

基于十字框型超材料的儿童智能手表电磁辐射防护方法

侯文祺 周文颖 逯迈

(兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室 兰州 730070)

摘要 为了降低智能手表对儿童的电磁暴露影响,本研究提出一种基于十字框型超材料的主动电磁辐射防护方法。首先,设计了一款支持4G通话、无线上网及蓝牙功能的智能手表天线,及基于十字框结构的超材料防护层。其次,建立了包括颅骨、脑部、眼部、甲状腺和心脏等组织的6岁儿童人体电磁模型,并计算其相应的生物组织介电参数。最后,通过分析儿童在使用加载超材料防护层前后的智能手表时,身体不同组织吸收的电磁暴露剂量,并与国际非电离辐射防护委员会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP)制定的公众暴露限值对比,评估其电磁暴露安全性。研究结果表明,加载超材料防护层后,儿童各组织的高剂量辐射区域的面积显著缩减,其对应的比吸收率(Specific energy absorption rate, SAR)值也明显降低。其中,手腕中SAR值最高,加载超材料防护层后较之前下降20.7%,为 9.300×10^{-2} W/kg,约为ICNIRP限值的2.3%。加载超材料防护层对心脏电磁辐射剂量减少最为明显,最大SAR值降幅达28.8%,辐射剂量最集中的面积显著缩减。上述结果表明,本文提出的基于改进暴露源的主动防护方法可有效降低智能手表对儿童的电磁暴露水平,且能进一步减少因长期佩戴智能手表引起的辐射剂量累积效应,为儿童电磁辐射防护提供了新思路。

关键词 智能手表,辐射防护,十字框型超材料,儿童人体电磁模型,电磁暴露

中图分类号 TL72

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0117

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0117

引用该文:

侯文祺,周文颖,逯迈. 基于十字框型超材料的儿童智能手表电磁辐射防护方法[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, XX(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0117.

HOU Wenqi, ZHOU Wenying, LU Mai. Electromagnetic radiation protection approach for children's smartwatches based on cross-frame metamaterials[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0117.



基金资助: 国家自然科学基金(62161017、61701208、52467026); 兰州市青年科技人才创新项目(2025-QN-072)

第一作者: 侯文祺,女,2001年5月出生,2023年毕业于太原理工大学,现为兰州交通大学硕士研究生,研究方向为射频电磁场暴露, E-mail: hou_wenqi@126.com

通信作者: 周文颖,教授, E-mail: zhouwy29@126.com

收稿日期: 初稿 2025-12-05; 修回 2026-01-03

Supported by National Natural Science Foundation of China (62161017, 61701208, 52467026) and Lanzhou Youth Science and Technology Talents Innovation Project (2025-QN-072)

First author: HOU Wenqi (female) was born in May 2001, and graduated from Taiyuan University of Technology in 2023. Now she is a graduate student of Lanzhou Jiaotong University, majoring in radio-frequency electromagnetic field exposure, E-mail: hou_wenqi@126.com

Corresponding author: ZHOU Wenying, professor, E-mail: zhouwy29@126.com

Received 05 December 2025; accepted 03 January 2026

Electromagnetic radiation protection approach for children's smartwatches based on cross-frame metamaterials

HOU Wenqi ZHOU Wenyong LU Mai

(Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligent Control Ministry of Education,
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT To reduce the electromagnetic exposure of children from smartwatches, this study proposes an active electromagnetic radiation protection approach based on cross-frame metamaterials. First, a smartwatch antenna supporting 4G calls, wireless internet, and bluetooth functionality was designed, along with a metamaterial protective layer based on a cross-frame structure. Second, a human electromagnetic model for a 6-year-old child including the skull, brain, eyes, thyroid, and heart was established, and the dielectric properties of corresponding biological tissues were calculated. Finally, by analyzing the electromagnetic exposure dose absorbed by different tissues in child's body when using smartwatches before and after loading a metamaterial protective layer, and compared these results with the general public exposure restrictions of the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) guideline, the safety of electromagnetic exposure was evaluated. The research results indicated that after loading the metamaterial protective layer, the area of high-dose radiation regions in various tissues of the child was significantly reduced, and the corresponding specific absorption rate (SAR) values were also markedly lowered. Among the body tissues, the wrist absorbed the highest SAR, reaching 9.300×10^{-2} W/kg, which was 20.7% lower than before loading the metamaterial protective layer, approximately 2.3% of the ICNIRP limit. The most obvious reduction in electromagnetic radiation dose was observed in the heart, where the SAR value lowered by up to 28.8%, and the area with the highest radiation dose concentration was significantly reduced. The results above indicated that the active protection approach based on improving the exposure source proposed in this study could effectively reduce the electromagnetic exposure levels of smartwatches on children. Furthermore, it could reduce the cumulative radiation dose effects caused by long-term smartwatch wearing, providing a new approach for protecting children from electromagnetic radiation.

KEYWORDS Smartwatch, Radiation protection, Cross-frame metamaterials, Electromagnetic model of the children's body, Electromagnetic exposure
CLC TL72

随着智能可穿戴设备的广泛普及,智能手表已在儿童群体中形成相当规模的用户基础。2024年第二季度所有主要智能手表类型中,只有儿童智能手表市场在当季实现了同比正增长。根据最新数据,作为面向4~15岁儿童的智能手表品牌“小天才”,已超越“苹果”成为中国市场第二大智能手表品牌。根据中国产业研究院统计,中国5~12岁儿童中,近三分之一使用儿童智能手表,城市中儿童智能手表的市场普及率已经过半。尤其在年龄较小的儿童中使用智能手表的比例更高^[1]。这类设备不仅能满足现代通信的需要,还集成了多种娱乐功能,虽然极大地丰富了儿童的生活体验,但也导致儿童使用智能手表的时长增加。在使用过程中,由于手表紧贴皮肤,其天线与人体近距离接触,从而加剧了射频电磁场带来的电磁暴露风险^[2]。与成人

相比,儿童面临更高的健康风险^[3]。儿童具有独特的解剖结构和生理特性,其头部更小、头骨更薄,身体组织含水量较高,同时神经系统处于正在发育的阶段,因此对射频辐射更为敏感。此外,儿童接触电子产品的时间更早,可能导致电磁辐射的健康风险因射频辐射累积效应而在该群体中更为显著。世界卫生组织下属的国际癌症研究机构(WHO/IARC)已将射频电磁场列入2B可能致癌物^[4]。已有研究表明,长期高强度的暴露可能与儿童的多种器官系统健康受损存在关联^[5-8]。此外,大量实验研究也指出,射频暴露会对大脑、眼睛、甲状腺^[9]及心脏等重要组织产生影响^[9-12]。

已有大量射频暴露的电磁剂量学研究说明,由于解剖结构的不同,儿童会比成人吸收更多的电磁辐射能量^[13-15]。但其中大多研究沿用成人参数,仅

有少数研究考虑了儿童组织相较于成人更高的含水量导致的组织介电特性差异^[16-18]。且这些研究多聚焦于手机、平板电脑等设备,缺乏对智能手表的针对性研究。在手机等电子产品的说明中,往往建议使用者与设备保持一定距离。同时,国内外的医疗机构和公共卫生组织也提倡儿童在使用这些电子设备时应避免紧贴身体,并尽量减少使用时间。但儿童智能手表因其设计特性和功能需求,在佩戴过程中会长时间、紧密地接触儿童皮肤。因此,有效的儿童智能手表电磁防护措施尤为重要。

综上所述,现有研究主要集中在儿童智能手表电磁暴露的研究,但缺乏有效的电磁防护方法,且缺乏生物组织介电参数在年龄上差异的考量。因此,本文设计了一种支持4G通话、Wi-Fi及蓝牙功能的智能手表天线,并提出了一种基于十字框型超材料防护层;同时建立了儿童人体模型并计算了其不同身体组织的介电参数。通过仿真儿童使用智能手表的电磁暴露剂量,并与国际非电离辐射防护委员会(International Commission on Non-Ionizing

Radiation Protection, ICNIRP)制定的公众暴露限值对比,以评估儿童在日常使用场景下对智能手表电磁辐射的吸收情况,并验证所提防护方案的有效性。

1 智能手表天线设计与儿童人体建模

1.1 防护设计与天线建模

本文基于文献[19]提出了一款双频儿童智能手表天线,以满足4G通话、Wi-Fi及蓝牙的需求。同时,为降低儿童智能手表天线对儿童的电磁辐射影响,提出一种基于十字框结构的超材料防护层。超材料是通过人工方式加工或合成的、具有周期或准周期结构以及特异电磁性质的复合材料,能够有效调节电磁波的传播,实现对电磁辐射的控制。通过加载超材料防护层,在保证儿童智能手表天线正常通信性能的同时,降低儿童在佩戴智能手表时的电磁暴露。本文所提出的儿童智能手表天线如图1所示。

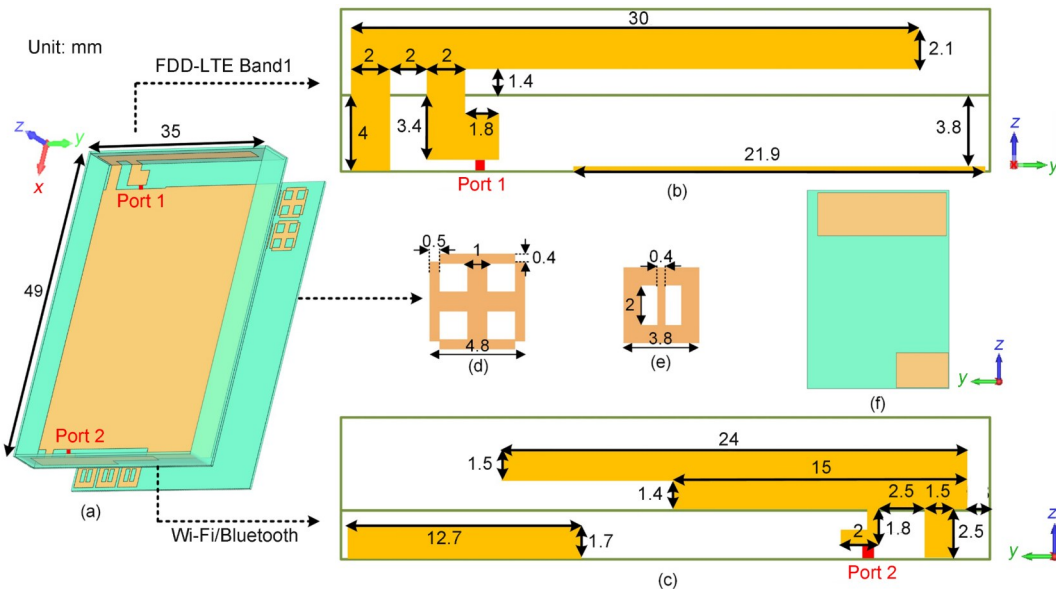


图1 智能手表天线:(a)整体结构;(b)顶部天线;(c)底部天线;(d)顶部超材料单元;(e)底部超材料单元;(f)超材料防护层背面

Fig.1 Smartwatch antenna: (a) overall structure; (b) top antenna; (c) bottom antenna; (d) top metamaterial unit cell; (e) bottom metamaterial unit cell; (f) back side of metamaterial protective layer

图1(a)为儿童智能手表整体结构,包含智能手表天线及超材料防护层,二者均使用厚度为0.4 mm的FR-4介质基板(介电常数为4.4)。智能手表天线的整体尺寸为35 mm×49 mm×5 mm,顶部和底部的天线均印刷在35 mm×5 mm的介质基板上。位于该手表顶部的微带天线用于覆盖用于通话的FDD-LTE的Band1频段(1 920~19 80 MHz, 2 110~

2 170 MHz),位于底部的微带天线用于覆盖2.4 GHz Wi-Fi及蓝牙频段(2 400~2 483.5 MHz),具体结构及尺寸分别如图1(b)和(c)所示。智能手表天线和儿童手臂之间加载了一层与天线尺寸相同的十字框型超材料防护层,位于智能手表天线下方9 mm处,该超材料防护层由两个不同形状的单元阵列组成,顶部超材料单元如图1(d)所示,底部超材

料单元如图1(e)所示,超材料防护层背面结构如图1(f)所示。

为了验证所提方法的可行性,通过所提出天线的仿真及实测辐射性能,利用 Siglent SNA6000A 矢量网络分析仪测量了智能手表天线的 S 参数,结果如图2所示。

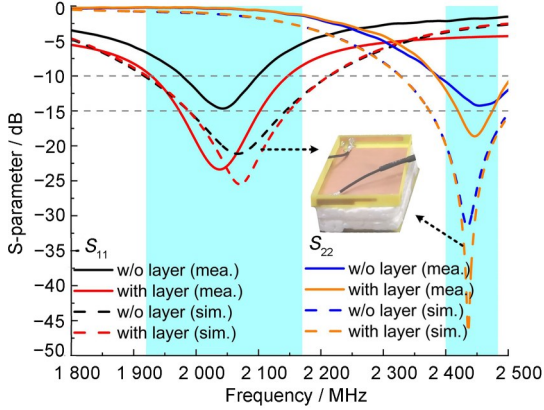


图2 智能手表天线的辐射性能
Fig.2 Radiation performance of smartwatch antenna

由图2可知,智能手表天线 S_{11} 低于 -10 dB 的带宽覆盖 $1920\sim 2212$ MHz,满足4G通信的使用需求;而 S_{22} 低于 -15 dB 的带宽达 $2373\sim 2503$ MHz,满足Wi-Fi与蓝牙的使用需求。加载超材料防护层后,所提出天线的工作带宽和谐振频率基本维持不变,而匹配深度显著降低。在FDD-LTE Band1目标频段内, S_{11} 的匹配深度由约 -21 dB 降低至约 -25 dB;在 2.4 GHz Wi-Fi/蓝牙目标频段内, S_{22} 的匹配深度由约 -31 dB 降低至约 -48 dB。实测结果同样表明,在加载超材料防护层后,智能手表天线在目标频段内的带宽覆盖和匹配深度均得到明显改善。

1.2 儿童人体电磁模型构建

为了分析儿童使用智能手表时,各个器官组织对辐射剂量的吸收程度,评估智能手表对儿童辐射影响,本文参考中国未成年人人体尺寸标准^[20],建立6岁男童人体电磁模型,并构建易受辐射影响的重要器官组织,如图3所示。儿童人体电磁模型身高为 110.6 cm,包括脑、眼、甲状腺和心脏4种重要人体器官。根据儿童手表的实际使用场景,本文中智能手表置于模型的左手手腕上方,左手置于头部前方。

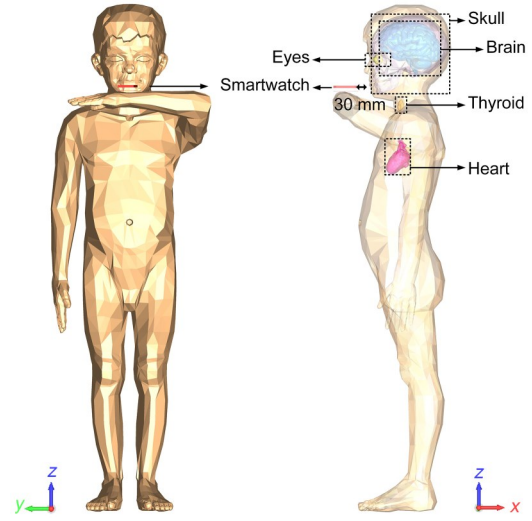


图3 儿童人体电磁模型
Fig.3 Electromagnetic model of the child's body

1.3 年龄相关的生物组织的介电参数计算

在 6 GHz 以下的电磁剂量学研究中,一般使用比吸收率(Specific energy absorption rate, SAR)作为评估人体暴露于电磁场时能量吸收程度的关键指标,其定义为每单位质量生物组织所吸收的功率,计算公式见式(1)。

$$SAR = \frac{\sigma |\mathbf{E}|^2}{\rho} \quad (1)$$

式中: σ 为组织电导率; \mathbf{E} 为组织内电场强度; ρ 为组织质量密度。

生物组织的复相对介电常数表示为式(2)。

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon' - j \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} = \varepsilon' \left(1 - j \frac{1}{2\pi f \tau} \right) \quad (2)$$

式中: ε' 是相对介电常数的实部; ε'' 是虚部; ε_0 为自由空间介电常数; $\tau = \varepsilon_0 \varepsilon / \sigma$ 为组织的弛豫时间常数。

τ 随年龄变化较小, Malik 等^[21] 基于 Peyman 等的实验数据^[22-23], 通过综合多种组织类型和年龄的 τ 平均值, 提出了儿童 τ_{ch} 与成人 τ_A 的近似关系: $\tau_{ch} = 0.94\tau_A$ 。

ε' 随年龄的变化依赖于含水量, 可以用 Lichtenecker 指数定律来描述(式(3))。

$$\varepsilon' = \varepsilon'_w{}^\alpha \cdot \varepsilon'_T{}^{1-\alpha} \quad (3)$$

式中: ε'_w 和 ε'_T 分别是自由水和有机组织相对介电常数的实部。 $\alpha = TBW \cdot \rho$ 表示水合率, 其中 TBW 为全身水(单位: L), 可通过年龄 A (单位: 岁)、体重 M (单位: kg) 和身高 H (单位: cm) 预测(式(4))。

$$\ln(\text{TBW})=C+0.551 \times \ln(M)+0.796 \times \ln(H)+0.008 \times A \quad (4)$$

式中： C 为常数，男性为-2.952，女性为-2.999。

综合以上，儿童组织的相对介电常数 ε_{ch} 可由式(5)计算得出。

$$\varepsilon_{\text{ch}} = \varepsilon_{\text{w}}^{\frac{\alpha_{\text{ch}} - \alpha_{\text{A}}}{1 - \alpha_{\text{A}}}} \cdot \varepsilon_{\text{A}}^{\frac{1 - \alpha_{\text{ch}}}{1 - \alpha_{\text{A}}}} \quad (5)$$

式中： α_{ch} 和 α_{A} 分别为儿童组织和成人组织的水合

率； ε_{A} 为成人组织的相对介电常数。

根据Gabriel提出的四阶Cole-Cole模型^[24]，计算得到2 045 MHz和2 450 MHz频率下成人人体模型中各组织的相对介电常数和电导率。基于上述公式，进一步推算出6岁男童各组织的相对介电常数和电导率。其中躯干组织的相对介电常数、电导率取皮肤、血液、肌肉和骨骼的计算平均值^[25]。结果如表1所示。

表1 儿童组织的介电参数
Table 1 Dielectric properties of child's tissues

人体组织 Human tissues	密度 / (kg·m ⁻³) Density	2 045 MHz		2 450 MHz	
		ε	$\sigma / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	ε	$\sigma / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$
躯干 Trunk	1 297	40.583	1.410	40.101	1.635
大脑 Cerebrum	1 045.5	41.854	1.307	41.272	1.545
小脑 Cerebellum	1 045	45.580	1.968	44.811	2.235
颅骨 Skull	1 575	11.631	0.339	11.387	0.420
眼 Eyes	1 004.5	68.450	2.325	68.210	2.636
甲状腺 Thyroid	1 050	57.788	1.771	57.205	2.094
心脏 Heart	1 080.8	55.713	2.068	54.819	2.400

2 结果与讨论

本研究通过仿真，得到加载超材料防护层前后，智能手表天线在0.01 W的发射功率下，工作在

4 G通信频点(2 045 MHz)、Wi-Fi及蓝牙频点(2 450 MHz)时儿童的电磁辐射暴露情况。将儿童不同组织的局部SAR峰值及全身平均SAR与ICNIRP公众暴露限值对比，结果如表2所示。

表2 儿童各组织的局部SAR峰值和全身平均SAR(单位：W/kg)
Table 2 Peak local SAR value of different tissues and whole-body average SAR in child (Unit: W/kg)

频率 Frequency	有/无超材料防护层 With/without metamaterial protective layer	颅骨 Local skull	脑 Local brain	眼 Local eyes	甲状腺 Local thyroid	心脏 Local heart	四肢 Local limb	全身平均 Whole-body average
2 045 MHz	无 Without	5.519×10^{-3}	7.495×10^{-4}	1.878×10^{-3}	2.501×10^{-4}	5.959×10^{-5}	8.494×10^{-2}	1.548×10^{-4}
	有 With	4.349×10^{-3}	6.057×10^{-4}	1.548×10^{-3}	2.051×10^{-4}	5.211×10^{-5}	6.970×10^{-2}	1.284×10^{-4}
2 450 MHz	无 Without	8.645×10^{-3}	1.084×10^{-3}	3.942×10^{-3}	6.643×10^{-4}	1.990×10^{-5}	1.172×10^{-1}	1.978×10^{-4}
	有 With	6.667×10^{-3}	8.304×10^{-4}	3.155×10^{-3}	5.182×10^{-4}	1.417×10^{-5}	9.300×10^{-2}	1.580×10^{-4}
ICNIRP 公众限值 ICNIRP general public restriction		头部/躯干 Local head/torso: 2.000					4.000	0.080

由表2可知，当儿童佩戴智能手表，且智能手表天线工作在2 450 MHz时，头部和颈部各器官组织的最大SAR值均高于工作在2 045 MHz时的数值；同时，全身平均SAR值也呈现相同趋势。

在智能手表天线的全部工作频段中，儿童身体SAR值最大的部位都出现在四肢。在加载超材料防护层且天线工作于2 450 MHz时，该部位最大

SAR值为 9.300×10^{-2} W/kg，约为ICNIRP限值的2.3%，全身平均SAR最大值为 1.580×10^{-4} W/kg，约为ICNIRP限值的0.2%。其次为颅骨与眼部，因靠近体表且距离暴露源较近，在同等条件下，二者最大SAR值分别为 6.667×10^{-3} W/kg与 3.942×10^{-3} W/kg，分别相当于ICNIRP限值的0.3%和0.2%。脑组织由于有颅骨的保护，甲状腺距离颈部皮肤表面有

一定距离,因此二者的最大SAR值均低于ICNIRP限值的0.05%。心脏在躯干的深处,且距离暴露源最远,因此在几种器官组织中,心脏中的SAR最低,最大值仅为ICNIRP限值的0.0007%。

由对比结果可知,加载超材料防护层后,儿童全身各器官组织中的SAR值均呈现下降趋势。全身平均SAR的最大降幅为20.1%。在SAR最大的四肢处,最大降幅为20.7%。在体内各组织中,心脏中的改善最为显著,最大降幅达28.8%。此外,其他

组织的SAR值降幅在17.6%之上。上述结果表明,加载超材料防护层可有效降低所设计智能手表天线对人体的辐射暴露水平。考虑到智能手表会长期近距离接触皮肤,本文提出的基于改进暴露源的主动防护方法能进一步减少因长期佩戴智能手表引起的辐射剂量累积效应。

儿童模型全身和各个器官组织的SAR分布分别如图4~5所示。

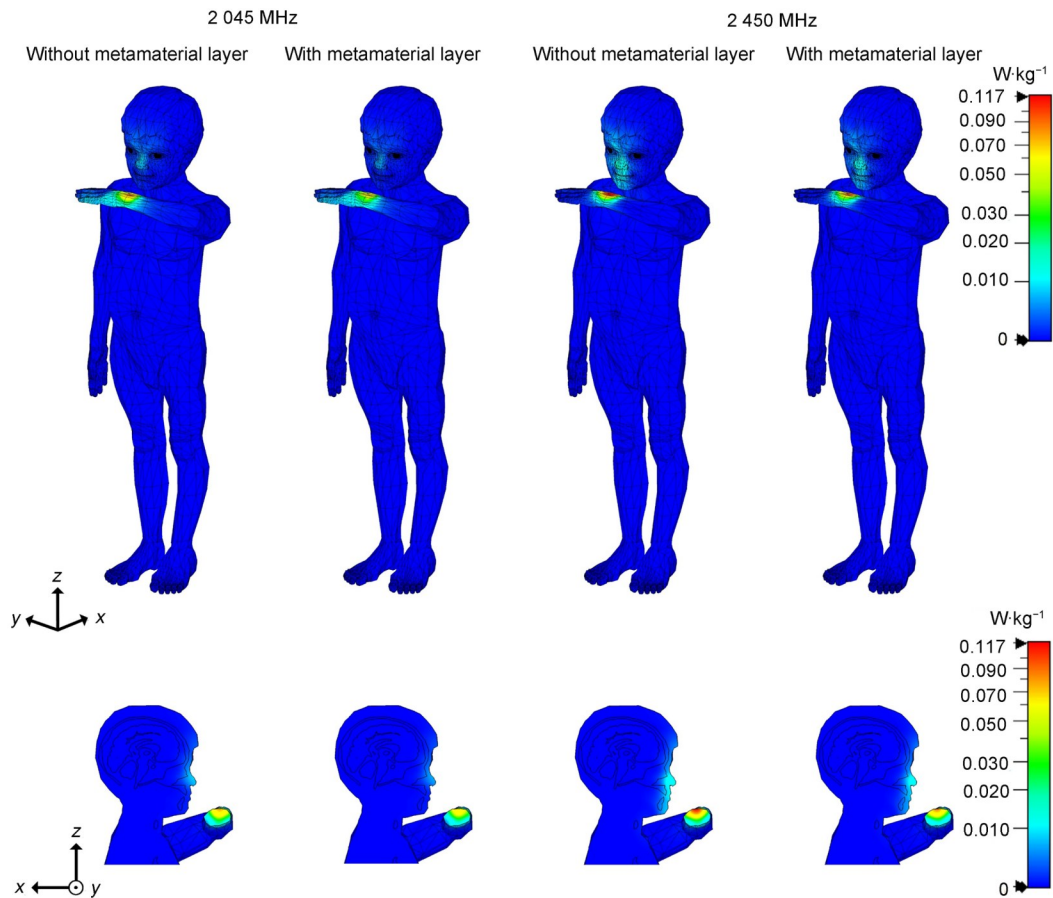


图4 全身SAR分布
Fig.4 Whole-body SAR distribution

由图4可知,在所有暴露场景下,儿童体内SAR主要分布在距离智能手表最近的手腕以及面部口鼻区域,整个手腕区域的SAR普遍高于0.01 W/kg。当天线工作频率为2 045 MHz时,手腕表面的辐射能量分布范围较广;而在2 450 MHz频率时,分布则较为集中。加载超材料防护层后,手臂和面部SAR超过0.01 W/kg的面积有所减少,在手腕区域,SAR超过0.07 W/kg的面积显著减少。

由图5可知,加载超材料防护层后,各组织中辐射剂量最大的区域都明显减小。颅骨中,电磁辐射

主要分布在面部,加载超材料防护层后,电磁辐射剂量最高的区域明显减少,仅集中分布于鼻骨附近。脑部和眼部中电磁辐射剂量最高的区域,在天线工作在2 450 MHz时,其主要分布SAR值都明显降低,分别从 8×10^{-4} W/kg降至 6×10^{-4} W/kg,以及从 3×10^{-3} W/kg降至 2×10^{-3} W/kg。甲状腺中电磁暴露区域分布均匀,加载超材料防护层对该区域的暴露剂量均有显著降低。心脏中,SAR最大值主要集中在心脏靠近暴露源的部分。加载超材料防护层后,心脏内SAR值大于 3×10^{-5} W/kg的区域显著缩小。

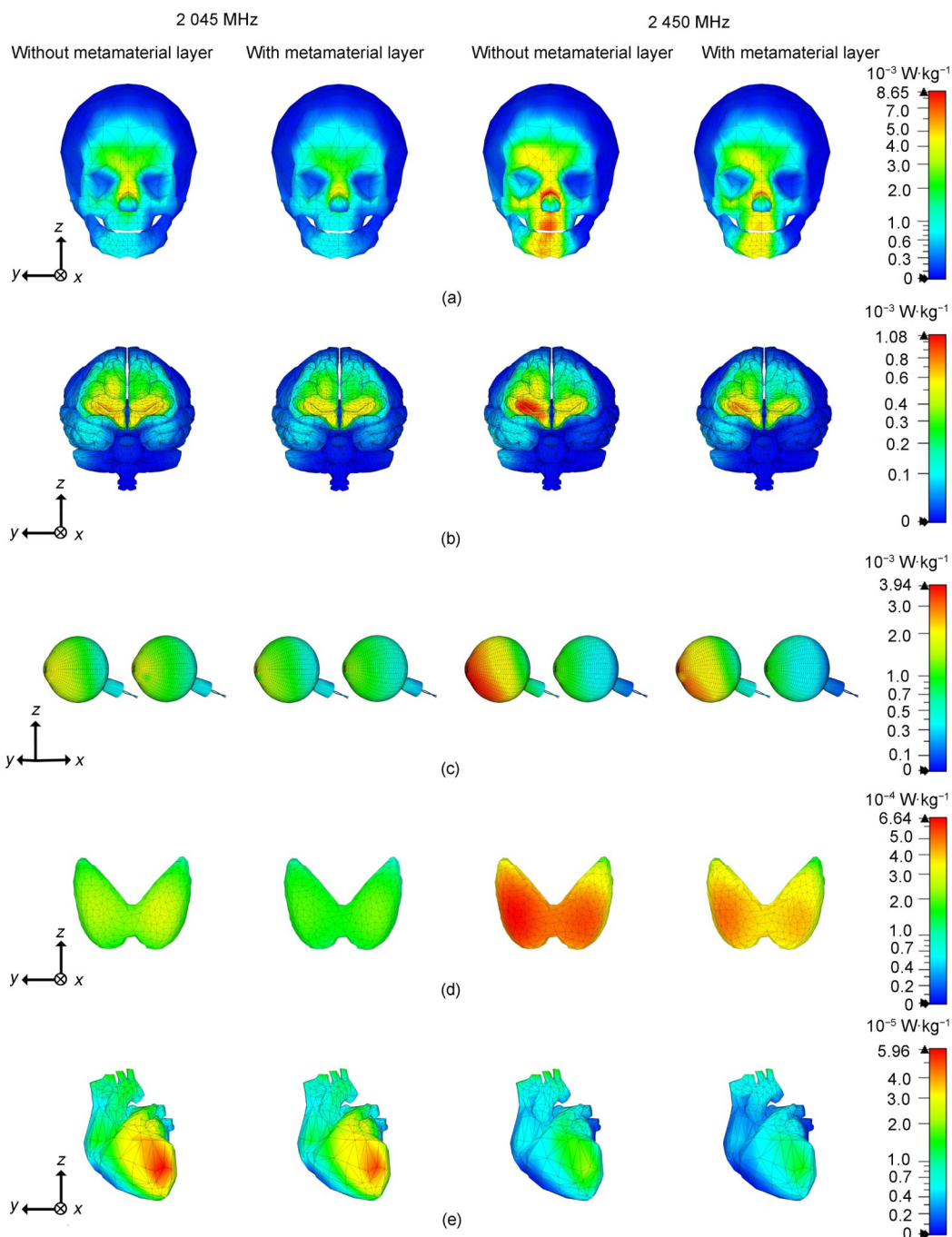


图5 不同组织的SAR分布:(a)颅骨;(b)脑部;(c)眼部;(d)甲状腺;(e)心脏

Fig.5 SAR distribution in various tissues: (a) skull; (b) brain; (c) eyes; (d) thyroid; (e) heart

3 结论

本文提出一种电磁辐射主动防护方法,通过对比分析有无超材料防护层时,6岁儿童佩戴智能手表吸收的电磁辐射剂量变化情况,验证所提出方法的防护效果。研究表明,在智能手表天线的所有工作频段中,电磁辐射能量都主要集中于智能手表天线下方的手腕区域以及靠近暴露源的面部。在加载超材料防护层之后,全身平均

SAR最大下降幅度达20.1%,其中,受到辐射影响最大的手腕处组织SAR值下降了20.7%;儿童体内的器官组织中,心脏组织的SAR值降幅最为显著,达28.8%,其他组织的SAR值降幅在17.6%之上,且每种组织中辐射能量最高区域的面积也能明显减小。上述表明,本文提出的主动防护方法可有效降低智能手表天线对人体的辐射暴露水平。本研究可为儿童智能手表天线的设计与优化,及儿

童电磁辐射防护提供新的思路。

作者贡献声明 侯文祺负责研究调查、模型创建、数据分析、可视化、及论文初稿的撰写；周文颖提出了研究意义、整体研究框架、研究方法，并负责资金获取、管理监督、及论文的审阅和修订；逯迈负责论文指导及最终审校。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 王思雨. 小学生社交媒体使用、准社会交往、孤独感与学业倦怠的关系研究[D]. 杭州: 浙江传媒学院, 2024.
WANG Siyu. A study on the relationship between social media use, parasocial interaction, loneliness, and academic burnout among primary school students[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Media and Communications, 2024.
- 姚家俊. 智能手表电磁辐射 SAR 仿真计算及实测[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
YAO Jiajun. Simulation calculation and actual measurement of smartwatch electromagnetic radiation SAR[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- Stewart W. Mobile phones and health (The Stewart Report)[R]. Chilton, UK: Independent Expert Group On Mobile Phones, 2000: 1-167.
- IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Non-ionizing radiation, Part 2: radiofrequency electromagnetic fields[M]. Lyon: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, 2013.
- Byun Y H, Ha M N, Kwon H J, *et al.* Mobile phone use, blood lead levels, and attention deficit hyperactivity symptoms in children: a longitudinal study[J]. PLoS One, 2013, **8**(3): e59742. DOI: 10.1371/journal.pone.0059742.
- Kim J, Hwang Y, Kang S, *et al.* Association between exposure to smartphones and ocular health in adolescents [J]. Ophthalmic Epidemiology, 2016, **23**(4): 269-276. DOI: 10.3109/09286586.2015.1136652.
- Foerster M, Thielens A, Joseph W, *et al.* A prospective cohort study of adolescents' memory performance and individual brain dose of microwave radiation from wireless communication[J]. Environmental Health Perspectives, 2018, **126**(7): 077007. DOI: 10.1289/ehp2427.
- Davis D, Birnbaum L, Ben-Ishai P, *et al.* Wireless technologies, non-ionizing electromagnetic fields and children: Identifying and reducing health risks[J]. Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care, 2023, **53**(2): 101374. DOI: 10.1016/j.cppeds.2023.101374.
- Zufry H, Rudijanto A, Soeatmadji D W, *et al.* Effects of mobile phone electromagnetic radiation on thyroid glands and hormones in Rattus norvegicus brain: an analysis of thyroid function, reactive oxygen species, and monocarboxylate transporter 8[J]. Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research, 2023, **14**(2): 63-68. DOI: 10.4103/japtr.japtr_680_22.
- Abtin S, Seyedaghamiri F, Aalidaeijavadi Z, *et al.* A review on the consequences of molecular and genomic alterations following exposure to electromagnetic fields: Remodeling of neuronal network and cognitive changes [J]. Brain Research Bulletin, 2024, **217**: 111090. DOI: 10.1016/j.brainresbull.2024.111090.
- Eker E D, Arslan B, Yildirim M, *et al.* The effect of exposure to 1 800 MHz radiofrequency radiation on epidermal growth factor, caspase-3, Hsp27 and p38MAPK gene expressions in the rat eye[J]. Bratislava Medical Journal, 2018, **119**(9): 588-592. DOI: 10.4149/blj_2018_106.
- Adebayo E A, Adeeyo A O, Ogundiran M A, *et al.* Bio-physical effects of radiofrequency electromagnetic radiation (RF-EMR) on blood parameters, spermatozoa, liver, kidney and heart of albino rats[J]. Journal of King Saud University - Science, 2019, **31**(4): 813-821. DOI: 10.1016/j.jksus.2018.11.007.
- Bonato M, Dossi L, Chiaramello E, *et al.* Human RF-EMF exposure assessment due to access point in incoming 5G indoor scenario[J]. IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology, 2021, **5**(3): 269-276. DOI: 10.1109/jerm.2020.3042696.
- Lee A K, Choi H D. Dosimetric assessment in the brain for downlink EMF exposure in Korean mobile communication networks[J]. Environmental Research, 2023, **234**: 116542. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116542.
- Karatsi I, Bakogianni S, Koulouridis S. SAR and thermal distribution of pregnant woman and child inside elevator cabin[J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2023, **15**(2): 213-226. DOI: 10.1017/s1759078722000253.
- Wang J, Fujiwara O, Watanabe S. Approximation of aging effect on dielectric tissue properties for SAR

- assessment of mobile telephones[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2006, **48**(2): 408-413. DOI: 10.1109/temc.2006.874085.
- 17 Fiocchi S, Parazzini M, Ravazzani P. RFID system for newborn identity reconfirmation in hospital: Exposure assessment of a realistic newborn model and effects of the change of the dielectric properties with age[J]. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2011, **107**(3): 443-448. DOI: 10.1016/j.pbiomolbio.2011.09.019.
- 18 Mohammed B, Jin J, Abbosh A M, *et al.* Evaluation of children's exposure to electromagnetic fields of mobile phones using age-specific head models with age-dependent dielectric properties[J]. *IEEE Access*, 2017, **5**: 27345-27353. DOI: 10.1109/access.2017.2767074.
- 19 Huang H S, Su H L, Chen S L. Multiband antennas for GPS/GSM1800/Bluetooth/Wi-Fi smart watch applications [C]. 2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM). Kumamoto, Japan: IEEE, 2017: 352-354. DOI: 10.1109/compem.2017.7912745.
- 20 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 中国未成年人人体尺寸: GB/T 26158—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. National Standardization Administration. Human dimensions of Chinese minors: GB/T 26158—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- 21 Malik S J, Hand J W, Carmichael D W, *et al.* Evaluation of specific absorption rate and heating in children exposed to a 7T MRI head coil[J]. *Magnetic Resonance in Medicine*, 2022, **88**(3): 1434-1449. DOI: 10.1002/mrm.29283.
- 22 Peyman A, Rezazadeh A A, Gabriel C. Changes in the dielectric properties of rat tissue as a function of age at microwave frequencies[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2001, **46**(6): 1617-1629. DOI: 10.1088/0031-9155/46/6/303.
- 23 Peyman A, Holden S J, Watts S, *et al.* Dielectric properties of porcine cerebrospinal tissues at microwave frequencies: in vivo, in vitro and systematic variation with age[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2007, **52**(8): 2229-2245. DOI: 10.1088/0031-9155/52/8/013.
- 24 Gabriel C, Gabriel S, Corthout E. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 1996, **41**(11): 2231. DOI: 10.1088/0031-9155/41/11/001.
- 25 李致远, 逯迈. 5G 基站天线的人体电磁剂量学研究[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2025, **43**(4): 040601 DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0015.
LI Zhiyuan, LU Mai. Electromagnetic dosimetry research on the human body for 5G base station antennas[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2025, **43**(4): 040601 DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0015.