

毫米波 5G 天线阵列电磁暴露剂量学分析

杜玥 逯迈 谢圭煜

(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 针对5G毫米波通信中移动终端天线的电磁暴露安全问题,设计了一款工作于24.9 GHz的紧凑型高增益相控阵天线,并基于ICNIRP 2020标准对其电磁暴露水平进行了系统评估。研究采用COMSOL Multiphysics仿真平台,通过设计微带贴片单元与超表面结构的1×4线性阵列,实现了14 dBi增益和60°波束覆盖范围。电磁暴露评估结果表明:在15 dBm、18 dBm和23 dBm三种输入功率下,入射功率密度(Sinc)峰值分别为6.571 W/m²、12.937 W/m²和41.068 W/m²,吸收功率密度(Sab)峰值分别为3.761 W/m²、7.404 W/m²和23.503 W/m²,其中23 dBm输入时Sinc和Sab分别超过ICNIRP限值(31.1 W/m²和20 W/m²);热效应分析显示所有场景下最高温升为0.430 °C(23 dBm时头皮层),远低于2 °C安全阈值。研究通过多端口独立馈电验证了相位调控对波束扫描的可行性,为5G毫米波移动终端的电磁安全设计提供了重要参考依据。

关键词 毫米波, 5G, 天线阵列, 电磁暴露, ICNIRP

中图分类号 TN929.53

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0040

CSTR: 32195.14.JRRRP.1000-3436.2025-0040

引用该文:

杜玥, 逯迈, 谢圭煜. 毫米波5G天线阵列电磁暴露剂量学分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, 43(6): 060501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0040.

DU Yue, LU Mai, XIE Guiyu. Dosimetric analysis of electromagnetic exposure by millimeter-wave 5G antenna arrays[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(6): 060501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0040.



Dosimetric analysis of electromagnetic exposure by millimeter-wave 5G antenna arrays

DU Yue LU Mai XIE Guiyu

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

ABSTRACT This study investigated the safety of electromagnetic exposure by mobile-terminal antennas in 5G millimetre-wave communications. A compact, high-gain phased-array antenna operating at 24.9 GHz was designed and its electromagnetic exposure levels were systematically evaluated against the ICNIRP 2020 guidelines. Using COMSOL Multiphysics simulation platform, a 1 × 4 linear array composed of microstrip patch elements coupled to

基金资助: 国家自然科学基金(52467026)和甘肃省教育厅项目(2024CXPT-11)

第一作者: 杜玥, 女, 1999年5月出生, 2024年硕士毕业于兰州交通大学, 主要研究方向为5G通信电磁暴露安全评估

通信作者: 逯迈, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: mai.lu@hotmail.com

收稿日期: 初稿 2025-05-15; 修回 2025-06-26

Supported by the National Nature Science Foundation of China (52467026) and the Department of Education of Gansu Province (2024CXPT-11)

First author: DU Yue (female) was born in May 1999, and obtained her master's degree from Lanzhou Jiaotong University in 2024, main research direction is safety assessment of electromagnetic exposure in 5G communication

Corresponding author: LU Mai, doctoral degree, professor, doctoral supervisor, E-mail: mai.lu@hotmail.com

Received 15 May 2025; accepted 26 June 2025

a metasurface layer was designed, achieving 14 dBi realised gain and 60° beam-steering coverage. The electromagnetic exposure assessment demonstrates that for the input powers of 15 dBm, 18 dBm, and 23 dBm, the peak incident power densities (Sinc) were 6.571 W/m², 12.937 W/m², and 41.068 W/m², respectively, while the corresponding peak absorbed power densities (Sab) reached 3.761 W/m², 7.404 W/m², and 23.503 W/m². For the 23 dBm case, both Sinc and Sab exceed the ICNIRP general-public limits of 31.1 W/m² and 20 W/m². Thermal analysis revealed a maximum temperature rise of 0.43 °C in the scalp under the 23 dBm scenario, well below the 2 °C safety threshold. By employing multi-port independent excitation, the study verified the feasibility of phase-controlled beam steering, providing a key reference for electromagnetic-safety-oriented design of 5G millimetre-wave mobile terminals.

KEYWORDS Millimeter wave, 5G, Antenna array, Electromagnetic exposure, ICNIRP

CLC TN929.53

随着移动数据流量的迅速增长,更大的容量需求促使第五代移动通信系统(5G)追求更高的数据速率。由于5G在6 GHz以下频段的可用频谱资源非常有限,全球掀起了利用毫米波的巨大带宽以实现高速数据传输的浪潮^[1-3]。分配给毫米波的频段覆盖范围之广,涵盖6 GHz以上至几十GHz。2019年5月14日,欧盟委员会通过一项重要决议,统一规划24.25~27.5 GHz(或26 GHz)频段的频谱资源,旨在为第五代移动通信系统中毫米波5G技术的商业化应用奠定了关键基础^[4]。

由于毫米波频段的信号具有高路径损耗的特征,因此需要采用高增益天线来克服传输损耗问题^[5],可通过组成天线阵列来实现这一目标。一般来说,当天线阵列中单元数量翻倍时,增益大约增加3 dB。此外,随着频率的增加,天线尺寸变小,从而满足天线阵列的空间约束条件。同时,由于天线阵列产生的波束具有高度方向性,因此,需要波束成形技术来扩大波束覆盖范围^[6-7]。波束成形技术通常采用相控阵^[8]或者使用微波开关切换子阵列来实现^[9]。

在新兴的毫米波频段,常用的天线类型包括微带贴片天线^[10-12]和缝隙天线^[13]。然而,微带贴片天线由于重量轻、尺寸小、制造方便以及相对较宽的波束宽度等优点,更适合需要更宽覆盖区域的应用,特别在个人无线移动通信领域中得到了广泛应用^[14]。

在毫米波5G技术推进高速应用时,移动终端用户虽已受益于超高速数据传输服务,但移动智能设备产生的射频电磁暴露可能会引发潜在的生物效应,这一现象仍然不容小觑^[15]。自2011年世界卫生组织发布了一份报告^[16],指出用户患癌症的风险可能与手机设备的电磁辐射存在关联后,

关于手机电磁辐射所引发的健康问题成为了生物电磁学领域的研究热点。长期过度暴露于毫米波5G手机天线产生的射频电磁场中可能会导致组织损伤或其他不良健康后果,因此对其进行电磁暴露水平合规性评估至关重要,是保护人类免受过度电磁场(EMF)暴露影响的基本程序之一^[17]。在射频电磁环境中,生物组织吸收电磁能量并将其转化为热能的热效应占主导地位。为了量化热效应的程度,国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)^[18]和电气与电子工程师协会(IEEE)^[19]率先构建了电磁辐射防护框架,基于最新科研成果更新了无线设备暴露限值规范,二者共同形成了当前最具权威性的电磁暴露安全评估体系,其中典型的电磁暴露评估指标如比吸收率(SAR)、电磁场强度和功率密度(PD)是量化组织温升的近似替代物^[20]。

根据ICNIRP 2020标准^[18]可知,当频率低于6 GHz时,主要电磁暴露评估标准为磁感应强度、感应电场强度以及SAR,目前学术界已对6 GHz以下电磁暴露可能产生的生物效应开展了广泛研究。例如,白伟江等^[21]利用仿真软件COMSOL模拟电磁安检门的工作环境,计算人体模型中的磁感应强度与感应电场强度,并与ICNIRP公众暴露限值27 μT和874.8 mV/m进行了比较。当频率大于6 GHz时,主要电磁暴露评估标准从SAR变为PD。这是因为在毫米波频率下,射频电磁波在人体组织中的穿透深度非常有限,其超过90%能量被人体表皮组织吸收。随着电磁场频率的增加,人体组织受到的电磁暴露和由此产生的加热效应更加局限于组织表面,SAR与组织温度升高之间的相关性逐渐减弱,此时SAR在评估射频电磁能量吸收水平时已显现局限性。为避免SAR因深层

组织平均化而低估局部风险, ICNIRP 在 2020 版本标准中进行了更新, 确立吸收功率密度(S_{ab})作为射频电磁暴露环境中的核心基本限值。鉴于 S_{ab} 在活体组织中的实测障碍, 该标准同步设定入射功率密度(S_{inc})作为新的参考水平。基于 S_{inc} 的评估方法不依赖于组织中的场分布和功率吸收, 而仅与向组织传播的功率密度有关, 故 S_{inc} 可通过实际测量获得。根据 ICNIRP 2020 标准可知, 24.9 GHz 下 S_{ab} 基本限值为 20 W/m^2 , S_{inc} 参考水平为 31.1 W/m^2 。在此基础上, 学术界目前已针对 S_{inc} 与生物组织温度变化的内在关联展开系列探究^[22-25]。此外, 有文献研究了用于计算 PD 的 4 cm^2 投影面积的近似替代方法^[26-27], 有文献则回顾了 6 GHz 以上电磁暴露剂量学研究的相关内容^[28-30]。

尽管在毫米波移动天线设计方面广大学者已经进行了广泛的研究, 但目前仍缺乏针对毫米波段天线电磁暴露水平的剂量学研究。一些文献关注于设计高增益毫米波天线, 而没有考虑其产生的电磁暴露水平是否超过国际标准安全限值。此外, 还有一些研究仅考虑天线的电磁暴露水平, 而忽略了实际天线设计的性能要求。针对手机天线电磁暴露对生物体的影响, 国内外学者开展了广泛研究: 薛一哲等^[31]研究了 5G 手机射频辐射对成年雄性小鼠精子质量和性激素水平的影响。康刚等^[32]利用时域有限差分法对移动通信中广泛应用的单极手机天线在 700 MHz 下的空间辐射特性与对人体产生的电磁暴露水平进行了模拟仿真。于利娟^[33]研究了单频和双频平面倒 F 天线的辐射特性以及性能影响因素, 并分析了平面倒 F 天线作为手机天线的优缺点。Miura 等^[34]研究了当人体同时暴露于 2 GHz 的倒 F 天线和 28 GHz 的贴片天线阵列时的温升叠加情况, 并对不同 SAR 值和吸收功率密度比例下的温升水平进行了评估。左胜等^[35]研究了一种结合有限元区域分解法与并行计算技术的高效计算方法, 该方法可以用于计算手机天线电磁辐射下的人体局部 SAR 值。陈登鹏等^[36]针对手机天线在不同输入功率以及 4 种工作频率下的情况, 研究了多频段 5G 手机天线电磁辐射对人体头部 SAR 和温度场分布的影响。

考虑到手机天线的辐射功率显著制约着 5G 蜂窝网络的性能极限, 这可能对 5G 蜂窝系统的未来发展产生决定性影响, 因此, 关注手机天线的最大辐射功率以确保其不会对人体电磁暴露水平以及 5G 蜂窝系统性能造成潜在不良影响非常重要。

3GPP 标准中手机天线的有效全向辐射功率(EIRP)的安全限制被严格限定为 23 dBm^[37]。而文献[38]显示, 为满足 ICNIRP 标准和 FCC 标准中的安全限值, 预计移动设备在 6~10 GHz 以上频率工作时的最大输入功率分别为 18 dBm 和 15 dBm。因此, 本研究重点考虑了手机天线的 3 种输入功率: 15 dBm、18 dBm 和 23 dBm。

当手机处于语音通话位置时, 通常位于脸颊侧方且处于倾斜状态, 对人体头部组织电磁暴露水平的影响相较于其他组织而言更大。而文献[39]显示, 无论频率、阵列中元件间距和激励大小如何变化, 手机处于倾斜状态时产生的暴露水平均较低, 由此可知, 可以省略对手机处于该状态时的测试。因此, 本研究主要为手机天线最大发射功率和端口相位对人体头部组织吸收电磁暴露水平的影响。

针对移动终端设备近距离应用场景, 考虑到电磁暴露现象主要出现于反应性近场区域, 首先基于 COMSOL Multiphysics 三维多物理场仿真平台, 设计了一款毫米波 5G 相控阵天线阵列, 并系统性分析了该款手机天线阵列的远场辐射特性; 其次通过计算 S_{inc} 以及 S_{ab} 两种电磁暴露剂量参数, 开展了相关剂量学分析, 利用电磁-热耦合功能量化研究了毫米波 5G 天线阵列辐射下人体头部组织的电磁暴露水平; 最终重点模拟了人体头部组织温度场分布情况, 分析了人体头部组织局部温升以及 SAR 的联系, 并将上述所有结果与 ICNIRP 安全标准中的基本限值与参考水平进行比较, 用以判断该款手机天线工作时产生电磁暴露剂量的合规性, 来验证毫米波 5G 移动通信技术的安全性和可靠性。

1 材料与方法

1.1 天线模型

微带天线辐射贴片单元在拓扑构型选择上具有高度灵活性, 本研究选定矩形结构作为核心辐射单元, 辐射贴片长度和宽度可以通过以式(1)~(5)求解^[40]。

$$W = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2} \quad (2)$$

$$\Delta L = \frac{0.412h(\varepsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

$$L_{\text{eff}} = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \quad (4)$$

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L \quad (5)$$

式中： W 是辐射贴片宽度； c 是真空中光速； f_0 是天线谐振频率； ε_r 是介质基板相对介电常数； ε_{eff} 是介质基板有效介电常数； h 是介质基板厚度； L_{eff} 是有效长度； ΔL 是等效辐射间隙长度； L 是辐射贴片长度。由于上述公式是工程设计中的经验公式，后续还需进行参数扫描以优化贴片的尺寸。

本研究所设计的天线主要由介质基板、辐射贴片、1/4 波长阻抗变换器和接地平面组成。其中，介质基板选择 Roger RT/Duroid 5880 高频板材（相对介电常数 $\varepsilon_r = 2.2$ ；损耗正切 $\tan \delta = 0.0009$ ），厚度 h 为 0.254 mm。为了降低仿真计算负载，辐射贴片和接地平面材料设置为理想电导体 (PEC)。由于移动设备内部空间有限，可使用超表面结构来实现天线的小型化^[41-42]。本研究的技术方案通过对天线本体结构进行扩展改进，采用另一介质基板

在天线原有结构基础上进行叠层加载，并在其表面构建 2×3 等间距阵列排布的矩形辐射单元，由此形成基础型周期排布超表面结构。为提升天线辐射性能，本研究将优化后的天线单元 (Ant 2) 按四端口独立馈电模式构建 1×4 线性阵列结构。阵列单元中心间距设定为 9 mm，并同时构建移动智能终端壳体模型。该壳体模型的主要材料为聚氯乙烯（相对介电常数 $\varepsilon_r = 2.96$ ，损耗角正切 $\tan \delta = 0.01$ ，电导率 $\sigma = 0.016 \text{ S/m}$ ）^[43]，几何尺寸为 147.5 mm×71.5 mm×7.85 mm，介质覆层厚度 2 mm。在此基础上，特别设置天线阵列布局于终端设备右上象限（位置基准参考文献[44]），辐射单元定向装配于背板侧，形成电磁波束背向辐射特性，以此降低天线对人体头部的电磁暴露水平。最终手机模型如图 1 所示，重点展示了天线阵列中辐射单元的结构、拓扑分布以及多馈电端口位置。

天线阵列利用多通道独立馈电机理，实现阵列单元工作相位的分立调节功能。依托阵列单元间的相位梯度分布特性，构建了支持波束扫描功能的相控阵天线结构。动态配置相位参数可精确调控辐射主瓣指向，扩展方位面覆盖范围，表 1 详细显示了不同端口的相位设置。

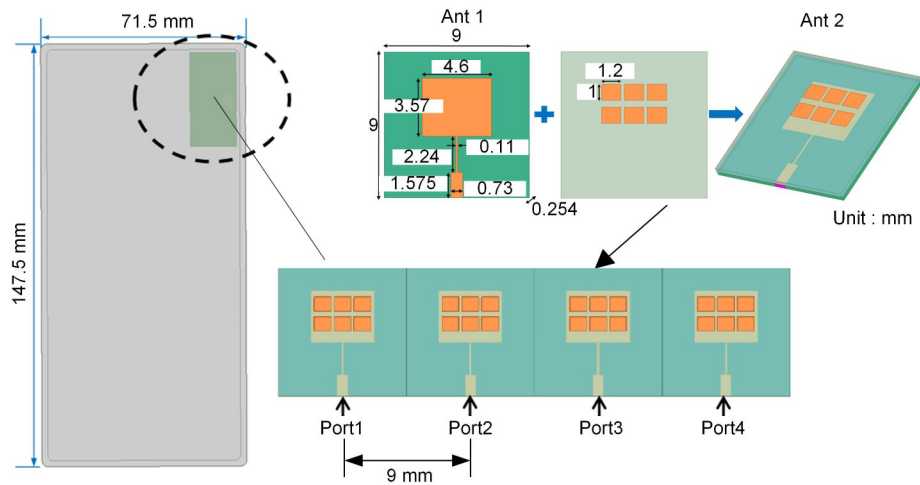


图 1 手机模型结构图

Fig.1 The structure of mobile model

表 1 不同端口相位设置
Table 1 Phase settings for different ports

端口名称	角度 1 / (°)	角度 2 / (°)	角度 3 / (°)
Port name	Degree 1	Degree 2	Degree 3
端口 1 Port 1	0	0	0
端口 2 Port 2	60	90	120
端口 3 Port 3	120	180	240
端口 4 Port 4	180	270	360

1.2 三层球形人头模型

针对人体头部组织结构的复杂性^[45],本研究基于文献[46]所提出的简易头部模型,构建具有不同介电特性的三层各向同性球体结构,如图2所示。该多层球体结构由外到内依次对应为皮肤层、颅骨层以及大脑层,其对应几何半径分别为92 mm、85 mm以及80 mm。在此基础上,本研究中人体头部各层组织采用介质均匀性假设,即在每个组织层内保持介电特性的空间一致性。生物组织内EMF传播主要受相对介电常数 ϵ_r 以及电导率 σ 等介电参数的影响,Gabriel团队针对典型生物组织介电参数随频率变化的特性开展了系统化研究,为生物效应电磁仿真提供关键参数^[47]。本研究采用

四阶 Cole-Cole 色散模型计算了人体头部各层组织的相对介电常数 ϵ_r 以及电导率 σ ,具体数值如表2所示。

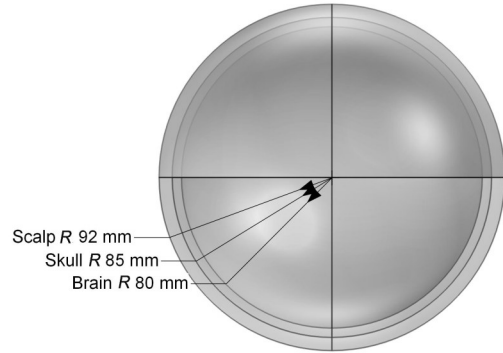


图2 三层球形人头模型
Fig.2 Three-layer spherical head model

表2 24.9 GHz下三层球形人头模型的介电性能
Table 2 The dielectric properties of three-layer spherical head model at 24.9 GHz

组织 Tissue	相对介电常数 ϵ_r Relative permittivity	电导率 $\sigma / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$ Conductivity	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ Density
头皮 Scalp	18.748 5	24.577 5	1 125
颅骨 Skull	8.013 8	8.231 2	1 990
大脑 Brain	20.283 5	23.603 5	1 038

1.3 电磁暴露剂量学分析

1.3.1 功率密度

ICNIRP 2020标准还提出了利用参考水平来量化辐射源电磁暴露水平以证明合规性的方法。在6~300 GHz频段内,引入 S_{inc} 作为新的参考水平。 S_{inc} 定义为复坡印廷矢量的模值,可由式(6)计算。

$$S_{\text{inc}} = |\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*| \quad (6)$$

式中: $\mathbf{H}^*$ 为复数值 $\mathbf{H}$ 的复共轭, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别代表电场矢量(V/m)和磁场矢量(A/m)。

此外,ICNIRP 2020标准规定,在6~300 GHz频段内,引入了新的剂量参数 S_{ab} 作为局部暴露的基本限值。 S_{ab} 定义为单位面积上的吸收功率,可由式(7)计算^[18]。

$$S_{\text{ab}} = \iint_A dx dy \int_0^{z_{\text{max}}} \rho(x, y, z) \cdot \text{SAR}(x, y, z) dz / A \quad (7)$$

式中:体表位于 $z=0$ 处, A 是 4 cm^2 的平均面积(m^2), z_{max} 是相应区域的体表深度(m)。

目前,国际标准中关于生物电磁剂量评估方法仍然存在理论空白,尚未对 S_{ab} 建立统一计算方法。针对人体非平面组织 S_{ab} 的计算,文献[48]创新性提出了4种算法,并将 z_{max} 定义为体表电场强度衰减至初始值0.1%的临界穿透深度。由于构建

的头部模型为非平面球状结构,依据文献[47]中提出的算法之一,通过 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 正方形平面对人体头部非平面组织进行投影映射。此外, z_{max} 对应完整人体头部组织的深度。最终用于计算人体头部组织 S_{ab} 的分割域结构如图3所示。

1.3.2 热剂量分析

为计算不同头部组织内部的温升,可采用 Pennes 生物传热方程,其具体形式如式(8)^[49]。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_{\text{met}} + Q_{\text{ext}} \quad (8)$$

式中: T 是组织温度; T_b 是血液温度; C 是组织比热容; k 是组织热导率; Q 是由代谢过程产生的热量; ω_b 是血液灌注率; ρ_b 是血液密度; C_b 是血液比热容; t 是时间。

本研究中生物传热研究聚焦于脑部组织的层间能量传递。基于上述简化条件,模型构建时设定人体头部组织的边界处于绝热状态,即在仿真计算中忽略脑组织表层与环境空气之间的热力学交互作用,其具体形式如式(9)^[50]。

$$n \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (9)$$

此外,在涉及生物传热计算中人体头部各层组织的热特性参数如表3所示。

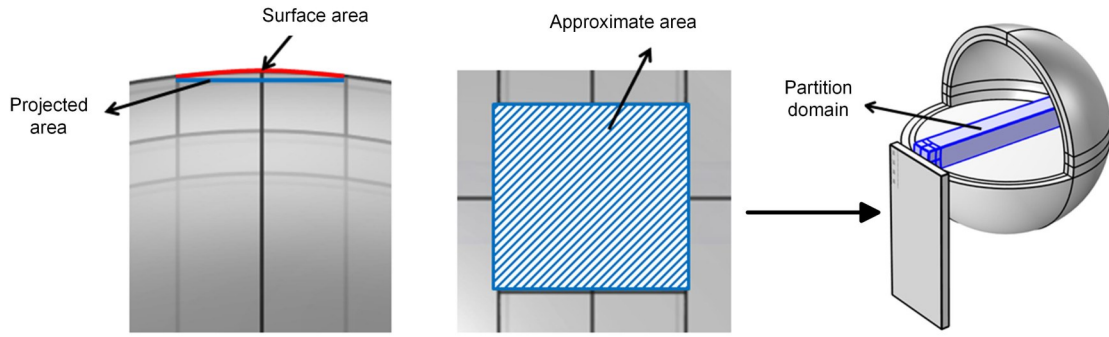


图3 用于计算 S_{ab} 的分割域结构图
Fig.3 Segmented domain structure diagram used for the calculation of S_{ab}

表3 人体头部模型中不同组织的热参数
Table 3 Thermal parameters of different tissues in the human head model

组织 Tissue	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$k / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	$C / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1})$	$Q / (\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$	ω_b / S^{-1}
头皮 Scalp	1 125	0.42	3 600	1 620	0.02
颅骨 Skull	1 990	0.37	3 100	610	0.000 463
大脑 Brain	1 038	0.53	3 650	7 100	0.008 83

1.4 仿真计算与方法验证

本研究中所有数值分析和计算过程均在基于有限元法 (FEM) 的多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 中进行。此外, 本研究还使用完美匹配层 (PML) 来截断整个模型周围的仿真计算域^[51]。

为验证 COMSOL 三维电磁仿真软件的可靠性, 本研究通过对文献[50]中提出的电磁模型以及仿真结果进行复现来达到目的。在仿真环境配置阶段, 手机模型处于语音通话位置, 竖直位于人体头部组织外侧且保持 10 mm 的间距, 其整体尺寸为 80 mm×55 mm×4 mm, 并设定手机天线输

入功率为 1 W, 中心工作频率为 900 MHz。经计算, 最终人体头部各层组织的 SAR 与原始文献数据的对比验证结果如表 4 所示。

经量化比对可知, 头皮层、颅骨层以及大脑层 SAR 的复现结果与原始数据的相对偏差率分别为 1.9%、5.8% 和 2.2%。出现差异的主要原因为文献[50]中采用了异质四层人头模型(含脂肪层), 与本研究建模存在差异。如表 4 所示, 数值复现结果与既有研究数据误差很小, 能够有效印证 COMSOL 软件中电磁模型构建的逻辑严谨性与数值求解的工程可信度。

表4 本研究计算 SAR 与参考文献[42]中 SAR 数值比较
Table 4 Comparison of the calculated SAR values in this work with those in Ref [42]

组织 Tissue	文献[43] / ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$) Ref. [43]	本研究 / ($\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$) This work	误差率 / % Error ratio
头皮 Scalp	1.58	1.55	1.9
颅骨 Skull	0.17	0.16	5.8
大脑 Brain	0.46	0.45	2.2

2 结果与讨论

2.1 天线辐射特性仿真分析

2.1.1 天线单元

通过对不同天线单元的特征参数进行仿真分析后可知, 天线 1 的谐振频率约为 26 GHz, 在谐振点处的 S_{11} 参数约为 -17 dB, -10 dB 带宽范围可

达到 25.76~26.22 GHz, 即 460 MHz。增加周期性结构后, 天线 2 的谐振频率约为 24.9 GHz, 在谐振点处的 S_{11} 参数约为 -24 dB, -10 dB 带宽范围可达到 24.66~25.17 GHz, 即 510 MHz, 比天线 1 增加了 50 MHz。由此可知, 天线 2 谐振频率相较于天线 1 向低频移动, 证明天线尺寸缩减实现了小型化; 在谐振点的 S_{11} 参数比天线 1 更低, 表明阻抗匹

配效果更好, 展现出更优性能。此外, 加入周期性结构后并未显著影响天线的辐射方向图。

目前, 已有几项研究展示了毫米波 5G 天线的设计工作。Jandi 等^[11]提出了一种用于 28 GHz 频段的矩形贴片天线。该天线尺寸为 $19\text{ m} \times 19\text{ m} \times 0.787\text{ m}$, 在 28 GHz 时实现了 8.03 dBi 的增益。Ali 等^[52]提出了一种采用同轴线馈电的小型化天线。该天线尺寸为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 0.254\text{ m}$, 在 28 GHz 频段实现了 6.6 dBi 的增益。此外, Amrutha 等^[53]提出了一种适用于 5G 应用的毫米波圆形缝隙贴片天线。该天线尺寸为 $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 0.508\text{ m}$, 在 28 GHz 时实现了 5.94 dBi 的增益。通过比较发现, 本研究设计的天线辐射单元可以在微型化的尺寸基础上实现更高的稳定增益, 满足手机天线的设计需求。

2.1.2 天线阵列

对天线 2 进行组阵后, 形成的阵列天线增益增加了 6.41 dB 在此基础上, 当天线阵列的所有端口相位相同且设置为零时, E 面与 H 面的远场辐射分布特征在一个平面上发生畸变。天线阵列主波束方向空间约束源于单元结构的一维排列, 最终导致主波束变化限定于方位角平面。

当天线阵列的不同馈电端口相位发生变化时, 天线阵列在 24.9 GHz 谐振点处的辐射特征随波束扫描角度动态变化。当扫描角度为 90° 时, 即天线阵列单元间馈电相位同步配置下, 主波束方向与阵列平面呈正交分布特征。在此基础上, 可通过控制天线阵列的相位, 实现约 60° 的波束覆盖范围。此外, 当扫描角度动态变化时, 该相控阵天线仍然具有良好的对称性, 适用于空间扫描应用。

文献[54]中提出了一种在 Ka 波段工作的 16 元微带贴片线性天线阵列。该阵列的最大增益为 19.88 dBi, 并采用天线元件错位布局来改善其辐射方向的对称性。然而, 这种布局方法增加了实际制造的复杂性。而文献[40]中提出了一种适用于 5G 应用的 4×4 贴片天线阵列, 该阵列具有合理的带宽, 工作于 28 GHz 频段。然而, 该阵列使用馈电网络进行功率分配, 增加了天线的尺寸, 并且无法满足移动设备中更广泛的信号覆盖范围需求, 仅提供窄方向性波束。

而本研究提出的天线阵列具有几个显著优点: 第一, 结构紧凑。本研究中辐射贴片形状为矩形, 并采用微带线进行馈电, 通过应用周期性结构(即 2×3 矩形超表面贴片)实现天线的小型化。结合微带贴片天线本身的低剖面和小型化特点, 该设计

对于在空间受限的环境中部署高性能天线具有很大优势, 如 5G 通信系统基站或移动设备。第二, 高增益。考虑到毫米波频段中的高路径损耗问题, 本研究采用了天线阵列来提高增益。所得的 1×4 线性天线阵列增益提高了约 6 dB。第三, 改进波束覆盖范围。使用天线阵列可以提升天线的方向性和增益, 但会导致波束宽度变窄, 与移动终端的全向通信需求相悖。因此, 本研究通过采用相控阵技术来进行波束控制, 可实现大约 $\pm 30^\circ$ 的波束覆盖范围。该天线可以根据需要调整传输波束的方向和形状, 以提高无线信号的传输性能。总体而言, 本研究提出的天线阵列具有易于加工和制造、尺寸小以及能够通过控制端口相位来改善波束覆盖范围等优点, 适用于未来的毫米波 5G 移动设备。

2.2 电磁暴露合规性评估

2.2.1 参考水平

参考水平是衡量电磁暴露剂量的实用指标, 通常在没有人体存在的自由空间中测量, 其相较于基本限值更易于进行合规性评估。为得到不同距离下 S_{inc} 的变化规律, 需要改变天线与人体头部组织之间的距离。将天线的最大输入功率设置为 18 dBm, 并将所有馈电端口的相位设置为 0° 。由于现行标准中尚未严格定义人体头部组织所处空间中 4 cm^2 投影面积的选取方法, 本研究根据文献[54]中的方法之一, 将投影区域量化为边长 2 cm 的正方形区域, 同时保持投影正方形的几何中心与天线阵列的几何中心平行, 用于后续分析空间中 S_{inc} 的分布特征以及计算 S_{inc} 平均值。

图 4 呈现了距离手机天线不同距离处 4 cm^2 投影正方形上 S_{inc} 的空间分布特征, 从图 4 可以看出, 随着测量距离的减小, S_{inc} 的分布变得更加集中。图 5 展示了随着天线与投影平面之间距离 d (5/6/8/12/20/36 mm) 的增加, 4 cm^2 投影正方形上 S_{inc} 平均值的变化情况。通过分析可知, S_{inc} 平均值随投影正方形与手机天线之间距离 d 的增加呈指数型下降趋势。当天线最大输入功率达到 18 dBm 时, 距离天线距离最近 $d=5\text{ mm}$ 处 S_{inc} 平均值达到峰值为 12.937 W/m^2 , 与 $d=36\text{ mm}$ 处对应 S_{inc} 平均值的最大相对衰减率可达 84.8%。在此基础上, 图 5 中的蓝色虚线表示 S_{inc} 平均值的安全阈值, 由此可知, 所有计算结果均低于 ICNIRP 安全标准中 S_{inc} 平均值参考水平限值。

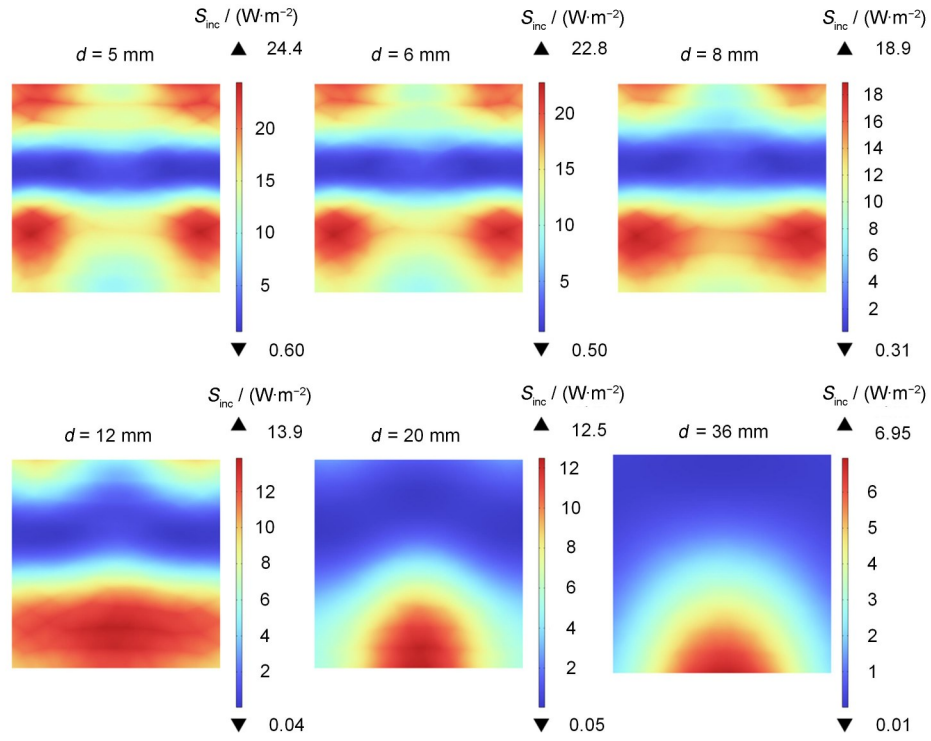

 图4 不同测量距离下 S_{inc} 分布(彩色见网络版)

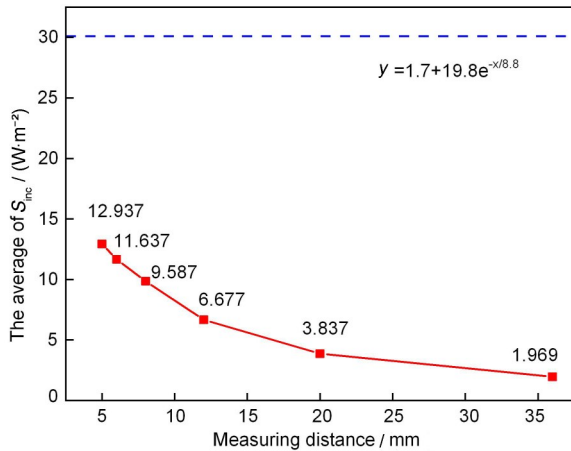
 Fig.4 Distribution of S_{inc} at different separation distances (color online)

 图5 S_{inc} 平均值随测量距离增加的变化

 Fig.5 Variation of the average of S_{inc} with increasing separation distance

图6和图7分别展示了天线最大输入功率和馈电端口相位不同时,在5 mm测量距离下 S_{inc} 的分布情况。结果表明,虽然不同输入功率并不会影响 S_{inc} 的分布特征,但随着天线最大输入功率由15 dBm增加至23 dBm时, S_{inc} 平均值产生显著变化:当天线最大输入功率分别为15 dBm、18 dBm

以及23 dBm时, S_{inc} 平均值依次为6.571 W/m²、12.937 W/m²以及41.068 W/m²,且天线最大输入功率达到峰值23 dBm时,其对应 S_{inc} 平均值41.068 W/m²已超过ICNIRP标准中的参考水平31.1 W/m²,有必要将天线的输入功率设置在合理水平以确保不会对人体健康产生负面影响。在此基础上,虽然馈电端口相位变化会对空间中 S_{inc} 的分布特征产生明显影响,但 S_{inc} 平均值的变化范围却很小,当扫描角度依次为60°、90°以及120°时, S_{inc} 平均值依次为2.269 W/m²、2.053 W/m²以及2.269 W/m²,表明可以利用相位控制技术来增强信号覆盖范围。

2.2.2 基本限值

基本限值作为衡量人体组织吸收电磁暴露水平的评估指标,通常在6 GHz以上频率范围内通过计算 S_{ab} 以量化人体局部电磁暴露水平。在此基础上,设定手机天线位于语音通话位置且距离人体头部组织5 mm后,重点分析了天线最大输入功率和馈电端口相位对人体头部组织 S_{ab} 的影响。当天线最大输入功率分别为15 dBm、18 dBm以及

23 dBm 时, S_{ab} 依次为 3.761 W/m²、7.404 W/m² 以及 23.503 W/m², 且天线最大输入功率达到峰值 23 dBm 时, 其 S_{ab} 已超过 ICNIRP 标准中的基本限值 20 W/m², 出现了 17.5% 的相对超标量值, 同时较天线最大输入功率为 15 dBm 时的对应数值增加约 5.25 倍, 与天线输入功率呈正相关关系。与天

线最大输入功率变化对 S_{ab} 的影响程度相比, S_{ab} 随馈电端口相位变化产生的差异较小。当天线阵列单元间扫描角度为 90° 即馈电端口相位同步配置时, S_{ab} 最大为 3.162 W/m²; 当扫描角度变化范围达到 30°~120° 时, S_{ab} 对应变化范围为 1.382~3.162 W/m²。

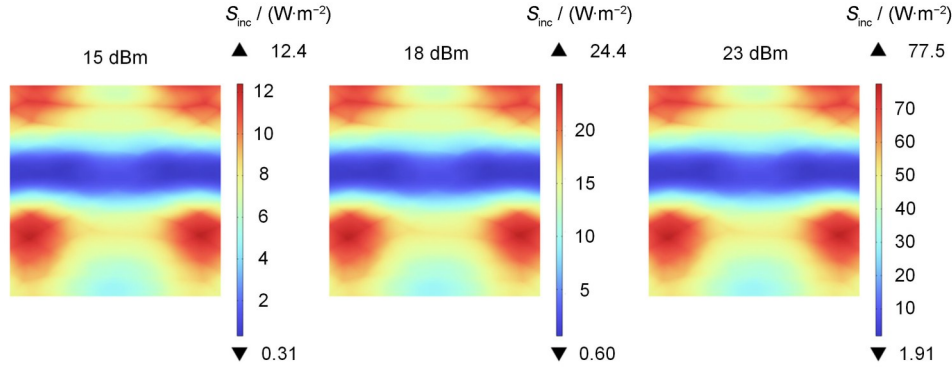


图6 天线不同输入功率下 S_{inc} 分布(彩色见网络版)
Fig.6 Distribution of S_{inc} with different antenna transmission power (color online)

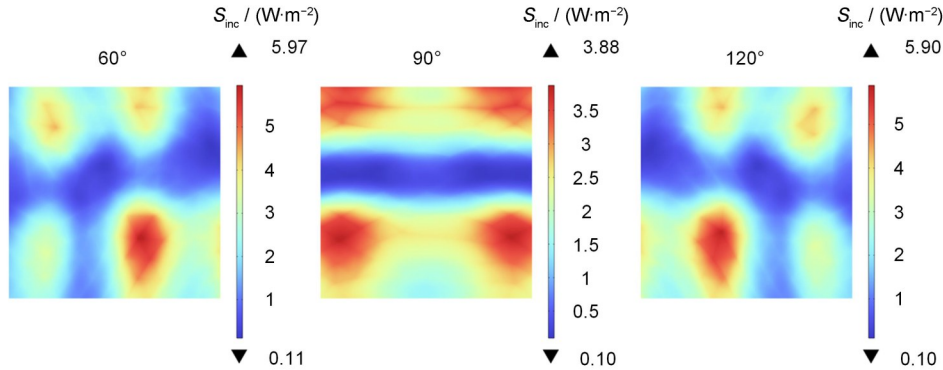


图7 不同相位下 S_{inc} 分布(彩色见网络版)
Fig.7 Distribution of S_{inc} with different phase (color online)

2.2.3 局部 SAR 分布和温升

由于手机天线靠近人体头部组织, 因此仅研究了人体头部模型中局部 SAR 的分布特征。在此基础上, 温度作为另一种直接衡量人体电磁暴露水平的参数, 本节中重点分析了天线输入功率和馈电端口相位对人体头部组织温升的影响, 包含头皮层表面温度场、截面温度场的分布情况以及不同头部组织温度随时间的变化趋势, 在以下暴露场景中手机天线与人体头部组织之间的距离仍为 5 mm。

首先, 为了研究 SAR 随头部组织深度的变化趋势, 设定手机天线的输入功率为 18 dBm, 重点分析了 SAR 在水平(Y轴)方向上数值大小的变化趋

势以及在头部组织横截面(XOY面)上的分布特征。设定距离 D 代表头部组织深度, 取值范围为 0~184 mm。图 8(a)呈现了 SAR 随头部组织深度的增加在 Y 轴方向上的变化趋势, 呈现出指数下降趋势, 如: $D=3.2$ mm 处 SAR (0.254 6 W/kg) 仅为 $D=0$ mm 处 SAR (17.468 4 W/kg) 的 1.46%。图 8(b)呈现了 SAR 在 XOY 面上的分布特征, 由此可知, 当手机天线工作频率高达 GHz 后, SAR 主要分布于浅表组织中, 在头皮层范围内 ($0 \text{ mm} < D < 7 \text{ mm}$) 近乎降低为零。

其次, 研究了在不同天线输入功率下人体头部模型 SAR 分布与头皮层表面温度场分布之间的关系 (图 9)。

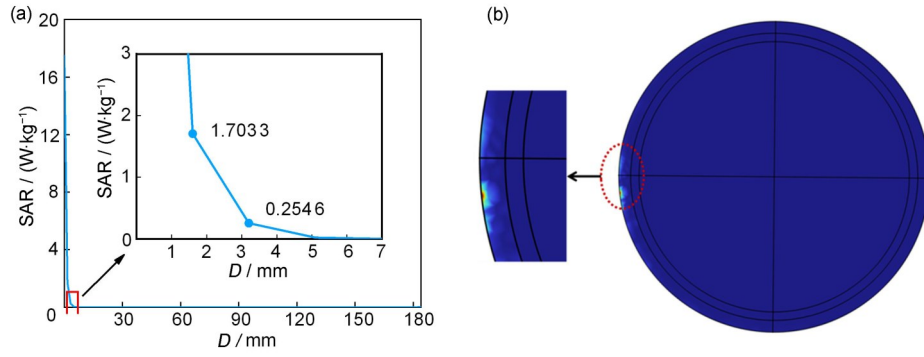


图8 SAR分布示意图:(a)Y轴;(b)XOY平面
Fig.8 SAR distribution diagram (a) Y-axis; (b) XOY-plane

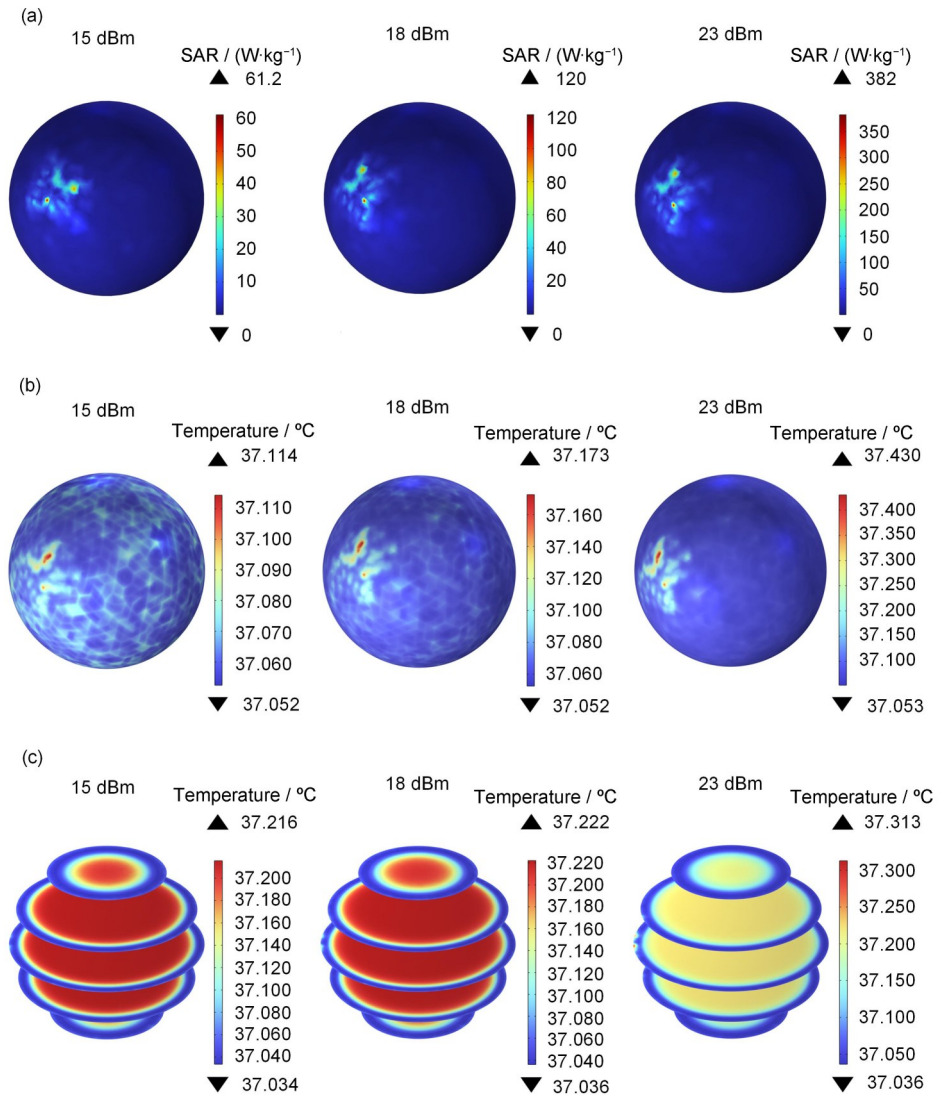


图9 不同天线输入功率下人体头部模型中(彩色见网络版):
(a)SAR分布;(b)头皮层表面温度场分布;(c)截面温度场分布(暴露时间30 min)

Fig.9 Human head model under different input power of the antenna (color online): (a) SAR; (b) scalp surface temperature field distribution; (c) cross-sectional temperature distribution (exposure time of 30 min)

图9(a)和(b)分别展示了在30 min手机天线辐照下,人体头部模型SAR分布和头皮层表面温度场分布的特征。从图9可以看出,人体头部模型内部的电磁能量吸收呈现明显的梯度特征,其空间分布具有典型的聚集特性。头皮层表面的温升热点区域与电磁能量聚焦部位存在显著空间相关性。在此基础上,当手机天线的输入功率由15 dBm增长至23 dBm时,SAR与头皮层表面温度场分布特征未表现出明显差异,但最大SAR与头皮层表面温度均呈上升趋势。当手机天线输入功率分别为15 dBm、18 dBm和23 dBm时,头皮层表面最高温升依次达到0.114 °C、0.173 °C和0.430 °C。虽然人体头部组织最大SAR随功率提升出现陡增现象,但头皮层表面温升曲线相对平缓,在23 dBm的极端输入功率下,头皮层表面最高温升仍控制在0.430 °C,较可能引发组织热损伤的2 °C安全临界值保有充分裕度。图9(c)展示了在不同天线输入功率下人体头部模型截面温度场分布情况。从图9(c)中可知,受热区域主要集中在头皮层表面和大脑层内部区域。在手机天线长达30 min的持续辐照下,大脑层内部的温度普遍高于头皮层和颅骨层。由于大脑具有较高代谢产热率,因此比具有较低代谢产热率的组织具有更高的温度;同时,大脑层的血液灌注率较低,而血液灌注率越低,组织的温度则越高,故大脑层对温度的变化较为敏感。但当功率提升至23 dBm时,皮肤层吸收电磁能量转化为热能的速率超过了生理散热机制的代偿能力,导致头皮层出现热量累积现象。此外,头部切面峰值温度与天线输入功率呈正相关,当天线功率由15 dBm增至23 dBm时,头部截面最高温升由0.216 °C升高至0.313 °C,但所有计算结果均低于ICNIRP安全标准中建议的局部暴露温升阈值2 °C,并不会造成可能的生理性损伤。

随后,重点研究了18 dBm手机天线输入功率下人体头部不同组织温升随时间的变化趋势,如图10所示。随着手机天线辐照时间延长,不同头部组织呈现显著时变特性。当辐照时间达到3 min时,头皮层表现出最显著的热积累效应,其温度变化显著于大脑层。但随着辐射时间增加,大脑层温升曲线呈现持续升高的态势,最终达到头部所有组织中的温度峰值。特别值得注意的是,当

辐照时间超过10 min后,各组织温升曲线均进入平台期,热传导与生理性散热之间形成了动态平衡。这表明在长时间辐照下,人体头部组织已建立起热稳态体系,组织温度不再发生显著变化。

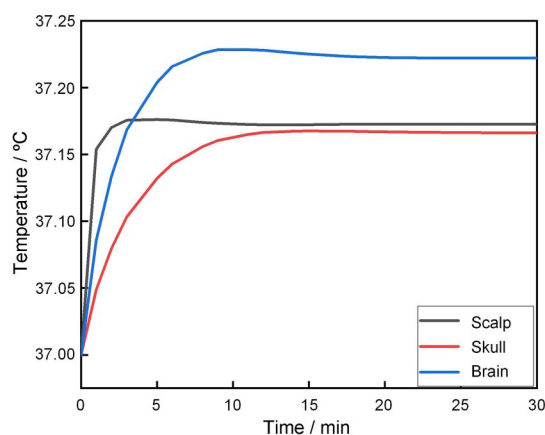


图10 人体头部模型中各组织层温度随辐照时间的变化 (彩色见网络版)

Fig.10 The temperature variation of each tissue with irradiation time in the human head model (color online)

最后,研究了在不同扫描角度下人体头部模型SAR分布与头皮层表面温度场分布之间的关系。图11(a)和(b)展示了当辐照时间达到30 min后,SAR分布和头皮层表面温度场分布随扫描角度(60°、90°、120°)的变化趋势。从图11可知,不同扫描角度下SAR分布特征呈现显著角度依赖性,但头皮层表面温升差异微乎其微,3个角度对应的温升峰值分别为0.082 116 °C、0.082 122 °C和0.082 115 °C,差值变化范围极小。这表明在毫米波5G频段下,扫描角度对头皮层表面温升的影响远小于其他剂量学参数(如SAR、 S_{ab} 以及 S_{inc} 等),在进行相关电磁暴露安全评估时可优先选择其他指标。图11(c)展示了不同天线扫描角度下人体头部模型截面温度场分布情况。可以看出,无论扫描角度如何调整,温度热点始终集中在大脑区域。当辐照时间达到30 min后,大脑层温度普遍高于头皮层和颅骨层,且在3种不同扫描角度下头部截面最高温升均达到0.222 °C,即最高温升在所设定精度范围内保持稳定,说明扫描角度对深层组织温度的影响有限,电磁暴露产生的热效应仍处于人体可调节的安全范围内。

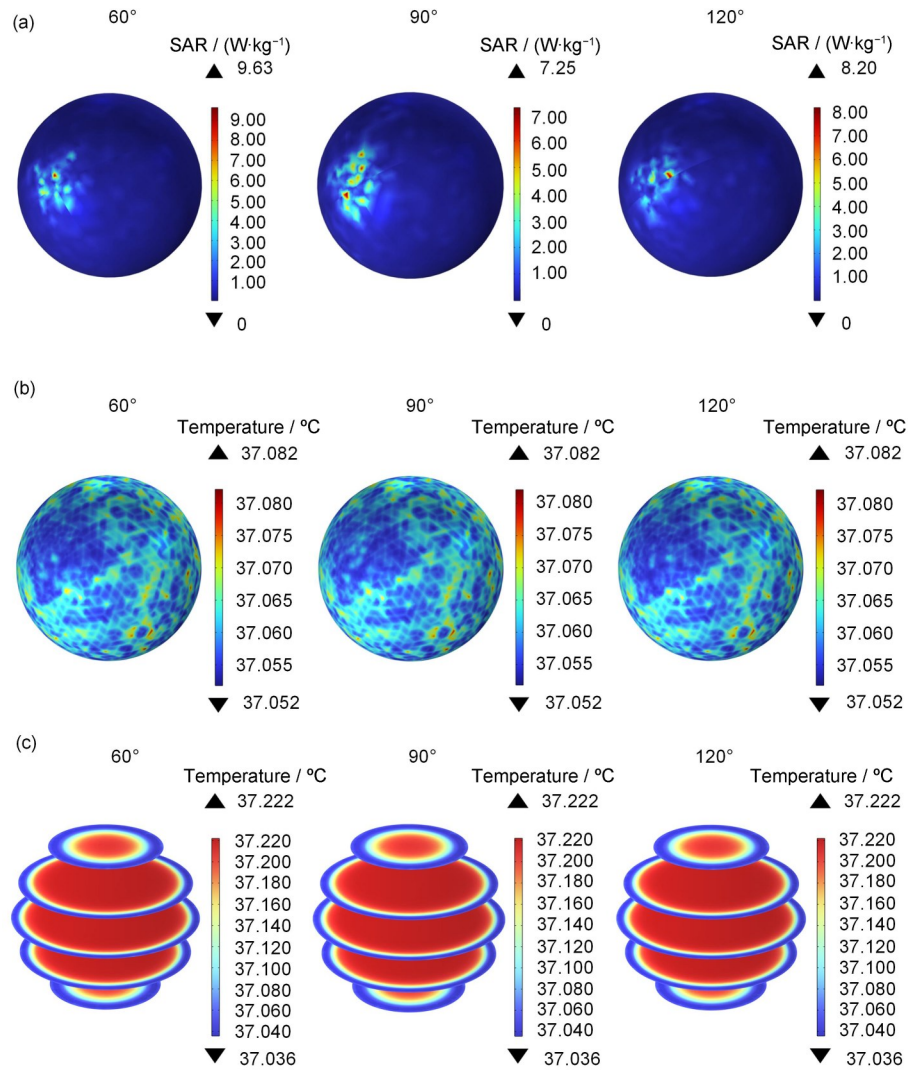


图 11 不同天线扫描角度下人体头部模型中(彩色见网络版):
(a) SAR 分布; (b) 头皮层表面温度场分布; (c) 截面温度场分布(暴露时间 30 min)

Fig.11 Human head model under different scanning angles of the antenna (colore online): (a) SAR; (b) scalp surface temperature field distribution; (c) cross-sectional temperature distribution (exposure time of 30 min)

3 结论

随着移动终端技术的不断发展, 视频数据流量也经历了爆炸性增长。然而, 毫米波频段中丰富的频谱资源可以支持未来移动数据流量的指数级增长。本研究设计了一款毫米波频段的高增益阵列天线, 关键是使用超表面材料来改变电磁波的传播行为, 从而实现天线的小型化。此外, 通过采用多端口馈电, 可以独立操纵每个天线单元的相位和幅度, 从而实现波束控制。最终得到的 1×4 微带贴片天线阵列实现了高达 14 dBi 的高增益, 并且在波束控制期间能够实现约 60° 的波束扫描范围。

在此基础上, 为衡量上述毫米波 5G 天线工作

时产生电磁暴露水平的安全性与合规性, 重点针对所设计的天线进行相关剂量学研究, 并将所有计算结果与 ICNIRP 标准中的基本限值以及参考水平进行比较, 完成安全评估。根据 ICNIRP 2020 标准可知, S_{ab} 的基本限值和 S_{inc} 平均值的参考水平在 24.9 GHz 时分别为 20 W/m² 和 31.1 W/m²。当输入功率为 15 dBm、18 dBm 和 23 dBm 时, S_{inc} 平均值峰值分别为 6.571 W/m²、12.937 W/m² 和 41.068 W/m²。同时, S_{ab} 峰值分别为 3.761 W/m²、7.404 W/m² 和 23.503 W/m²。当馈电端口相位分别为 60°、90° 和 120° 时, S_{inc} 平均值峰值分别为 2.269 W/m²、2.053 W/m² 和 2.269 W/m²。同时, S_{ab} 峰值分别为 1.153 W/m²、3.162 W/m² 和 1.382 W/m²。在上述所有场景中, 仅在最大输入功率为 23 dBm

的情况下, S_{inc} 平均值峰值 (41.068 W/m^2) 与 S_{ab} 峰值 (23.503 W/m^2) 超过了参考水平阈值和基本限值。此外, S_{inc} 和 S_{ab} 随着天线输入功率而增加, 因此, 在追求天线性能时不应忽视其对人体电磁暴露水平影响。此外, 相控阵中馈电端口相位的变化对天线辐射特性的影响可以忽略不计, 意味着可以在不增加输入功率的情况下实现较大的信号覆盖范围。当人体头部组织受到所设计天线的辐照时, 不同头部组织温度也会发生轻微变化。当输入功率为 15 dBm 和 18 dBm 时, 最大温升分别为 37.216°C 和 37.222°C , 出现于大脑层内部。当输入功率为 23 dBm 时, 最大温升为 0.430°C , 出现于头皮层表面。当馈电端口相位分别为 60° 、 90° 和 120° 时, 最高温升均为 37.222°C , 均出现于大脑层内部。同时, 最大温升 0.430°C 仍远低于 ICNIRP 标准中建议的局部暴露安全阈值。综上所述, 本研究设计的毫米波 5G 手机天线产生的电磁暴露水平基本符合国际标准安全限值。

作者贡献声明 杜玥负责仿真计算、数据整理、文字处理工作; 谢圭煜负责文字处理工作; 逯迈教授整体设计论文工作的基本思想、实施步骤、论文架构, 数据处理、文字处理, 审定论文的结论等。全体作者均已阅读并同意最终的文本。

参考文献

- Chin W H, Fan Z, Haines R. Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2014, **21**(2): 106-112. DOI: 10.1109/MWC.2014.6812298.
- Andrews J G, Buzzi S, Choi W, *et al.* What will 5G be? [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, **32**(6): 1065-1082. DOI: 10.1109/JSAC. 2014. 2328098.
- Rappaport T S, Sun S, Mayzus R, *et al.* Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: it will work! [J]. IEEE Access, 2013, **1**: 335-349. DOI: 10.1109/ACCESS. 2013.2260813.
- European Commission. Commission implementing decision (EU) 2019/784 of 14 May 2019 on harmonisation of the 24.25 - 27.5 GHz frequency band for terrestrial systems capable of providing wireless broadband electronic communications services in the Union[S]. Official Journal of the European Union, 2019, L127: 1 - 17.
- Morgado A, Huq K M S, Mumtaz S, *et al.* A survey of 5G technologies: regulatory, standardization and industrial perspectives[J]. Digital Communications and Networks, 2018, **4**(2): 87-97. DOI: 10.1016/j.dcan.2017.09.010.
- Razavizadeh S M, Ahn M, Lee I. Three-dimensional beamforming: a new enabling technology for 5G wireless networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, **31** (6): 94-101. DOI: 10.1109/MSP.2014.2335236.
- Hong W. Solving the 5G mobile antenna puzzle: assessing future directions for the 5G mobile antenna paradigm shift[J]. IEEE Microwave Magazine, 2017, **18** (7): 86-102. DOI: 10.1109/MMM.2017.2740538.
- Hong W, Baek K H, Lee Y, *et al.* Study and prototyping of practically large-scale mmWave antenna systems for 5G cellular devices[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, **52**(9): 63-69. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6894454.
- Ojaroudiparchin N, Shen M, Zhang S, *et al.* A switchable 3-D-coverage-phased array antenna package for 5G mobile terminals[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, **15**: 1747-1750. DOI: 10.1109/LAWP.2016.2532607.
- Aliakbari H, Abdipour A, Mirzavand R, *et al.* A single feed dual-band circularly polarized millimeter-wave antenna for 5G communication[C]. IEEE 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), April 10-15, 2016, Davos, Switzerland, 2016: 1-5. DOI: 10.1109/EuCAP.2016.7481318.
- Jandi Y, Gharnati F, Said A O. Design of a compact dual bands patch antenna for 5G applications[C]. IEEE International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), April 19-20, 2017, Fez, Morocco, 2017: 1-4. DOI: 10.1109/WITS.2017.7934628.
- Verma S, Mahajan L, Kumar R, *et al.* A small microstrip patch antenna for future 5G applications[C]. IEEE 5th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO), September 7-9, 2016, Noida, India, 2016: 460-463. DOI: 10.1109/ICRITO. 2016.7784999.
- Yu B, Yang K, Sim C Y D, *et al.* A novel 28 GHz beam steering array for 5G mobile device with metallic casing application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, **66**(1): 462-466. DOI: 10.1109/TAP. 2017.2772084.
- Rashid M, Hossain S. Antenna solution for millimeter

- wave mobile communication (MVMC): 5G[J]. International Journal of Scientific Research and Engineering Technology, 2014, **3**(8): 1157-1161.
- 15 Wu T, Rappaport T S, Collins C M. Safe for generations to come: considerations of safety for millimeter waves in wireless communications[J]. IEEE Microwave Magazine, 2015, **16**(2): 65-84. DOI: 10.1109/MMM.2014.2377587.
- 16 Deventer E V, Rongen E V, Saunders R. WHO research agenda for radiofrequency fields[J]. Bioelectromagnetics, 2011, **32**(5): 417-421. DOI: 10.1002/bem.20660.
- 17 Li K, Diao Y L, Sasaki K, *et al.* Intercomparison of calculated incident power density and temperature rise for exposure from different antennas at 10 – 90 GHz[J]. IEEE Access, 2021, **9**: 151654-151666. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3126738.
- 18 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)[J]. Health Physics, 2020, **118**(5): 483-524. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.
- 19 Bailey W H, Bodemann R, Bushberg J, *et al.* Synopsis of IEEE std C95.1™—2019 “IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz” [J]. IEEE Access, 2019, **7**: 171346-171356.
- 20 Morimoto R, Hirata A, Laakso I, *et al.* Time constants for temperature elevation in human models exposed to dipole antennas and beams in the frequency range from 1 to 30 GHz[J]. Physics in Medicine and Biology, 2017, **62** (5): 1676-1699. DOI: 10.1088/1361-6560/aa5251.
- 21 白伟江, 逯迈. 工作在6.48 kHz的电磁安检门电磁暴露安全评估[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, **40**(5): 050601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0041.
- BAI Weijiang, LU Mai. Safety assessment of electromagnetic exposure of walk-through metal detectors operating at 6.48 kHz[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, **40**(5): 050601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0041.
- 22 Nakae T, Funahashi D, Higashiyama J, *et al.* Skin temperature elevation for incident power densities from dipole arrays at 28 GHz[J]. IEEE Access, 2020, **8**: 26863-26871. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2970219.
- 23 Li K, Sasaki K, Watanabe S, *et al.* Relationship between power density and surface temperature elevation for human skin exposure to electromagnetic waves with oblique incidence angle from 6 GHz to 1 THz[J]. Physics in Medicine and Biology, 2019, **64**(6): 065016. DOI: 10.1088/1361-6560/ab057a.
- 24 Colombi D, Thors B, TöRnevik C, *et al.* RF energy absorption by biological tissues in close proximity to millimeter-wave 5G wireless equipment[J]. IEEE Access, 2018, **6**: 4974-4981. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2790038.
- 25 Carrasco E, Colombi D, Foster K R, *et al.* Exposure assessment of portable wireless devices above 6 GHz[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2019, **183**(4): 488-495. DOI: 10.1093/rpd/ncy177.
- 26 Neufeld E, Carrasco E, Murbach M, *et al.* Theoretical and numerical assessment of maximally allowable power-density averaging area for conservative electromagnetic exposure assessment above 6 GHz[J]. Bioelectromagnetics, 2018, **39**(8): 617-630. DOI: 10.1002/bem.22147.
- 27 Funahashi D, Ito T, Hirata A, *et al.* Averaging area of incident power density for human exposure from patch antenna arrays[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2018, **E101.C**(8): 644-646. DOI: 10.1587/transele.e101.c.644.
- 28 Hirata A, Kadera S, Sasaki K, *et al.* Human exposure to radiofrequency energy above 6 GHz: review of computational dosimetry studies[J]. Physics in Medicine and Biology, 2021, **66**(8): 08TR01. DOI: 10.1088/1361-6560/abf1b7.
- 29 Hirata A. Review on human dosimetry for radio-frequency exposure above 6 GHz-international exposure standards[C]. IEEE, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). November 6-9, 2018, Kyoto, Japan. 2018: 681-683. DOI: 10.23919/APMC.2018.8617491.
- 30 Foster K R, Ziskin M C, Balzano Q. Time-temperature thresholds and safety factors for thermal hazards from radiofrequency energy above 6 GHz[J]. Health Physics, 2021, **121**(3): 234-247. DOI: 10.1097/HP.0000000000001447.
- 31 薛一哲, 张兆文, 郭玲, 等. 5G手机辐射对小鼠精子质量和性激素水平的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, **41**(1): 010301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0062.
- XUE Yizhe, ZHANG Zhaowen, GUO Ling, *et al.* Effects of 5G mobile phone radiation on sperm quality and sex hormone levels in mice[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, **41**(1): 010301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0062.

- 32 康刚, 祝西里, 王长清, 等. 人体对移动通信手机天线辐射特性的影响[J]. 电子学报, 1997, **25**(9): 51-55.
KANG Gang, ZHU Xili, WANG Changqing, *et al.* Effect of human body on the radiation characteristic of mobile communication handset antenna[J]. Acta Electronica Sinica, 1997, **25**(9): 51-55.
- 33 于利娟. 手机天线辐射特性优化与SAR研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
YU Lijuan. Optimization and SAR study on the radiation characteristics of mobile antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- 34 Miura N, Kodera S, Diao Y L, *et al.* Power absorption and skin temperature rise from simultaneous near-field exposure at 2 and 28 GHz[J]. IEEE Access, 2021, **9**: 152140-152149. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3126372.
- 35 左胜, 白杨, 张玉, 等. 复杂环境中手机电磁辐射的比吸收率计算[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, **46**(2): 170-176. DOI: 10.19665/j.issn1001-2400.2019.02.028.
ZUO Sheng, BAI Yang, ZHANG Yu, *et al.* Calculations of the specific absorption ratio from mobile phone electromagnetic radiations in complex environment[J]. Journal of Xidian University, 2019, **46**(2): 170-176. DOI: 10.19665/j.issn1001-2400.2019.02.028.
- 36 陈登鹏, 逯迈. 5G手机天线辐射特性及其在人体头部中温度场分布[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2021, **39**(3): 030601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.030601.CHEN Dengpeng,
LU Mai. Exposure characteristics of 5G mobile phone antenna and its temperature field distribution in the human head[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, **39**(3): 030601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021.rrj.39.030601.
- 37 European Telecommunications Standards Institute. User equipment (UE) radio transmission and reception—part 1: Range 1 standalone: 3GPP TS 38.101-1 version 16.4.0 release 16[S]. France: ETSI, 2020.
- 38 Colombi D, Thors B, Törnevik C. Implications of EMF exposure limits on output power levels for 5G devices above 6 GHz[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, **14**: 1247-1249. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2400331.
- 39 Zhekov S S, Yao M, Franek O, *et al.* EMF exposure of human head by handset mmWave phased antenna array [C]. IEEE 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), March 27 - April 1, 2022, Madrid, Spain, 2022: 1-5. DOI: 10.23919/EuCAP53622.2022.9769403.
- 40 Arizaca-Cusicuna D N, Luis Arizaca-Cusicuna J, Clemente-Arenas M. High gain 4×4 rectangular patch antenna array at 28 GHz for future 5G applications[C]. IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON). August 8-10, 2018, Lima, Peru. 2018: 1-4. DOI: 10.1109/INTERCON.2018.8526451.
- 41 Wang J F, Li Y, Jiang Z H, *et al.* Metantenna: when metasurface meets antenna again[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, **68**(3): 1332-1347. DOI: 10.1109/TAP.2020.2969246.
- 42 Eteng A A, Goh H H, Rahim S K A, *et al.* A review of metasurfaces for microwave energy transmission and harvesting in wireless powered networks[J]. IEEE Access, 2021, **9**: 27518-27539. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3058151.
- 43 Morelli M S, Gallucci S, Siervo B, *et al.* Numerical analysis of electromagnetic field exposure from 5G mobile communications at 28 GHz in adults and children users for real-world exposure scenarios[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, **18**(3): 1073. DOI: 10.3390/ijerph18031073.
- 44 Guraliuc A R, Zhadobov M, Sauleau R, *et al.* Near-field user exposure in forthcoming 5G scenarios in the 60 GHz band[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, **65**(12): 6606-6615. DOI: 10.1109/TAP.2017.2754473.
- 45 Lu M, Ueno S. Deep transcranial magnetic stimulation using figure-of-eight and halo coils[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, **51**(11): 5101204. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2436977.
- 46 Rush S, Driscoll D A. Current distribution in the brain from surface electrodes[J]. Anesthesia and Analgesia, 1968, **47**(6): 717-723. DOI: 10.1213/00000539-196811000-00016.
- 47 Gabriel C, Gabriel S, Corthout Y E. The dielectric properties of biological tissues: I. reference survey[J]. Physics in Medicine & Biology, 1996, **41**(11): 2231-2249. DOI: 10.1088/0031-9155/41/11/001.
- 47 Diao Y L, Rashed E A, Hirata A. Assessment of absorbed power density and temperature rise for nonplanar body model under electromagnetic exposure above 6 GHz[J]. Physics in Medicine and Biology, 2020, **65**(22): 224001. DOI: 10.1088/1361-6560/abdbb7.
- 48 He W, Xu B, Gustafsson M, *et al.* RF compliance study

- of temperature elevation in human head model around 28 GHz for 5G user equipment application: simulation analysis[J]. IEEE Access, 2017, **6**: 830-838. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2776145.
- 49 Bhargava D, Leeprechanon N, Rattanadecho P, *et al.* Specific absorption rate and temperature elevation in the human head due to overexposure to mobile phone radiation with different usage patterns[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, **130**: 1178-1188. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.031.
- 50 Laakso I, Ilvonen S, Uusitupa T. Performance of convolutional PML absorbing boundary conditions in finite-difference time-domain SAR calculations[J]. Physics in Medicine and Biology, 2007, **52**(23): 7183-7192. DOI: 10.1088/0031-9155/52/23/027.
- 51 Ali M M M, Sebak A R. Dual band (28/38 GHz) CPW slot directive antenna for future 5G cellular applications [C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), June 26 - July 1, 2016, Fajardo, PR, USA, 2016: 399-400. DOI: 10.1109/APS.2016.7695908.
- 52 Amrutha G M, Sudha T. Millimeter wave doughnut slot MIMO antenna for 5G applications[C]. IEEE Region 10 Conference (TENCON). October 17-20, 2019. Kochi, India, 2019: 1220-1224. DOI: 10.1109/tencon.2019.8929658.
- 53 Khalily M, Tafazolli R, Xiao P, *et al.* Broadband mm-wave microstrip array antenna with improved radiation characteristics for different 5G applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, **66**(9): 4641-4647. DOI: 10.1109/TAP.2018.2845451.
- 54 He W, Xu B, Yao Y Q, *et al.* Implications of incident power density limits on power and EIRP levels of 5G millimeter-wave user equipment[J]. IEEE Access, 2020, **8**: 148214-148225. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3015231.