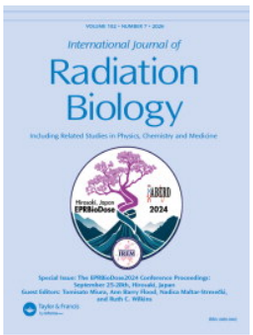
Translated from English to Slovak - www.onlinedoctranslator.com



Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Medzinárodný časopis radiačnej biológie

ISSN: 0955-3002 (Tlačená verzia) 1362-3095 (Online verzia) Domovská stránka časopisu:www.tandfonline.com/journals/irab20

Účinky vystavenia rádiofrekvencii 26 GHz na elektrodermálnu aktivitu u zdravých mladých dospelých

Lisa Michelant, Laurent Hugueville, Philippe Leveque a Brahim Selmaoui

Citácia z tohto článku: Lisa Michelant, Laurent Hugueville, Philippe Leveque a Brahim Selmaoui (3. júna 2026): Účinky vystavenia rádiofrekvenčnému žiareniu s frekvenciou 26 GHz na elektrodermálnu aktivitu u zdravých mladých dospelých, International Journal of Radiation Biology, DOI:10.1080/09553002.2026.2678295

Ak chcete prepojiť tento článok:https://doi.org/10.1080/09553002.2026.2678295

© 2026 Autor(i). Vydané s licenciou spoločnosťou Taylor & Francis Group, LLC.

Publikované online: 03. júna 2026.

Odošlite svoj článok do tohto časopisu

Zobrazenia článku: 251

Zobraziť súvisiace články

Zobraziť údaje Crossmarku

Úplné znenie podmienok prístupu a používania nájdete na adrese
https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=irab20

Medzinárodný časopis radiačnej biológie https://doi.org/10.1080/09553002.2026.2678295

Taylor & Francis by informa

PÔVODNÝ ČLÁNOK

OPEN ACCESS Check for updates

Účinky vystavenia rádiofrekvencii 26 GHz na elektrodermálnu aktivitu u zdravých mladých dospelých

Lisa Michelant[a, b], Laurent Hugueville[c], Philippe Leveque[deň], a Brahim Selmaoui[a, b]

[a]oddelenie experimentálnej toxikológie a modelovania (team), národný inštitút pre priemyselné prostredie a riziká (InerIS), Parc technologique alata, Verneuil-en-Halatte, Francúzsko; [b]Laboratórium Péritox (uMr_I 01), InerIS/uPJV, InerIS, Verneuil en Halatte, Francúzsko; [c]Paris Brain Institute (ICM), Centrum pre výskum neuroZobrazenia (CenIr), Univerzita Sorbonna, InSerM u1127, CnrS uMr7225, Nemocnica Pitié-Salpêtrière, Paríž, Francúzsko; [deň]Univerzita v Limoges, CnrS, XLIM, UMR 7252, Limoges, Francúzsko

ABSTRAKT

Účel: Zavedenie technológie milimetrových vĺn s frekvenciou 26 GHz predstavuje ďalšiu fázu implementácie 5G, no potenciálne vplyvy na funkciu autonómneho nervového systému zostávajú nepreskúmané. Táto štúdia skúmala, či vystavenie žiareniu s frekvenciou 26 GHz na úrovni prostredia ovplyvňuje elektrodermálnu aktivitu (EDA), citlivý marker aktivácie sympatického nervového systému.

Materiály a metódy: Dvadsaťdva zdravých mladých dospelých sa zúčastnilo randomizovanej, vyváženej, trojito zaslepenej štúdie skúmajúcej reakcie EDA na kontrolovanú expozíciu 26 GHz. Účastníci absolvovali dve sedenia (skutočná a simulovaná expozícia) s intenzitami elektrického poľa 2 V/m na úrovni hlavy a 1 V/m na úrovni trupu, čo predstavuje horné rozsahy expozície prostredia. Parametre EDA boli merané počas fázy pred expozíciou, expozície (25,5 min) a po expozícii pomocou zavedenej analýzy kontinuálnej dekompozície. Tonické zložky (základná sympatická aktivácia) aj fázové reakcie (reakcie vyvolané stimulom) boli hodnotené podľa štandardizovaných protokolov sluchovej stimulácie.

Výsledky: V rámci všetkých meraných parametrov EDA sa nepozorovali žiadne štatisticky významné účinky expozície 26 GHz. Tónová aktivita, fázové odpovede, latencia odpovede, miery amplitúdy a globálna vodivosť kože zostali počas a po expozícii RF nezmenené v porovnaní so simulovanými podmienkami vo všetkých experimentálnych fázach.

Závery: Expozícia na frekvencii 26 GHz na úrovni prostredia nespôsobuje detekovateľné akútne účinky na aktivitu sympatického nervového systému merané prostredníctvom elektrodermálnych reakcií. Tieto zistenia sú v kontraste s hlásenými účinkami pri nižších frekvenciách 5 G, čo naznačuje frekvenčne špecifické biologické interakcie. Obmedzená penetrácia milimetrových vĺn do tkaniva pravdepodobne bráni elektromagnetickej energii dosiahnuť sympaticky inervované štruktúry. Výsledky podporujú súčasné smernice, ale zdôrazňujú potrebu doplnkového štúdia.

ZHRNUTIE KĽÚČOVÝCH BODOV

- Žiadne významné účinky 26 GHz na elektrodermálnu aktivitu u zdravých mladých dospelých
- Úrovne expozície prostredia (2 V/m hlava, 1 V/m trup) počas 26 minút 30 minút
- Výsledky sa líšia od nižších frekvencií 5G, čo naznačuje frekvenčne špecifické účinky
- Obmedzená penetrácia tkaniva môže vysvetľovať absenciu autonómnych reakcií
- Zistenia podporujú súčasné regulačné rámce pre vystavenie milimetrovým vlnám

HISTÓRIA ČLÁNKU
prijaté 28. januára 2026,
revidované 9. apríla 2026
prijaté 7. mája 2026

KĽÚČOVÉ SLOVÁ
5 g; milimetrové vlny; galvanický kožný reflex; elektrodermálna aktivita; autonómny nervový systém; expozícia človeka

1. Úvod

Po rozsiahlom prijatí stredných frekvencií v blízkosti 3,5 GHz od roku 2019 sa telekomunikačný priemysel posúva smerom k implementácii milimetrových vĺn, najmä na frekvencii 26 GHz, čo sľubuje umožnenie ultravysokej kapacity. aplikácie v husto osídlených mestských oblastiach (teplota a nadmorská výška ICNIRP) zostávajú menej jasne pochopené. 2020). Tieto rozsahy vyšších frekvencií vykazujú odlišné charakteristiky šírenia, vrátane zníženej hĺbky prenikania do tkaniva, zmenených profilov elektromagnetickej interakcie, čo si vyžaduje špecializovaný biologický výskum.

Výskum zdravotných dôsledkov vystavenia RF poliam skúmal rôzne generácie bezdrôtovej komunikácie, pričom tradične rozlišoval medzi tepelnou a netermálne biologické mechanizmy. Tepelné účinky, ktoré zahŕňajú merateľné zvýšenie teploty tkaniva v dôsledku absorpcie elektromagnetickej energie, sú dobre známe a regulované medzinárodnými smernicami o expozícii (ICNIRP 1998,2020). Naproti tomu potenciálne netepelné účinky, ktoré sa vyskytujú pri úrovniach expozície nižších ako tie, ktoré vyvolávajú teplotu-

Vedecká pozornosť sa čoraz viac zameriava na možné vplyvy na reguláciu autonómneho nervového systému (ANS) vzhľadom na jeho ústrednú úlohu vo fyziologickej homeostáze a citlivosti na jemné environmentálne stresory (Tansey a Johnson2015).

Elektrodermálna aktivita (EDA) je dobre zavedený, neinvazívny indikátor aktivity sympatického nervového systému,

KONTAKT Brahim Selmaoui brahim.selmaoui@ineris.fr InerIS, Parc technologique alata BP 2, 60550, Verneuil-en-Halatte, Francúzsko

© 2026 autor(i). Vydané s licenciou spoločnosťou Taylor & Francis Group, llc.
Toto je článok s otvoreným prístupom distribuovaný podľa podmienok licencie Creative Commons s uvedením zdroja-nekomerčné-bezodvodňovacích materiálov (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/), ktorý povoľuje nekomerčné opätovné použitie, distribúciu a reprodukciu v akomkoľvek médiu za predpokladu, že pôvodné dielo je riadne citované a nie je nijako zmenené, transformované ani nadviazané naň. Podmienky, za ktorých bol tento článok publikovaný, umožňujú uverejnenie prijatého rukopisu v repozitári autorom (autormi) alebo s ich súhlasom.

meranie zmien vo vodivosti kože, ktorá je primárne regulovaná sympatickým nervovým systémom prostredníctvom hypotalamických dráh (Boucsein2012 Dawson a kol.2016). Signál EDA obsahuje tonické zložky, ktoré naznačujú konštantnú úroveň sympatickej aktivácie, a fázové zložky odrážajúce prechodné sympatické reakcie na environmentálne podnety. Špecifický vzťah medzi meraniami EDA a sympatickou aktivitou, neovplyvnenou parasympatickým systémom, robí tento parameter obzvlášť užitočným na posúdenie potenciálnych autonómnych zmien vyvolaných rádiofrekvenciami.

Výskumy skúmajúce vplyv rádiofrekvenčných signálov na autonómne parametre v predchádzajúcich generáciách bezdrôtových zariadení priniesli zmiešané výsledky, pričom niektoré štúdie dokumentujú merateľné fyziologické zmeny po vystavení signálu (Bortkiewicz a kol.2012Loughran a kol.2019 Džamal a kol. 2024), zatiaľ čo iný výskum naznačuje absenciu detekovateľných účinkov (Wilén a kol.2006Eltiti a kol.2009 Selmaoui a kol.2018). Niekoľko výskumov dokumentovalo významné zmeny vodivosti kože po protokoloch expozície mobilným telefónom (Esen a Esen2006), zatiaľ čo iný výskum nezistil žiadne zistiteľné zmeny (Andrianome a kol.2017 Selmaoui a kol.2018). Tieto nezrovnalosti pravdepodobne odrážajú metodologické rozdiely vrátane variácií v expozičných paradigmách, charakteristikách signálu, výbere frekvencie a faktoroch špecifických pre účastníka. Nedávna štúdia protokolov expozície frekvenciou 3,5 GHz odhalila mierne, ale štatisticky významné zmeny v parametroch elektrodermálnej aktivity (EDA) vrátane zmien celkovej vodivosti kože, základných úrovní aktivity a času odozvy (Jamal a kol.2024), čo naznačuje potenciálny vplyv frekvencie 5 G na reguláciu autonómneho nervového systému.

Neboli identifikované žiadne štúdie, ktoré by merali EDA v reakcii na vystavenie milimetrovým vlnám vo frekvenčnom pásme 26 GHz. Dostupné štúdie o EDA sú obmedzené na výskum vykonaný na ľuďoch pri frekvenciách pod 6 GHz a nepreukázali žiadny konsenzus (Wilén a kol.2006Eltiti a kol.2009Bortkiewicz a kol.2012Selmaoui a kol.2018 Loughran a kol.2019Džamal a kol.2024Hoci existuje literatúra skúmajúca vplyvy nízkofrekvenčných rádiofrekvenčných signálov na funkciu ANS, charakteristické vlastnosti signálov 26 GHz vrátane ich obmedzeného prenikania do tkanív a jedinečných mechanizmov biologickej interakcie si vyžadujú cielené skúmanie. Súčasná absencia publikovaného výskumu skúmajúceho reakcie EDA na vystavenie 26 GHz predstavuje kritickú medzeru vo vedomostiach, ktorá si vyžaduje pozornosť, aby sa zabezpečilo komplexné pochopenie potenciálnych zdravotných dôsledkov spojených s nasadením infraštruktúry 5G.

Preto sa tento výskum snaží preskúmať potenciálne účinky vystavenia sa rádiofrekvenčnému žiareniu v pásme 26 GHz na elektrodermálnu aktivitu u zdravých dospelých účastníkov. Prostredníctvom implementácie randomizovaného, kontrolovaného a pre účastníkov zaslepeného experimentálneho protokolu sme vyhodnotili zložky EDA vyvolané predĺženým aj stimulom pred, počas a po kontrolovanom vystavení sa signálom v pásme 26 GHz pri environmentálnych intenzitách. Tento výskum sa zaoberá existujúcim nedostatkom vedomostí o interakciách milimetrových vĺn s autonómnym nervovým systémom a prispieva k nevyhnutným dôkazom pre komplexné hodnotenie zdravotných rizík vznikajúcich 5G technológií.

2. Metódy

2.1. Etické schválenie

Protokol štúdie bol schválený francúzskou národnou etickou komisiou „CPP Sud-Ouest et Outre-Mer 1“ (ID-RCB č. 2020-A03127-32) a bol v súlade so zásadami Helsinskej deklarácie. Pred experimentálnymi postupmi bol od všetkých účastníkov získaný písomný informovaný súhlas.

2.2 Účastníci

Tridsaťdva zdravých dospelých (18 mužov, 14 žien; priemerný vek 26,1 ± 5,2 roka; BMI 23,2 ± 4,5) bolo zaradených podľa prísnych výberových kritérií. Podmienky zaradenia zahŕňali dobrý všeobecný zdravotný stav, pravidelný spánkový režim, absenciu chronických/akútnych ochorení alebo postihnutí, nefajčenie a žiadne príznaky elektromagnetickej precitlivenosti. Kritériá vylúčenia zahŕňali tehotenstvo (overené testom NADAL hCG v moče) a užívanie návykových látok (potvrdené skríningom NarcoCheck).

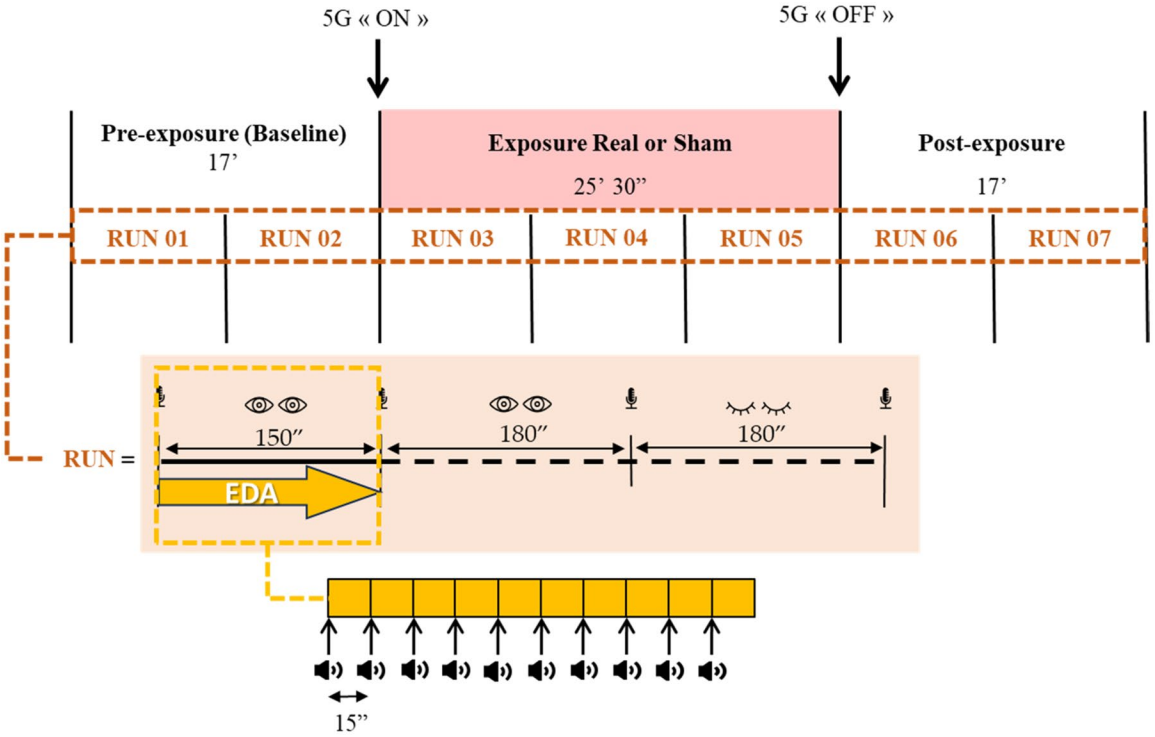
Aby sa minimalizovali fyziologické skreslenia, účastníci sa 24 hodín pred zasadnutím zdržali látok ovplyvňujúcich fyziologický stav (kofeín, alkohol, čokoláda), sedem dní pred zasadnutím sa vyhýbali alkoholu a liekom a pred každou návštevou si udržiavali dostatočný spánok.

Jeden účastník bol vylúčený kvôli technickým problémom počas expozície. Okrem toho bolo deväť účastníkov (5 mužov, 4 ženy) vylúčených z analýz EDA kvôli nereagovaniu, definovanému ako absencia detekovateľných reakcií vodivosti kože na sluchovú stimuláciu vo všetkých experimentálnych cykloch. Tento vzorec nereagovania, zdokumentovaný u približne 5 – 10 % bežnej populácie v elektrodermálnom výskume (Boucsein2012), odráža individuálne variácie sudomotorickej aktivity, ktoré nesúvisia s experimentálnymi podmienkami. Konečná analyzovaná vzorka pozostávala z 22 účastníkov (12 mužov, 10 žien).

2.3. Protokol

Táto štúdia bola vykonaná s použitím randomizovaného a vyváženého dizajnu, založeného na metodike predtým validovanej v našom laboratóriu (Jamal a kol.2024). Účastníci splnili dve experimentálne podmienky: „skutočné“ a „simulované“ expozičné sedenia vykonané v zaslepenom, randomizovanom a vyváženom poradí. Obe sedenia boli naplánované počas štandardizovaných časových období (ráno: 9:00 – 11:00 ± 30 min; popoludní: 14:00 – 16:00 ± 30 min), aby sa minimalizovali vplyvy cirkadiánneho rytmu, s maximálnym intervalom jedného týždňa medzi sedeniami. Štúdia implementovala trojito zaslepený dizajn: účastníci si neboli vedomí expozičných podmienok, experimentátori nedokázali počas sedení rozlíšiť skutočnú od simulovanej expozície a analytici údajov boli zaslepení, pokiaľ ide o rozdelenie do skupín, až do konečnej štatistickej analýzy.

Samotný experimentálny protokol trval približne 60 minút a v rámci každej relácie pozostával z troch odlišných období zberu údajov. Protokol sa začal 17-minútovou základnou (predexpozičnou) fázou na stanovenie základných hodnôt fyziologických parametrov, po ktorej nasledovala buď skutočná, alebo simulovaná frekvencia 26 GHz.



Obrázok 1.návrh experimentálneho protokolu.
Schematické znázornenie experimentálneho protokolu zobrazujúce časovú organizáciu zberu údajov počas siedmich cyklov. Každá relácia pozostávala z troch fáz: základná línia pred expozíciou (17 min, cyklov 1-2), expozičná perióda (25 min 30 sekúnd, cyklov 3-5) a postexpozičná fáza (17 min, cyklov 6-7). Každá relácia trvala 8 minút 30 sekúnd a začínala 150 sekundami zaznamenávania elektrodermálnej aktivity (EDA) počas sluchovej stimulácie (10 po sebe idúcich tónových impulzov 1000 Hz v 15-sekundových intervaloch), po ktorých nasledovalo 180 sekúnd s otvorenými a 180 sekúnd so zatvorenými očami. Expozičná fáza zahŕňala buď skutočnú rádiofrekvenčnú emisiu 26 GHz („skutočná“), alebo žiadnu emisiu („simulovaná“) v randomizovanom, vyváženom dizajne. Analýza EDA sa zamerala na reakcie vodivosti kože súvisiace s udalosťami na prvé dva sluchové stimuly každej relácie, aby sa minimalizovali účinky návyku.

expozícia trvajúca 25 minút a 30 sekúnd a ukončená 17-minútovou fázou záznamu po expozícii bez RF emisie (Obrázok 1).

Každé experimentálne obdobie bolo rozdelené do viacerých behov s trvaním 8 minút a 30 sekúnd. Každý cyklus sa začal 150-sekundovou periódou akvizície EDA s opakovanou sluchovou stimuláciou, zatiaľ čo účastníci udržiavali oči otvorené. Počas tohto obdobia bolo prezentovaných desať po sebe idúcich sluchových impulzov, každý pozostávajúci z tónových impulzov s frekvenciou 1000 Hz s intenzitou 60 dB s trvaním 0,3 sekundy. Stimuly boli oddelené 15-sekundovými interstimulačnými intervalmi počas 150-sekundovej stimulačnej periódy v rámci každého cyklu.

Nasledovali postupné 3-minútové epochy s otvorenými a 3-minútovými epochami so zatvorenými očami. Následne boli zaznamenané elektroencefalografické a elektrokardiografické signály, ale v tomto článku nebudú diskutované (Michelant a kol.2025,2026).

Všetky experimentálne postupy prebiehali v elektricky tienenej, slabo osvetlenej komore, kde účastníci sedeli v uvoľnenej polohe. Účastníci dostali pokyny, aby počas doby zberu údajov obmedzili pohyb, aby sa zabezpečila kvalita signálu. Teplota a vlhkosť okolia boli nepretržite monitorované a kontrolované a
medzi experimentálnymi sedeniami neboli pozorované žiadne významné rozdiely.

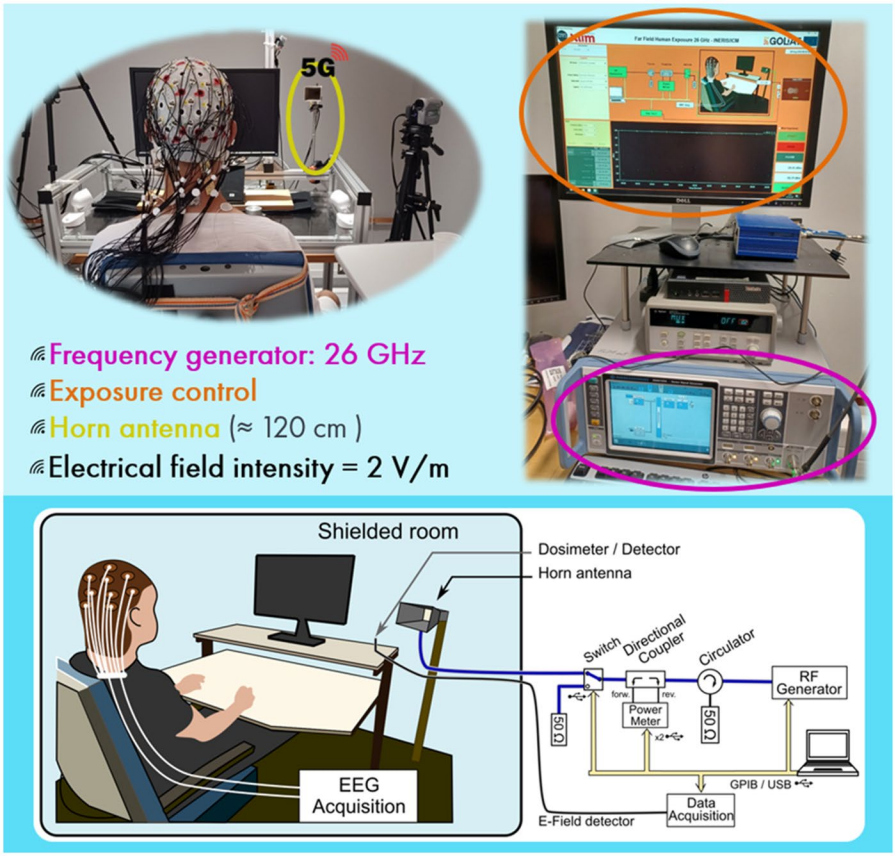
2.4. Nastavenie expozície

Nový rádiový signál 5 G s frekvenciou 26 GHz (verzia 15, digitálne štandardy SMBVB-K444) bol vygenerovaný pomocou Rhode and... Rádiofrekvenčný generátor Schwarz SMM 100 A a vysielaný cez trychtýřovú anténu (NorthEast Microwave 261 A) v elektromagneticky tienenom prostredí. Trychtýřová anténa bola orientovaná tak, aby jej hlavná os lúča smerovala k hlave účastníka, vo výške zodpovedajúcej kalibrovanej polohe merania poľa (2 V/m na úrovni hlavy), umiestnenej 120 cm od účastníka na jeho pravej prednej strane. Podrobná schéma kompletného expozičného systému je uvedená vObrázok 2(adaptované podľa Michelanta a kol.) 2025b). Signál využíval moduláciu s frekvenčným delením (FDD) s kvadratúrnym fázovým posunom (QPSK) v rámci šírky pásma kanála 100 MHz. Charakteristiky signálu zahŕňali priemerný výkon aj špičkový obálkový výkon (PEP), pričom PEP meral 1,26 dBm, keď bol priemerný výkon nastavený na −10 dBm.

Prenosový systém zahŕňal obojsmerný väzobný člen (Pulsar CCS20-51-437/1B-4, 6 – 40 GHz, väzba 20 dB), prepínač SPDT (Mini-Circuits RC-1SPDT-A26, medzná frekvencia 26,5 GHz) a cirkulátor (UIY CC1318A25T27K, 25 – 27 GHz, výkon 50 W). Terminácia signálu využívala dve RF záťaže (Sainty ST361D-50-10W-32, 10 W, DC – 32 GHz) v závislosti od smeru signálu s overením integrity pomocou...

Riadenie systému využívalo vlastný softvér Matlab, skompilovaný pre samostatnú prevádzku a spúšťaný prostredníctvom prostredia Matlab Runtime Environment.

Vzdialenosť medzi anténou a účastníkom 120 cm spĺňala kritériá šírenia vo vzdialenom poli. Použitím vzorca pre prahovú hodnotu vzdialeného poľa ($2D_2/\lambda$), minimálna vzdialenosť bola stanovená na 0,9 m, berúc do úvahy apertúru antény 72,1 mm a



Obrázok 2.systém rádiofrekvenčnej expozície.
Vektorový generátor signálov (rohde & Schwarz SMM100a) produkoval modulovaný nový rádiový signál 5 g vysielaný cez väzobný člen, vlnový separátor a SPdt prepínač do trychtýrovej antény (severovýchodná mikrovlnka 261a) umiestnenej 120 cm od účastníka v podmienkach vzdialeného poľa, v elektricky tienenej miestnosti. Intenzita elektrického poľa bola monitorovaná pomocou sondy elektrického poľa a meračov výkonu, aby sa zabezpečila stabilita expozície (2 V/m na úrovni hlavy, 1 V/m na úrovni trupu). Riadenie systému sa vykonávalo pomocou vlastného softvéru Matlab. Adaptované z Michelant et al. (2026) a Michelant a kol. (2025), podľa autorských práv, ktoré si zachováva časopis Elsevier.

Vlnová frekvencia 11 mm pri 26 GHz. Toto umiestnenie zabezpečilo prevádzku v rámci vyžarujúcej zóny vzdialeného poľa, ktorá sa vyznačuje planárnymi vlnoplochami, homogénnym rozložením poľa a vyžarovacími diagramami nezávislými od vzdialenosti.

Predexperimentálna kalibrácia využila signály kontinuálnej vlny a izotropnú sondu elektrického poľa (NARDA PMM EP-604) na mapovanie trojrozmerných zložiek poľa (osi X, Y, Z) na pevných miestach zodpovedajúcich polohám hlavy a trupu účastníka (merané bez prítomnosti účastníkov). Tieto referenčné merania overili intenzity cieľa pred expozíciou účastníka. Všetky následné expozície účastníkov využili modulovaný signál 5G NR opísaný vyššie.

Monitorovanie v reálnom čase počas expozície využívalo dva merače výkonu Boonton RTP-5340 (pásmo pásma 40 GHz) na kontinuálne meranie dopredného (dopadajúceho) a odrazeného výkonu. ment, aktualizovaný a zaznamenávaný v sekundových intervaloch. posledný uvedený mal priemer viac ako 4 cm^2a 6 minút pre absorbovaný výkon Nepretržitý záznam elektrického poľa pomocou dipólovej antény umiestnenie pri otvore trúby poskytlo dodatočné overenie. Monitorovanie odrazeného výkonu potvrdilo efektívny prenos energie do voľného priestoru, čím sa zabezpečilo správne vyžarovanie signálu, a nie jeho absorpcia alebo strata v prenosových vedeniach.

Úrovne expozície boli založené na údajoch Francúzskej národnej frekvenčnej agentúry (ANFR2021) merania prostredia na železničnej stanici v Rennes, ktoré predstavujú jedinú oficiálnu dokumentáciu o expozícii v pásme 26 GHz v reálnych francúzskych podmienkach. Štúdia ANFR dokumentovala hodnoty poľa v rozmedzí od 0,4 do 3,2 V/m v rôznych konfiguráciách, pričom maximálne hodnoty zostávajúce pod 1 V/m počas realistických scenárov použitia zahŕňajúcich skutočnú dátovú prevádzku a prítomnosť používateľa. Intenzita poľa vykazovala vysokú priestorovú lokalizáciu s rýchlym útlmom mimo primárneho lúča antény. Intenzity 2 V/m pre hlavu a 1 V/m pre trup v našom protokole predstavujú horný rozsah zdokumentovaných environmentálnych expozícií a poskytujú ekologicky relevantný, ale konzervatívny scenár expozície.

V podmienkach vzdialeného poľa bola hustota dopadajúceho výkonu vypočítaná ako $P_{vrátane} = E^2/377$ W/m^2, čo zodpovedá 10,6 mW/m^2na hlave a 2,65 mW/m^2pri trupe. Tieto hodnoty zostávajú podstatne pod úrovňou ICNIRP (2020) referenčné úrovne: 50 W/m^2 (pracovné) a 10 W/m^2(verejnosť) pre hustotu dopadajúceho výkonu ($S_{vrátane}$), ako aj 100 W/m^2(pracovné) a 20 W/m^2 (široká verejnosť) pre lokálnu expozíciu pri 26 GHz, s

hustota ($S_{brušné svaly}$).

Podmienky prostredia boli počas všetkých sedení nepretržite monitorované pomocou snímačov teploty a vlhkosti. Teplota okolia sa udržiavala na 24,3 ± 0,5 °C a relatívna vlhkosť na 53,0 ± 2,0 %, bez významných rozdielov medzi sedeniami s rádiofrekvenčným žiarením pri 26 GHz a simulovanými sedeniami. Monitorovanie teploty pokožky sa vykonávalo počas celého vyšetrovania, pričom samostatná štúdia využívajúca infračervenú termografiu počas identických protokolov expozície pri 26 GHz nepreukázala žiadne detekovateľné tepelné účinky v žiadnej meranej oblasti pokožky.

Expozície prebiehali v elektricky tienenej miestnosti, čím sa minimalizovalo vonkajšie rádiofrekvenčné rušenie. Podmienky expozície (RF ON pre skutočnú expozíciu, RF OFF pre simulovanú expozíciu) boli pred každou reláciou vopred nakonfigurované nezávislou treťou stranou a skryté pred rozhraním, aby sa zachoval trojito zaslepený dizajn. Na odhalenie týchto informácií bol potrebný vyhradený kód známy výlučne tretej strane, čím sa minimalizovalo riziko náhodného odslepenia. Experimentátor mohol iniciovať alebo ukončiť expozíciu prostredníctvom rozhrania bez toho, aby vedel, či boli použité skutočné alebo simulované podmienky.

2.5. Zber a spracovanie údajov EDA

Elektrodermálna aktivita sa merala pomocou dvoch opakovane použiteľných strieborno-chloridových (Ag/AgCl) elektród (prstový prevodník TSD203, BIOPAC Systems, Inc., Spojené štáty) umiestnených na distálnych falangách ukazováka a prostredníka v experimentálnych sériách sa analýza zamerala výlučne na nedominantnú ruku. Izotonický gél (GEL101A, BIOPAC Systems, Inc., Spojené štáty) uľahčili prepojenie elektród s pokožkou-vodivosť povrchu. Signály EDA boli zosilnené pomocou Zosilňovače BRAINAMP DC (Brain Products GmbH, pre každý cyklus boli spriemerované dve prezentácie stimulov a Nemecko) a zaznamenané pomocou softvéru Brain Vision Recorder (verzia 1.23.0003) pri vzorkovacej frekvencii 1000 Hz.

Overenie kvality signálu sa vykonalo tak, že účastníci boli poučení o hlbokom nádychu a výdychu, čo viedlo k viditeľným výchylkám EDA potvrdzujúcim správny kontakt s elektródou a zachytenie signálu. Účastníci boli následne poučení, aby počas experimentálnych sedení udržiavali pravidelné dýchacie vzorce.

Reakcie vodivosti kože súvisiace s udalosťami boli vyvolané pomocou štandardizovaných sluchových podnetov počas počiatočného segmentu každého zaznamenaného cyklu.

Po zbere údajov boli signály EDA importované do softvéru Ledalab (verzia V3.4.9) založeného na MATLABe pre komplexnú analýzu (Benedek a Kaernbach2010). Počiatočné predspracovanie zahŕňalo zníženie vzorkovacej frekvencie z 1000 Hz na 20 Hz s cieľom optimalizovať výpočtovú efektivitu. Následne bola použitá metóda kontinuálnej dekompozičnej analýzy (CDA) na rozklad signálov v rámci okna odozvy trvajúceho 1 až 4 sekundy po stimule s využitím amplitúdového prahu 0,02 mikrosiemensov (μS) na detekciu odozvy vodivosti kože.

Metóda CDA bola zvolená namiesto tradičných prístupov „trough-to-peak“, pretože rozkladá kontinuálny signál EDA na jeho základné fázové a tonické zložky pomocou matematického modelu sudomotorickej impulznej odozvy, čím poskytuje presnejšie odhady aktivity sympatického nervu, najmä keď sa SCR prekrývajú (Benedek a Kaernbach). 2010). Extrahované parametre zahŕňali: CDA Tonic (priemerná tonická alebo kožná vodivosť v rámci okna odozvy v μS), CDA SCR (priemerná fázová aktivita v rámci okna odozvy v μS), CDA Latency (latencia odozvy prvého významného SCR v rámci okna odozvy v sekundách), CDA nSCR (počet významných SCR v rámci okna odozvy) a CDA AmpSum (súčet amplitúd významných SCR v rámci okna odozvy v μS).

Vypočítali sa aj tradičné metriky od trough-to-peak (TTP), vrátane latencie TTP, TTP nSCR a TTP. AmpSum, spolu s meraniami globálnej vodivosti kože a maximálnymi pozitívnymi odozvovými výchylkami.

2.6. Štatistická analýza

Štatistické analýzy boli vykonané pomocou softvéru R (verzia 4.3.3) a RStudio IDE (2024.4.1.748). Pred analýzou bola normalita distribúcie údajov posúdená pomocou Shapiro-Wilkových testov, zatiaľ čo homogenita rozptylov bola hodnotená pomocou Leveneových testov. Premenné vyžadujúce normalizáciu boli podrobené logaritmickej transformácii.

Identifikácia a odstránenie odľahlých hodnôt pomocou Grubbsovej testovacej metodiky. Konečná vzorka 22 účastníkov absolvovala obe experimentálne sedenia (skutočnú aj simulovanú expozíciu) bez nežiaducich udalostí.

Hoci sa EDA priebežne zaznamenávala počas všetkých reakcie vodivosti kože súvisiace s udalosťami zodpovedajúce sluchovým stimulom. A aby sa minimalizovali účinky návyku, ktoré by mohli skresliť výsledky a znížiť reakcie, iba prvá zahrnuté do štatistických porovnaní. Predbežné analýzy skúmali potenciálne mätúce premenné vrátane pohlavia účastníka, dennej doby (ranné vs. popoludňajšie sedenia) a sedenia.

Keďže sa pri pokusoch nezistil žiadny účinok, bolo zvolené spriemerovanie pokusov vo fáze, aby sa získali robustnejšie štatistické údaje. Na vyhodnotenie účinkov expozície na parametre EDA v experimentálnych fázach boli implementované lineárne modely so zmiešanými efektmi zahŕňajúce 3-cestný dizajn: expozičné podmienky (simulovaná, skutočná) a experimentálna fáza (pred expozíciou, expozícia, po expozícii). Boli zahrnuté náhodné intercepty pre jednotlivé subjekty, aby sa zohľadnila intraindividuálna variabilita. Prah štatistickej významnosti bol stanovený na $p < .05$.

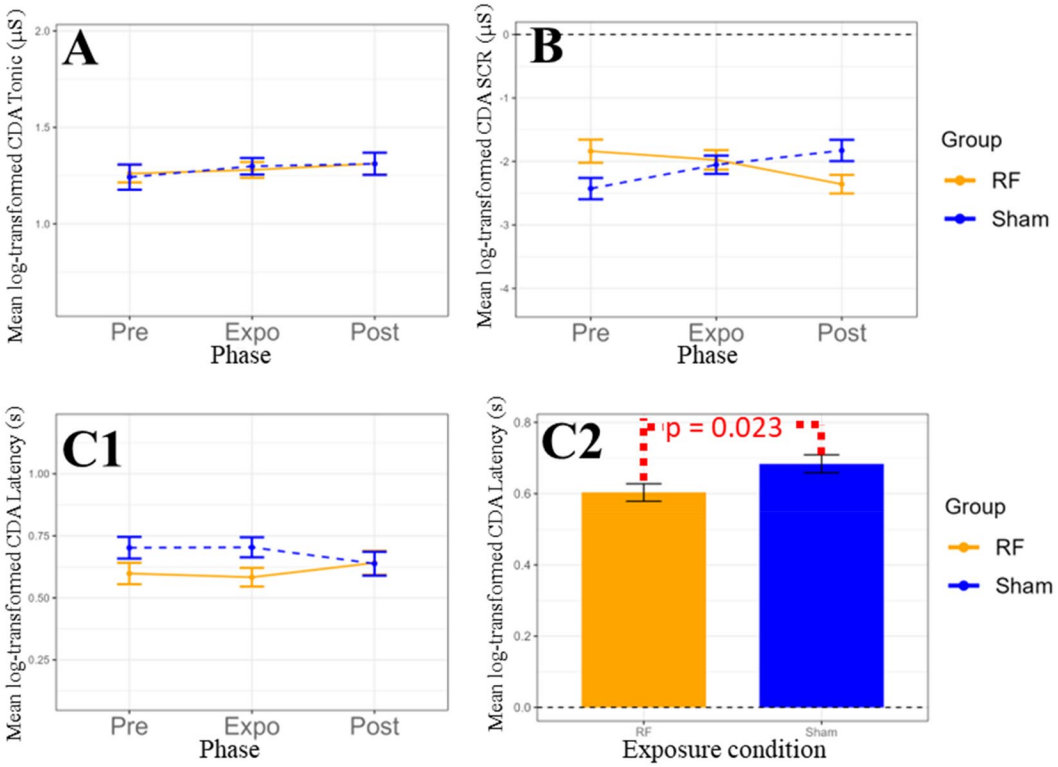
Keď sa objavili významné hlavné účinky alebo interakcie, vykonali sa post-hoc analýzy s použitím Tukeyho testov viacnásobného porovnávania na preskúmanie párových rozdielov s dôrazom na porovnanie medzi simulovanými a skutočnými expozičnými podmienkami.

Apriórna analýza štatistickej sily vykonaná pomocou softvéru G*Power (verzia 3.1.9.7) ukázala, že na dosiahnutie 80 % štatistickej sily na detekciu strednej veľkosti efektu (f = 0,25) pri α = 0,05 v dizajne s opakovanými meraniami s dvoma expozičnými podmienkami a tromi experimentálnymi fázami by bolo potrebných 28 účastníkov. Konečná analyzovaná vzorka 22 účastníkov preto dosiahla približne 75 % štatistickej sily pre stredné veľkosti efektu.

3. Výsledky

3.1. Parametre analýzy kontinuálneho rozkladu

Analýza lineárneho modelu so zmiešanými efektmi aplikovaná na parametre CDA neodhalila žiadny významný hlavný vplyv expozičných podmienok na tonickú aktivitu (RF vs. simulovaná expozícia: $F(1,588) < 0,01$, $p = 99$), fázová aktivita ($F(1,569) = 0,32$, $p = .57$), počet reakcií vodivosti kože ($F(1,397) = 0,56$, $p = .45$), alebo



Obrázok 3. Analýza kontinuálneho rozkladu (Cda) tonických a fázových elektrodermálnych zložiek aktivity.
Priemerné hodnoty (± SeM) parametrov Cda v experimentálnych fázach pre reálne (rf, oranžová) a simulované (modrá) podmienky expozície.**A**) tonická aktivita (Cda tonikum) odrážajúca základnú sympatickú aktiváciu. (**B.**) Fázová aktivita (Cda.SCr) predstavujúca reakcie vyvolané stimulom. (**C1**) latencia odozvy (latencia Cda) zobrazujúca časovú dynamiku naprieč fázami.**C2**) porovnanie celkovej latencie odozvy medzi expozičnými podmienkami. Všetky hodnoty predstavujú logaritmicky transformované dáta spriemerované z prvých dvoch sluchových podnetov každého cyklu.
predexpozícia (Pre), expozícia (expo), poexpozícia (Post) *n*= 22
účastníkov na podmienku.

amplitúda odozvy (F(1,397) = 0,99,*p*= .32) (Obrázok 3 A a B).

Významný hlavný vplyv expozičných podmienok sa však pozoroval na latenciu odozvy (F(1,397) = 5,82,*p*= .016), tento efekt bol potvrdený Tukeyho testom (p = 0,023) (Obrázok 3 C1 a C2).

Pre fázovú aktivitu sa objavili významné expozičné podmienky a fázové interakcie (F(2 569) = 6,06,*p*= .0025), počet odpovedí (F(2 397) = 3,91,*p*= .021) a amplitúda odozvy (F(2,397) = 5,60,*p*= .004). Post-hoc analýzy (Tukeyho test) však nedokázali identifikovať významné párové rozdiely medzi skutočnou a simulovanou expozíciou v rámci žiadnej špecifickej experimentálnej fázy (všetky*p*> .05). Podmienky expozície a fázová interakcia pre latenciu odozvy neboli významné (F(2,397) = 1,27,*p*= .28).

Pokiaľ ide o fázové účinky, neboli pozorované žiadne významné hlavné účinky na tonickú aktivitu (F(2,588) = 1,40,*p*= . 25), fázová aktivita (F(2,569) = 0,41,*p*= .66), počet odpovedí (F(2 397) = 0,39,*p*= .68), latencia odozvy (F(2 397) = 0,03, *p*= .97) alebo amplitúda odozvy (F(2,397) = 2,94,*p*= .054).

3.2. Tradičné parametre od najnižšej hodnoty po najvyššiu hodnotu

Analýza parametrov TTP neodhalila žiadne významné hlavné vplyvy expozičných podmienok na počet odpovedí (RF vs. simulovaná štúdia: F(1,221) = 0,37,*p*= .54), latencia odozvy (F(1,221) = 0,22,*p*= .64) alebo amplitúda odozvy (F(1,221) < 0,01, *p* = 0,99) (Obrázok 4A a B). Podmienka významnej expozície a fázová interakcia bola zistená pre počet odpovedí (F(2,221) = 3,43,*p*= .034), ale post-hoc porovnania nezistili žiadne významné párové rozdiely medzi podmienkami v žiadnej fáze (všetky*p*> .05). Interakcie medzi expozičnými podmienkami a fázami neboli významné pre latenciu odozvy (F(2,221) = 0,09,*p*= .91) a amplitúda odozvy (F(2,221) = 2,85,*p*= .060).

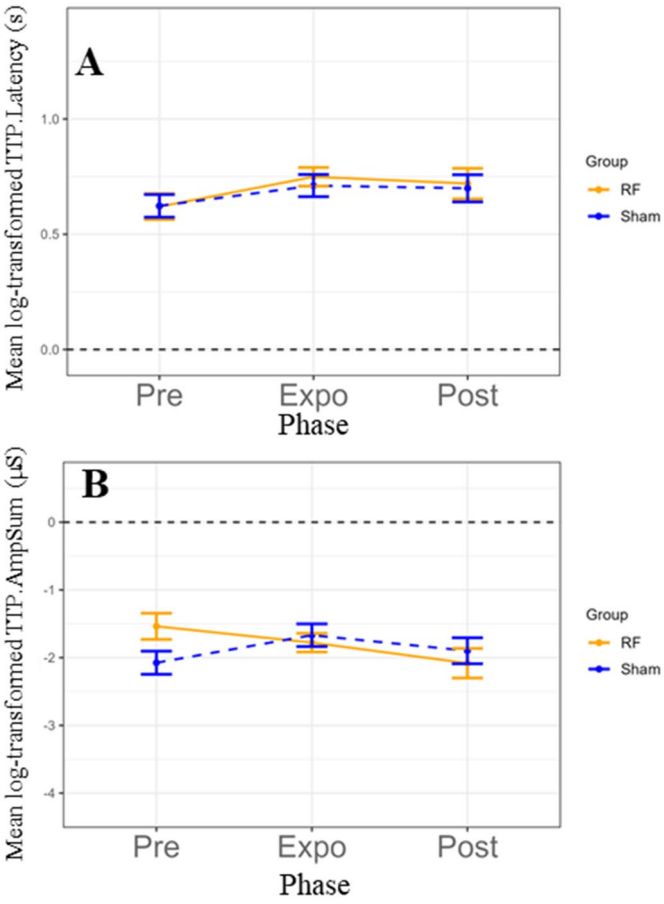
Pokiaľ ide o fázové efekty, neboli pozorované žiadne významné hlavné efekty pre počet odpovedí (F(2,221) = 1,03,*p*= 36), amplitúda odozvy (F(2,221) = 0,76,*p*= .47) alebo latencia odozvy (F(2,221) = 2,80,*p*= .063).

3.3. Merania globálnej vodivosti kože

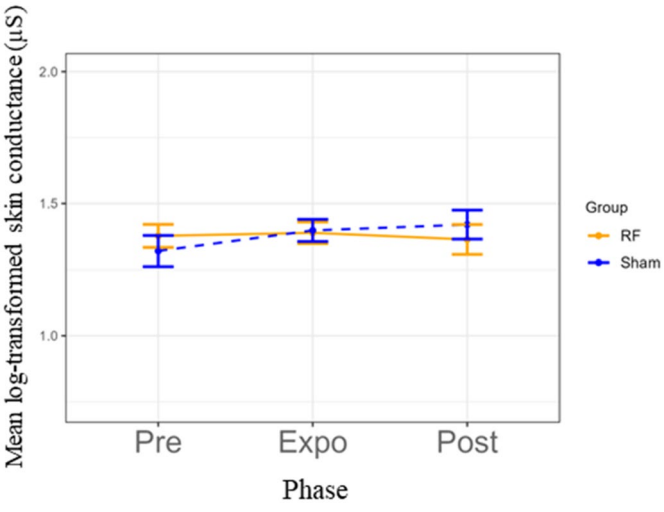
Analýza globálnej priemernej vodivosti kože nepreukázala žiadny významný hlavný vplyv expozičných podmienok (RF vs. simulovaná expozícia: F(1,589) = 0,02,*p*= .88) alebo fáza (F(2 589) = 1,40,*p*= .25). Expozičné podmienky a fázová interakcia boli tiež nevýznamné (F(2 589) = 1,64,*p*= .19) (Obrázok 5).

4. Diskusia

Predkladaná štúdia skúmala potenciálne účinky vystavenia rádiofrekvencii 26 GHz na parametre elektrodermálnej aktivity u zdravých mladých dospelých v kontrolovaných laboratórnych podmienkach. Naše analýzy zahŕňali komplexné posúdenie metrík CDA a TTP u 22 účastníkov, ktorí absolvovali obe experimentálne sedenia.



Obrázok 4.tradičné parametre od trough-to-peak (ttP).
Priemerné hodnoty (± SeM) parametrov ttP v experimentálnych fázach pre reálne (rf, oranžová) a simulované (modrá) podmienky expozície.**A**) latencia odozvy (latencia ttP) ukazuje načasovanie reakcií vodivosti kože.**B.**) Súčet amplitúd odozvy (ttP ampSum) odrážajúci veľkosť elektrodermálnych reakcií. Všetky hodnoty predstavujú logaritmicky transformované dáta spriemerované z prvých dvoch sluchových stimulov každého cyklu.
predexpozícia (Pre), expozícia (expo), poexpozícia (Post) *n*= 22
účastníkov na podmienku.



Obrázok 5.globálne miery vodivosti kože.
Priemerná globálna vodivosť kože (± SeM) v rámci experimentálnych fáz pre reálne (RF, oranžová) a simulované (modrá) expozičné podmienky. Hodnoty predstavujú logaritmicky transformované priemerné úrovne vodivosti kože spriemerované z prvých dvoch sluchových podnetov každého cyklu.
predexpozícia (Pre), expozícia (expo), poexpozícia (Post) *n*= 22
účastníkov na podmienku.

Naše výsledky preukazujú absenciu štatisticky významných zmien vo všetkých meraných zložkách EDA, vrátane tonických aj fázových parametrov, počas a po expozícii signálom s frekvenciou 26 GHz pri úrovniach expozície prostredia (2 V/m na úrovni hlavy, 1 V/m na úrovni trupu).

Významný hlavný vplyv expozičných podmienok bol pozorovaný pre latenciu CDA, čo potvrdil Tukeyho post-hoc test. Post-hoc analýzy však nedokázali identifikovať významné párové rozdiely medzi skutočnými a simulovanými podmienkami v žiadnej špecifickej experimentálnej fáze (pred expozíciou, expozíciou alebo po expozícii). Okrem toho interakcia expozičných podmienok × experimentálnej fázy nebola významná, čo naznačuje, že rozdiel latencie nebol koncentrovaný v žiadnej konkrétnej fáze, a to ani počas alebo bezprostredne po expozičnom období. Rozdiel latencie bol prítomný aj počas základnej línie pred expozíciou, predtým, ako došlo k akejkoľvek RF emisii, čo svedčí proti kauzálnej súvislosti s expozíciou 26 GHz. Ak by expozícia významne ovplyvnila načasovanie sympatickej odpovede, očakávali by sa rozdielne latencie konkrétne počas alebo bezprostredne po expozičnom období, čo v tomto prípade nebol prípad. Preto interpretujeme toto izolované zistenie ako s najväčšou pravdepodobnosťou odraz artefaktu štatistického priemerovania, a nie biologicky významného účinku expozície 26 GHz.

Tieto zistenia sú v rozpore s nedávnymi pozorovaniami publikovanými pre nižšie frekvenčné pásma 5 G a sú v súlade so zavedenými dôkazmi z literatúry o pásmach pod 6 GHz. Jamal a kol. (2024) zdokumentovali jemné, ale štatisticky významné zmeny parametrov EDA po expozícii 3,5 GHz, vrátane zmien v globálnej vodivosti kože, tonickej aktivite a latencii odozvy. Súčasne literatúra ukazuje, že pri expozíciách v súlade s ICNIRP alebo na úrovni prostredia pod 6 GHz, ľudská EDA (tonická a fázová) nepreukázala konzistentnú moduláciu, ktorú by bolo možné pripísať expozícii RF v kontrolovaných provokačných štúdiách (Wilén a kol.2006Eltiti a kol.2009 Selmaoui a kol.2018).

Okrem toho výskumy účinkov rádiofrekvenčných frekvencií na širšie parametre autonómneho nervového systému priniesli zmiešané výsledky, pričom niektoré štúdie uvádzajú zmeny variability srdcovej frekvencie a nestabilitu periférneho krvného tlaku po vystavení rádiofrekvenčnému žiareniu (Havas2013Saili a kol.2015), zatiaľ čo iní nezistili žiadne významné kardiovaskulárne účinky (Andrianome a kol.2017).

Absenciu merateľných EDA reakcií na expozíciu 26 GHz možno vysvetliť známymi biofyzikálnymi mechanizmami interakcie milimetrových vĺn s tkanivom. Na rozdiel od nízkofrekvenčných RF signálov, ktoré prenikajú niekoľko centimetrov, sú polia 26 GHz do značnej miery absorbované v povrchových vrstvách kože (Neufeld a Kuster2018ICNIRP2020), čo by mohlo obmedziť ich schopnosť ovplyvňovať hlbšie autonómne štruktúry.

Treba uznať, že EDA odráža následný integračný výstup sympatickej aktivity a zahŕňa viacero fyziologických krokov medzi akoukoľvek počiatočnou poruchou indukovanou RF a merateľnou odpoveďou vodivosti kože. Hoci to robí z EDA robustný marker celkovej autonómnej aktivácie, môže znižovať citlivosť na lokalizované alebo prechodné účinky, ktoré sú zoslabené predtým, ako dosiahnu ekrinné potné žľazy. Doplnkové fyziologické opatrenia, ako napríklad lokálne

teplota kože v mieste expozície, variabilita srdcovej frekvencie alebo pupilometria by mohli poskytnúť ďalšie poznatky v budúcich štúdiách.

Inžinierske a modelové štúdie skúmajúce vystavenie milimetrovým vlnám dokumentovali variabilné tepelné reakcie v závislosti od intenzity expozície. Ijima a kol. (2023) preukázali lokalizované zvýšenie teploty pokožky blížiace sa k 11 °C za podmienok vystavenia vysokej intenzite (až do 500 W/m2) pri 26,5 GHz, čo je výrazne nad regulačnými limitmi. Podobne Matsumoto a kol. (2025) hlásili zvýšenie rektálnej teploty o viac ako 1 °C u potkanov vystavených frekvencii 28 GHz pri úrovniach SAR celého tela 3,7 – 7,2 W/kg, čo je tiež nad súčasnými bezpečnostnými normami. Pri úrovniach expozície prostredia porovnateľných s úrovňami použitými v našej štúdii (2 V/m na úrovni hlavy, 1 V/m na úrovni trupu) sa však očakáva, že tepelné účinky budú minimálne a obmedzené na povrchové vrstvy kože. Okrem toho, bariérové vrstvy kože (stratum corneum, epidermis, dermis) silne tlmia šírenie milimetrových vĺn, čo ďalej obmedzuje biologický vplyv. Hoci boli navrhnuté alternatívne netepelné mechanizmy (Pall)2022), tieto zostávajú špekulatívne a experimentálne nepotvrdené.

Naše výsledky naznačujú, že súčasné úrovne vystavenia prostredia signálom s frekvenciou 26 GHz, ako ich dokumentujú regulačné agentúry (ANFR 2021), nemusia byť dostatočné na vyvolanie merateľných porúch vo fungovaní autonómneho nervového systému. Tento metodologický prístup rieši medzery identifikované v existujúcej literatúre, kde sa v kontexte milimetrových vĺn nezaznamenávala súbežná EDA s lokálnou teplotou kože v miestach expozície aj záznamu EDA. Toto pozorovanie poskytuje upokojujúce dôkazy týkajúce sa potenciálnych autonómnych účinkov nasadenia technológie s frekvenciou 26 GHz v rámci súčasných regulačných rámcov. Intenzity expozície použité v našej štúdii však predstavujú hornú hranicu realistických environmentálnych scenárov, nie limit. Bolo by zaujímavé vykonať ďalší výskum účinku pri limitnej intenzite a nie pri environmentálnej.

Pri interpretácii týchto zistení je preto potrebné zvážiť niekoľko obmedzení. Po prvé, naše skúmanie sa zameralo výlučne na účinky akútnej expozície v kontrolovanom laboratórnom prostredí. Scenáre chronickej expozície, ktoré môžu zahŕňať kumulatívne alebo adaptívne reakcie, zostávajú pre frekvencie 26 GHz nepreskúmané. Štúdie dlhodobej expozície by boli cenné na posúdenie, či opakovaná alebo dlhodobá expozícia v pásme 26 GHz môže viesť k detekovateľným autonómnym adaptáciám, ktoré nie sú zjavné v paradigmách akútnej expozície.

Po druhé, našu populáciu účastníkov tvorili zdraví mladí dospelí bez známej elektromagnetickej citlivosti. Individuálne faktory náchylnosti vrátane veku, zdravotného stavu a potenciálnej elektromagnetickej precitlivenosti by mohli ovplyvniť autonómne reakcie na vystavenie rádiofrekvenčnému žiareniu. Budúci výskum by mal preskúmať, či určité podskupiny populácie môžu vykazovať rozdielnu citlivosť na signály s frekvenciou 26 GHz.

Po tretie, parametre trvania a intenzity expozície, hoci sú reprezentatívne pre súčasné environmentálne scenáre, nemusia zahŕňať všetky možné podmienky expozície v reálnom svete (telefón a nie anténa, viacnásobná expozícia...).

Napokon treba poznamenať, že značná interindividuálna variabilita v odpovediach EDA, čo je dobre zdokumentovaná charakteristika elektrodermálneho výskumu (Boucsein2012), mohli znížiť štatistickú silu tejto štúdie, čo potenciálne obmedzilo jej schopnosť detekovať malé, ale skutočné účinky vystavenia sa frekvencii 26 GHz. Budúce výskumy s väčšími vzorkami by pomohli objasniť, či táto variabilita maskuje jemné autonómne zmeny.

Absencia významných účinkov EDA v našej štúdii však prispieva k širšiemu pochopeniu biologických interakcií milimetrových vĺn a podporuje súčasné regulačné prístupy k hodnoteniu expozície 26 GHz. Tieto zistenia naznačujú, že signály 26 GHz pri úrovniach expozície prostredia nespôsobujú detekovateľné akútne poruchy v aktivite sympatického nervového systému, merané prostredníctvom elektrodermálnych reakcií.

Budúce smery výskumu by mali zahŕňať skúmanie potenciálnych kumulatívnych účinkov po chronickej expozícii 26 GHz, posúdenie individuálnych faktorov náchylnosti, ktoré by mohli modulovať autonómne reakcie, a skúmanie ďalších fyziologických parametrov, ktoré by mohli vykazovať väčšiu citlivosť na vystavenie milimetrovým vlnám. Okrem toho by štúdie zahŕňajúce vyššie intenzity expozície v rámci bezpečnostných limitov mohli stanoviť prahové úrovne pre biologické účinky.

5. Záver

Táto kontrolovaná štúdia nezistila žiadne významné účinky vystavenia sa rádiofrekvenčnému žiareniu s frekvenciou 26 GHz na elektrodermálnu aktivitu u zdravých mladých dospelých. Všetky parametre EDA zostali nezmenené počas a po vystavení na úrovniach intenzity prostredia, čo je v kontraste s hlásenými účinkami pri nižších frekvenciách 5 G. Obmedzená penetrácia milimetrových vĺn do tkaniva pravdepodobne vysvetľuje absenciu autonómnych reakcií.

Tieto zistenia naznačujú, že súčasné úrovne expozície v prostredí s frekvenciou 26 GHz nemajú akútny vplyv na aktivitu sympatického nervového systému, čo podporuje existujúce regulačné rámce. Výsledky sú však obmedzené na akútnu expozíciu u zdravých dospelých a nezaoberajú sa účinkami chronickej expozície ani faktormi individuálnej náchylnosti. Budúci výskum by mal preskúmať scenáre dlhodobej expozície a testovanie s expozíciou na hranici normy a zraniteľnými skupinami obyvateľstva s rozširujúcim sa zavádzaním technológie s frekvenciou 26 GHz.

Poďakovania

Autori vyjadrujú vďaku Dr. Pierrovi Tourneuxovi (Jednotka intenzívnej starostlivosti o deti, Univerzitné lekárske centrum Amiens; Laboratórium PériTox, UMR_I 01, Univerzita Picardie Jules Verne) za poskytnutie klinických znalostí a neustáleho usmerňovania počas celého projektu. Ďakujeme pani Amandine Carrie a pani Benedicte Leveille Nizerolle za cennú technickú pomoc počas experimentálnych postupov zberu údajov. Lisa MICHELANT: Konceptualizácia, metodika, skúmanie, kurátorstvo údajov, formálna analýza, softvér, vizualizácia, písanie – pôvodný návrh. Laurent HUGUEVILLE: Zdroje, skúmanie. Philippe LEVEQUE: Zdroje, metodika. Brahim SELMAOUI: Konceptualizácia, získavanie finančných prostriedkov, metodika, administrácia projektu, validácia, zdroje, formálna analýza, dohľad, písanie – kontrola a úprava. Všetci autori si prečítali a súhlasili s konečnou verziou rukopisu.

Príspevky autorov

Kredit:**Lisa Michelant**Konceptualizácia, Spracovanie dát, Formálna analýza, Vyšetrovanie, Metodológia, Softvér, Vizualizácia, Písanie – pôvodný návrh;**Laurent Hugueville**Vyšetrovanie, Zdroje;**Philippe Leveque**Zdroje;**Brahim Selmaoui**Konceptualizácia, Formálna analýza, Získavanie finančných prostriedkov, Metodika, Administrácia projektu, Zdroje, Supervízia, Validácia, Písanie – kontrola a editácia.

Vyhlásenie o zverejnení informácií

Autor(i) neuviedol(i) žiadny potenciálny konflikt záujmov.

Financovanie

Tento projekt získal finančné prostriedky z výskumného a inovačného programu Európskej únie Horizont Európa na základe grantovej zmluvy 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. Dodatočnú podporu poskytlo Ministerstvo pre ekologickú a inkluzívnu transformáciu (MINTE) v rámci programu INERIS 190, ako aj región Hauts-de-France (č. grantu/udelenia 22005848).

Poznámky k prispievateľom

Lisa Michelant, PhD v neurofyziológii, zaoberá sa účinkami vystavenia sa 5G na nervový systém, analyzuje EEG a fyziologické údaje.

Laurent HuguevilleVýskumný inžinier v CNRS a prevádzkový manažér kľúčového zariadenia MEG-EEG v Parížskom inštitúte mozgu.

Philippe LevequeV roku 1994 získal doktorát na Univerzite v Limoges vo Francúzsku. V roku 1995 nastúpil do CNRS. Podieľa sa na vývoji dozimetrických a expozičných zariadení na hodnotenie zdravotných rizík v spolupráci s biologickými a medicínskymi výskumnými skupinami v rozsahu rádiofrekvenčných frekvencií.

Brahim Selmaoui, PhD, HDR, pracuje na oddelení toxikológie ako vedúci vedecký pracovník v INERIS a zástupca riaditeľa v laboratóriu Peritox na UPJV, kde vykonáva výskum potenciálnych rizík pre ľudské zdravie, ktoré predstavujú nové technológie (rádiofrekvenčné elektromagnetické polia z komunikácie mobilnými telefónmi).

ORCID

Lisa Michelant http://orcid.org/0009-0005-7255-1658
Brahim Selmaoui http://orcid.org/0000-0003-0953-8280

Vyhlásenie o dostupnosti údajov

K surovým súborom údajov vygenerovaným počas tejto štúdie je možné získať prístup prostredníctvom neziskového repozitára spravovaného európskym konzorciom projektu GOLIAT na adrese:https://projectgoliat.eu/publications/Ďalšie žiadosti o údaje je možné zaslať priamo príslušným autorom a budú hodnotené na základe vedeckej prínosnosti a uskutočniteľnosti.

Referencie

Alekseev SI, Radzievsky AA, Logani MK, Ziskin MC. 2008. Milimeter vlnová dozimetria ľudskej kože. Bioelektromagnetika. 29(1):65–70. PMID: 17929264.https://doi.org/10.1002/bem.20363

Andrianome S a kol.2017Posúdenie autonómneho nervového systému systém u elektrohypersenzitívnej populácie: štúdia variability srdcovej frekvencie a vodivosti kože. J Appl Physiol (1985). 123(5):1055–1062. Epub 15. júna 2017. PMID: 28620054.https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00229.2017

ANFR - Francúzska národná frekvenčná agentúra.2021Hodnotenie bývalého pozícia pre verejnosť aux ondes électromagnetiques 5G – Volet 3 intermédiaire: prvé výsledky meraní na pilotoch 5G v pásme 26 GHz. jún 2021.

Benedek M., Kaernbach C.2010Kontinuálne meranie fázovej elektriny trodermálna aktivita. J Neurosci Methods. 190(1):80–91. Epub 6. mája 2010. PMID: 20451556; PMCID: PMC2892750.https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2010.04.028

Bortkiewicz A, Gadzicka E, Szymczak W, Zmyślony M.2012Zmeny v teplote bubienka počas vystavenia elektromagnetickým poliam vyžarovaným mobilným telefónom. Int J Occup Med Environ Health. 25(2):145–150. Epub 11. marca 2012. PMID: 22411069.https://doi.org/10.2478/S13382-012-0013-y

Boucsein W.2012Elektrodermálna aktivita. 2. vydanie. Springer; https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1126-0

Dawson ME, Schell AM, Filion DL.2016Elektrodermálny systém. In: berntson GG, Cacioppo JT, Tassinary LG, editori. Handbook of Psychophysiology. 4. vyd. Cambridge University Press. 2016. s. 217–243.https://doi.org/10.1017/9781107415782.010

Eltiti S a kol.2009Krátkodobé vystavenie základňovej stanici mobilného telefónu signály neovplyvňujú kognitívne funkcie ani fyziologické ukazovatele u jedincov, ktorí hlásia citlivosť na elektromagnetické polia, a u kontrolných skupín. Bioelectromagnetics. 30(7):556–563. PMID: 19475647. https://doi.org/10.1002/bem.20504

Esen F., Esen H.2006Vplyv elektromagnetických polí vyžarovaných bunkami Lar telefóny na latenciu evokovanej elektrodermálnej aktivity. Int J Neurosci. 116(3):321–329. PMID: 16484058.https://doi.org/10.1080/00207450500403371

Havas M.2013Žiarenie z bezdrôtovej technológie ovplyvňuje krv, srdce a autonómny nervový systém. Rev Environ Health. 28(2-3):75–84. PMID: 24192494.https://doi.org/10.1515/reveh-2013-0004

ICNIRP.2020Pokyny na obmedzenie vystavenia elektromagnetickému žiareniu polia (100 kHz až 300 GHz). Health Phys. 118(5):483–524.https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210

ICNIRP.1998Pokyny týkajúce sa obmedzenia vystavenia neionizujúcemu žiareniu cia: referenčná kniha založená na usmerneniach o obmedzení vystavenia neionizujúcemu žiareniu a vyhláseniach o špeciálnych aplikáciách. Medzinárodná komisia pre ochranu pred neionizujúcim žiarením. Ijima E a kol.2023Zvýšenie teploty závislé od intenzity vyvolané lokálna expozícia kvázimilimetrovým vlnám s frekvenciou 26,5 GHz u potkanov. In Vivo. 37(5):2092–2099. PMID: 37652500; PMCID: PMC10500540.https://doi.org/10.21873/invivo.13306

Jamal L. a kol.2024Reakcie autonómneho nervového systému na vystavenie zdravých dobrovoľníkov prvému nasadenému pásmu 5G (3,5 GHz) na úrovni prostredia. Exp Physiol. 109(12):2122–2133. https://doi.org/10.1113/EP092083

Loughran SP a kol.2019Expozícia rádiofrekvenčnému elektromagnetickému poľu a pokojové EEG: skúmanie hypotézy tepelného mechanizmu. Int J Environ Res Public Health. 16(9):1505. PMID: 31035391; PMCID: PMC6539668.https://doi.org/10.3390/ijerph16091505 Matsumoto A a kol.2025Jednorazové vystavenie takmer prahovému 5G mili- metrová vlna modifikuje stresové reakcie z obmedzenia u potkanov. Environ Health Prev Med. 30(0):33–33.https://doi.org/10.1265/ehpm.24-00321 Michelant L. a kol.2026Milimetrové vlny s vysokou frekvenciou 5G (26 GHz) Elektromagnetické polia nemodulujú elektrickú aktivitu ľudského mozgu. Environ Res. 289:123349. PMID: 41265672.https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.123349

Michelant L, Hugueville L, Lévêque P, Selmaoui B.2025Žiadne opatrenia- Vplyv akútnej expozície 5G sieti v frekvencii 26 GHz na markery slinného stresu u zdravých dospelých. Environ Res. 290:123439. Epub pred tlačou. PMID: 41317834.https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.123439 Neufeld E., Kuster N. 2018Systematické odvodzovanie bezpečnostných limitov pre časovo premenná expozícia rádiofrekvenčnému žiareniu 5G na základe analytických modelov a tepelnej dávky. Health Phys. 115(6):705–711. PMID: 30247338. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000930

Pall ML.2022Milimetrové (MM) vlny a mikrovlnné frekvenčné rádiácia má hlboko prenikajúce účinky: biológiu a fyziku. Rev Environ Health. 37(2):247–258. PMID: 34043892.https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0165

Saili L a kol.2015Účinky akútneho vystavenia signálom WIFI (2,45 GHz) na variabilitu srdca a krvný tlak u albínskych králikov. Environ Toxicol Pharmacol. 40(2):600–605. Epub 17. augusta 2015. PMID: 26356390. https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.08.015

Selmaoui B, Andrianome S., Ghosn R., de Seze R.2018Účinok akútneho vystavenie rádiofrekvenčným elektromagnetickým poliam vyžarovaným mobilným žlčový telefón (GSM 900 MHz) na elektrodermálnu citlivosť u zdravých ľudí. Int J Radiat Biol. 94(10):890–895. Epub 28. septembra 2018. PMID: 30028653.https://doi.org/10.1080/09553002.2018.1503431

Tansey EA, Johnson CD.2015, Najnovší pokrok v termoregulácii. Adv Physiol Educ. 39(3):139–148. PMID: 26330029.https://doi.org/10.1152/advan.00126.2014

Wilén J, Johansson A, Kalezic N, Lyskov E, Sandström M.2006. Psychofyziologické testy a provokácia subjektov so symptómami súvisiacimi s mobilným telefónom. Bioelektromagnetics. 27(3):204–214. PMID: 16304699.https://doi.org/10.1002/bem.20195