absorpcii v hlbokých tkanivách. SAR mozgu sa znižuje o 96 % zo 450 MHz na 5,8 GHz. SAR pokožky sa zvyšuje 3,2-násobne, keď hĺbky z 60 mm až ~10 mm. SAR pokožky a mozgu negatívne koreluje (r=−0.45, p <0.001), pretože povrchová absorpcia chráni hlboké tkanivá, ako je mozog.

Štyri fantómy obmedzujú hodnotenie interindividuálnej variability. Viac detských modelov (vo veku 1 – 17 rokov) by posilnilo porovnania detí a dospelých. Analýza s frekvenciou 26 GHz zahŕňa iba Thelonious z jedného smeru kvôli výpočtovým obmedzeniam. Automaticky indukované simulácie používajú zjednodušené tvarovanie lúča MRT zo štyroch smerov, nie štatistiky kanálov špecifické pre dané prostredie. Skutočná expozícia závisí od podmienok šírenia, polarizantén a bohatosti rozptylu. Všetky fantómy boli simulované v stojacej konfigurácii. Sediaca a ležajúca poloha sa môžu líšiť v úrovniach absorpcie.

Údaje o SAR špecifické pre orgány v prípade mozgu, očí, pokožky a genitálií podporujú epidemiologické posúdenie expozície naprieč 15 frekvenciami. Pásmo 7,125 – 8,4 GHz je na programe WRC-27. Posúdenie súladu v tomto pásme by malo zahŕňať detské fantómy.

Niekoľko rozšírení si zaslúži preskúmanie. Zmeny polohy tela (sed, na bruchu, v pohybe) by mohli kvantifikovať, ako sa absorpcia líši od tu použitej konfigurácie v stoji. Spojenie tohto rámca s realistickými kanálmi šírenia (Šichantsov*a kol.*2020,Wydaeghe*a kol.*2022,2026) by kvantifikovalo, ako sa expozícia škáluje s viaccestnými komponentmi a anténnymi prvkami v rôznych prostrediach. To by rozšírilo výsledky nad rámec zjednodušeného scenára s rovnakým ziskom, ktorý sa tu používa. Úplná charakterizácia FR2 (24 – 52,6 GHz) a ďalej vo všetkých fantomových pásmach by dokončila pokrytie spektra 5G a 6G-

Účet Manuscript

Keďže simulácie FDTD celého tela sa stávajú neuskutočniteľnými, mali by sa použiť iné techniky, ako napríklad tie založené na absorpčnom priereze.Kodera*a kol.*(2024). Porovnanie s meraniami nárastu teploty alebo*in vivo*Údaje o expozícii by potvrdili výpočtové predpovede a posilnili prepojenie medzi dozimetrickými množstvami a biologickými následkami.

Financovanie
Projekt GOLIAT získal finančné prostriedky z výskumného a inovačného programu Európskej únie Horizont Európa na základe grantovej dohody č. 101057262. Vyjadrené názory a stanoviská sú však výhradne názormi autorov a nemusia nevyhnutne odrážať názory Európskej únie alebo Európskej výkonnej agentúry pre zdravie a digitálne technológie. Ani Európska únia, ani orgán udeľujúci grant za ne nenesú zodpovednosť.

Príspevky autorov
R. Wydaeghe: Konceptualizácia, metodológia, softvér, validácia, formálna analýza, skúmanie, kurátorstvo dát, písanie – pôvodný návrh, vizualizácia. B. Stroobandt: písanie – kontrola a úprava. G. Vermeeren: písanie – kontrola a úprava. E. Tanghe: písanie – kontrola a úprava. W. Joseph: konceptualizácia, supervízia, administrácia projektu, získavanie finančných prostriedkov, písanie – kontrola a úprava. S. Gallucci, M. Parazzini, G. Tognola, J. Wiart, L. Guxens: Konceptualizácia, písanie – kontrola a úprava, získavanie finančných prostriedkov.

Dostupnosť údajov
Kód na vytvorenie všetkých výsledkov je k dispozícii na GitHub na adresehttps://github.com/rwydaegh/goliatKonfiguračné súbory simulácie FDTD a následne spracované súbory údajov SAR/APD, ktoré podporujú túto štúdiu, sú verejne dostupné na Harvard Dataverse na adresehttps://doi.org/10.7910/DVN/EEEE0XVirtuálne populačné fantomy sú dostupné od IT'IS Foundation na základe licencie. Softvér na získanie výsledkov je uvedený v doplnkových informáciách a vyžaduje licencie na softvér Sim4Life od spoločnosti Zurich MedTech AG.

Doplňujúce údaje
Doplnkové informácie obsahujú dátové, konfiguračné a protokolovacie súbory, ako aj 614 obrázkov zobrazujúcich hodnoty SAR pre jednotlivé tkanivá pre každú frekvenciu a smer, krivky frekvenčnej odozvy pre jednotlivé orgány, mapy priestorových hotspotov a porovnania krížených fantómov.

Konflikt záujmov
Autori vyhlasujú, že nemajú žiadny konflikt záujmov.

Referencie
Bakker JF, Paulides MM, Christ A, Kuster N a van Rhoon GC 2010 Posúdenie indukovaných SAR u detí vystavených elektromagnetickým rovinným vlnám medzi 10 MHz a 5,6 GHz*Fyzika. Lekárska biológia.*55 5415–30

Birks LE, van Wel L, Lorni I, Pierotti L, Guxens M, Huss A, Foerster M, Capstick M, Eeftens M, El Marroun H, Estarlich M, Gallastegi M, González Safont L, Joseph W, Santa-Marina L, Thielens A, Torrent M, Vrijkotte T, Wijga I, Röösli M, Cardis E, Vermeulen R a Vrijheid M 2021 Rádiofrekvenčné elektromagnetické polia u detí a dospievajúcich v modelových oblastiach mozgu v mobilnej komunikácii: popis európskych modelových elektromagnetických polí v mobilnej komunikácii*Environmentálny výskum.*193110505

Bamba A, Gaillot DP, Tanghe E, Vermeeren G, Joseph W, Lienard M a Martens L 2015 Hodnotenie Prierez absorpcie celého tela pre difúznu expozíciu z meraní v dozvukovej komore*IEEE Trans. Electromag. Kompatibilita.*5727 – 34

Björnson E, Hoydis J a Sanguinetti L 2017 Masívne MIMO siete: Spektrálne, energetické a hardvérové hardvéru*Nájdené. Proces signálov trendov.*11154 – 655

Courant R, Friedrichs K a Lewy H 1928 Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematickej stredná fyzika*Matematika. Ann.*10032 – 74

Dimbylow PJ 2002 Výpočty SAR v ľudskom tele s presným rozlíšením pre frekvencie až 3 GHz*Fyzika. Lekárska biológia.*472835 – 46

Konzorcium GOLIAT 2022 Expozícia 5G, kauzálne účinky a vnímanie rizika prostredníctvom občianskej angažovanosti Projekt Horizont Európa č. 101057262 (k dispozícii na:https://projectgoliat.eu/)

Accepted Manuscript

Gosselin MC, Neufeld E, Moser H, Huber E, Farcito S, Gerber L, Jedensjö M, Hilber I, Di Gennaro F, Lloyd B, Cherubini E, Szczerba D, Kainz W a Kuster N 2014 Vývoj novej generácie anatomických modelov s vysokým rozlíšením pre hodnotenie zdravotníckych pomôcok: Virtuálna populácia 3.0 *Fyzika. Lekárska biológia.*595287 – 303

GSMA 2024 WRC-23 a WRC-27 – Mobilné spektrum (dostupné na:https://www.gsma.com/konektivita-pre-dobré/spektrum/séria-wrc/)

Hand JW 2008 Modelovanie interakcie elektromagnetických polí (10 MHz – 10 GHz) s človekom telo: metódy a aplikácie*Fyzika. Lekárska biológia.*53R243–86

Herssens H a Thielens A 2025 Automaticky indukované downlinkové rádiofrekvenčné elektromagnetické pole, expozícia isto pri 3,5 GHz so zaostrením v blízkosti hlavy*Prístup k IEEE*1356659–70

Hirata A.*a kol.*2021a Posúdenie vystavenia ľudí elektromagnetickým poliam: Prehľad a budúcnosť pokyny*IEEE Trans. Elektromag. Kompatibilita.*631619 – 1630

Hirata A, Kodera S, Sasaki K, Gomez-Tames J, Laakso I, Wood A, Watanabe S a Foster KR 2021b Vystavenie ľudí rádiofrekvenčnej energii nad 6 GHz: prehľadová štúdia výpočtovej dozimetrie *Fyzika. Lekárska biológia.*6608TR01

Pokyny ICNIRP z roku 2020 pre obmedzenie vystavenia elektromagnetickým poliam (100 kHz až 300 GHz)*Zdravie Fyzika.*118483 – 524

IEC/IEEE 2017 62704-1:2017 Stanovenie maximálnej priestorovo priemernej špecifickej miery absorpcie (SAR) v ľudskom tele z bezdrôtových komunikačných zariadení, 30 MHz – 6 GHz – Časť 1: Všeobecné požiadavky na používanie metódy konečných rozdielov v časovej doméne (FDTD)

IEC/IEEE 2022 63195-2:2022 (IEC/IEEE 63195-4) Posudzovanie hustoty výkonu pri vystavení ľudí žiareniu rádiofrekvenčným poliam z bezdrôtových zariadení v tesnej blízkosti hlavy a tela (frekvenčný rozsah od 6 GHz do 300 GHz) – Časť 2: [illegible] Postup (dostupné na:https://doi.org/ 10.1109/ieeestd.2022.9770556)

Databáza vlastností tkanív IT'IS Foundation 2024 V5.0 (dostupná na adrese:https://itis.swiss/virtuálna-populácia/vlastnosti-tkanív/databáza/)

Kodera S, Taguchi K, Diao Y, Kashiwa T a Hirata A 2024 Výpočet priemeru celého tela SAR v realistických ľudských modeloch od 1 do 100 GHz*IEEE Trans. Mikrovlnná teória. Technológia.*7291 – 100

Kühn S, Jennings W, Christ A a Kuster N 2009 Hodnotenie indukovaného rádiofrekvenčného elektromagnetické polia v rôznych anatomických modeloch ľudského tela*Fyzika. Lekárska biológia.*54875 – 90

Liorni I, Capstick M, van Wel L, Wiart J, Joseph W, Cardis E, Guxens M, Vermeulen R a Thielens Hodnotenie špecifickej miery absorpcie v oblastiach vzdialeného poľa, blízkeho poľa a blízkeho poľa z roku 2020 pre integratívne hodnotenie expozície rádiofrekvenčnému žiareniu*Radiačná. Ochrana. Dozimetria*190459 – 72

Lojić Kapetanović A a Poljak D 2022 Posúdenie hustoty dopadajúceho výkonu na guľovú hlavicu model do 100 GHz*IEEE Trans. Elektromag. Kompatibilita.*641296 – 303

Lojić Kapetanović A, Sacco G, Poljak D a Zhadobov M 2023 Spriemerované prenesené a hustota absorbovaného výkonu na realistickom modeli ucha*IEEE J. Electromagn. RF Microw. Med. Biol.*7 39 – 45

Marzetta TL, Larsson EG, Yang H a Ngo HQ 2016*Základy masívneho MIMO*(Cambridge: Vydavateľstvo Cambridgeskej univerzity)

Nakae T, Funahashi D, Higashiyama J, Onishi T a Hirata A 2020 Zvýšenie teploty kože pre hustoty dopadajúceho výkonu z dipólových polí pri 28 GHz*Prístup k IEEE*826863–71

Ďalšia biela kniha o terminológii frekvenčných rozsahov organizácie G Alliance 2023 (k dispozícii na adrese:https://nextgalliance.org/white_papers/terminology-for-frequency-ranges/)

Peyman A, Gabriel C, Grant EH, Vermeeren G a Martens L 2009 Variácia dielektrika Vlastnosti tkanív s vekom: Vplyv na hodnoty SAR u detí pri vystavení vysielačkám*Fyzika. Lekárska biológia.*54227 – 41

Akceptovaný MS

Rappaport TS, Xing Y, Kanhere O, Ju S, Madanayake A, Mandal S, Alkhateeb A a Trichopoulos GC 2019 Bezdrôtová komunikácia a aplikácie nad 100 GHz: Príležitosti a výzvy pre 6G a ďalej *Prístup k IEEE*778729–57

Shikhantsov S, Thielens A, Vermeeren G, Demeester P, Martens L, Torfs G a Joseph W 2020 Modelovanie masívneho šírenia MIMO s užívateľom indukovanými väzbovými efektmi pomocou sledovania lúčov a FDTD *IEEE J. Selection Areas Commun.*381955 – 1963

Katwe MV, Kaushik A, Singh K, Di Renzo M, Sun S, Lee D, Armada AG, Eldar YC, Dobre OA a Rappaport TS 2024 CmWave a Sub-THz: Kľúčové rádiové faktory a doplnkové spektrum pre 6G*Bezdrôtová komunikácia IEEE*32182 – 90

Taflove A a Hagness SC 2005*Výpočtová elektrodynamika: Časovo obmedzená metóda konečných rozdielov Metóda domény*3. vydanie (Boston, MA: Artech House)

Uusitupa T, Laakso I, Ilvonen S a Nikoskinen K 2010 štúdia variácie SAR od 300 do 5000 MHz pre 15 voxelových modelov vrátane rôznych polôh*Fyzika. Lekárska biológia.*551157 – 1176

18 rokov

van Wel L, Liorni I, Huss A, Thielens A, Wiart J, Joseph W, Röösli M, Foerster M, Massardier-Pilonchery A, Capstick M, Cardis E a Vermeulen R 2021 Expozícia rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu a príspevok zdrojov v bežnej populácii: integratívne hodnotenie expozície špecifické pre jednotlivé orgány*J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*31999 – 1007

Velghe M, Aerts S, Martens L, Joseph W a Thielens A, Protokol pre osobné RF-EMF z roku 2021 štúdie merania expozície v telekomunikačných sieťach 5. generácie*Životné prostredie. Zdravie*20 36

Veludo AF, Stroobandt B, Van Bladel H, Sandoval-Diez N, Deprez K, Aerts S, Ben Chikha W, Wiart J, Vecsei Z, Necz PP, Thuróczy G, Benini M, Bonato M, Gallucci S, Tognola G, Parazzini M, Beláčková L, Vaupotič N, Mamrot P, Marianska M, Politanski P, Polanska K, Stamets M, de Llobet P, Castaño-Vinyals, FPM, Hull de Guxochenst, G. Guxochens Röösli M 2025 Hodnotenie vystavenia rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu vo viacerých mikroprostrediach v desiatich európskych krajinách so zameraním na 5G*Medzinárodné životné prostredie*2001[illegible]540

Vermeeren G, Joseph W a Martens L 2008a Celotelový SAR u dospelých a detí so sféroidným povrchom fantómy v realistickom expozičnom prostredí *Elektrónová. Lett.*44790–1

Vermeeren G, Joseph W, Olivier C a Martens L 2008b Štatistická viaccestná expozícia človeka v realistickom elektromagnetickom prostredí *Životná fyzika.*94345 – 54

Wydaeghe R, Shikhantsov S, Tanghe E, Vermeeren G, Martens L, Demeester P a Joseph W 2022 Realistická expozícia človeka pri frekvenciách 3,5 GHz a 28 GHz pre distribuované a kolokované MaMIMO vo vnútorných prostrediach s použitím hybridného sledovania lúčov a FDTD*Prístup k IEEE*10130996 – 131004

Wydaeghe R, Shikhantsov S, Tanghe E, Vermeeren G, Martens L a Joseph W 2026 Hybrid ray-Metóda sledovania QuaDRiGa/FDTD pre realistické hodnotenie expozície ľudí pri 28 GHz s 6G CF-MaMIMO v 3D vonkajšom prostredí*npj Bezdrôtová komunikácia.*prijaté

Yee KS 1966 Numerické riešenie počiatočných okrajových úloh zahŕňajúcich Maxwellove rovnice v izotropných médiách*IEEE Trans. Antény Šírenie*14302–7

ZMT Zurich MedTech AG 2024 Sim4Life: Platforma pre výpočtové biologické vedy (dostupná na: https://sim4life.swiss/)

Prijal skript