

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407785

# 基于通信频率的电磁波人体信道损耗与辐射安全分析研究\*

程佳君 陈翰 刘翔宇 秦江帆

(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

**摘要:**随着生物医疗领域的发展,无线植入式设备发挥着越来越重要的作用,综合考虑电磁波在人体组织中的功率损耗与比吸收率 SAR 值大小,对于植入式脑电极的频率选择具有重要意义。针对此问题,使用 CST 软件搭建高精度的人头体素模型,仿真探究 400 MHz~6.5 GHz 常用人体通信频段电磁波在头部组织中的传输特性,分析电磁场分布、功率密度损耗以及辐射危害 SAR 值。结果表明,电磁波在人头组织中的路径损耗随着组织深度的增加而变大,3.5 GHz 以下频段电磁波信道损耗较小,功率密度在皮下 25 mm 组织内衰减不超过 10 dB。人头组织对不同频率的电磁辐射吸收能力不同,高频电磁波辐射危害整体小于低频电磁波,其中 1.8 GHz 频段吸收的 SAR 达到了最大值,为 1.71 W/kg。综合考虑功率损耗与电磁辐射危害,植入式脑电极的最优工作频率随植入深度变化,2.45 GHz 频段电磁波适合头部皮下 5 mm 内植入式脑电极,1.8 GHz 与 400 MHz 是皮下 15 mm 与 25 mm 处植入式脑电极的最优频率,功率密度相较于 2.45 GHz 分别增加了 9.6% 与 77.4%。

**关键词:** 植入式脑电极;无线通信;电磁仿真;功率损耗;比吸收率

中图分类号: TN911

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.5015

## Research on body channel loss and radiation safety of electromagnetic wave based on communication frequency

Cheng Jiajun Chen Han Liu Xiangyu Qin Jiangfan

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** With the development of biomedical field, wireless implantable devices are playing an increasingly important role. Taking into account the power loss and specific absorption rate (SAR) of electromagnetic waves in human tissues, the selection of frequency for implantable electrodes is of great significance. To address this issue, CST software is used to build a high-precision voxel model of the human head, simulate and explore the transmission characteristics of electromagnetic waves in the commonly used human communication frequency band of 400 MHz~6.5 GHz in the head tissue, analyze the distribution of electromagnetic fields, power density losses, and radiation hazard SAR values. The results show that the path loss of electromagnetic waves in human head increases with the depth of the tissue, and the channel loss in the frequency band below 3.5 GHz is smaller, which power density decreases less than 10 dB in the tissue within 25 mm of the skin. The human tissue has different absorption capabilities for different frequencies of electromagnetic radiation, and the SAR value of high-frequency electromagnetic radiation is generally smaller than that of low-frequency electromagnetic radiation. Among them, the SAR of 1.8 GHz reached the maximum value of 1.71 W/kg. Considering the power loss and electromagnetic radiation hazards, the optimal operating frequency for implantable brain electrodes varies with the depth of implantation. 2.45 GHz electromagnetic wave is suitable for implantable electrodes in the subcutaneous tissue within 5 mm of the head, and 1.8 GHz and 400 MHz are the optimal frequencies for implantable electrodes located 15 mm and 25 mm beneath the skin, with the power density increasing by 9.6% and 77.4% compared to 2.45 GHz.

**Keywords:** implantable brain electrodes; wireless communication; electromagnetic simulation; power loss; SAR

## 0 引言

由于微电子技术、无线通信技术以及生物医疗技术的迅速发展,植入式医疗设备因其使用便利,功能多样等特点,在移植器官的生理监测、胶囊内窥镜、无线心脏起搏器以及脑电极等领域有着越来越多的应用<sup>[1-2]</sup>,其中植入式脑电极在绘制大脑生理信号活动图谱,帮助人类了解脑疾病发生原理、改善疾病治疗,以及协助完成具有情绪识别等功能的人脑-计算机交互系统等方面发挥着重要作用<sup>[3-4]</sup>,逐渐成为生物医疗电子设备领域的研究热点。

植入式脑电极通常包括体内植入器件和体外数据处理两个部分,协作实现信息的感知、传输、存储、处理、显示及远程控制功能,体内植入器件一般通过无线方式与外界进行电源补给及数据传输,相比传统有线供电和数据发送方式,无线技术具有灵活性高、便捷性强、低功耗、对人体损伤小等优点<sup>[5-6]</sup>。然而无线供能应用于人体面临着两个问题:能量传输的效率,以及电磁波辐射对人体产生的危害。一方面人体组织作为一种损耗介质,会对传播在其中的电磁波造成传播损耗(propagation loss, PL),传播损耗来自于电磁波传播到人体组织表面处的反射以及在人体组织内部传播的损耗<sup>[7]</sup>,由于人体组织的电导率和介电常数随电场频率而变化,继而影响电波在组织中的传播特性<sup>[8]</sup>;另一方面,电磁波的传播会产生电磁辐射,电磁辐射是一种能量的传递方式,当人体吸收电磁辐射后便会引起生物效应,如头昏脑胀、疲惫乏力、失眠恐慌等,严重的还可以对身体器官甚至是免疫系统造成一定的伤害<sup>[9-10]</sup>。因此对于植入式无线设备,选择合适的频率进行通信与充能,在电磁辐射满足人体安全标准的前提下减小功率损耗至关重要。

相比自由空间的传播环境,人体环境较为复杂,加上道德伦理及技术限制,电磁波的传播及辐射特性不能在人体进行测量,因此,对人体正确建模并进行仿真成为解决这一难题的主流措施<sup>[11]</sup>。目前,大部分的人体信道建模是在可视化 3D 人体解剖几何模型或多层人体组织几何模型的基础上,借助时域有限差分(finite-difference time-domain, FDTD)或有限积分法(finite integration technique, FIT)等方法进行软件电磁场仿真计算,获得人体组织信道的电磁场分布及路径损耗等参数<sup>[12-13]</sup>。然而这些针对人体等效几何模型的电磁辐射仿真实验,大多忽略内部血管、血液等组织,忽略人体组织的立体交错复杂情况,将人体简化为由皮肤、脂肪、骨骼及大脑等多层组织组成的平面均匀结构<sup>[14-15]</sup>。这种方法虽然简化了电磁能量传播与损耗的计算公式,缩短了仿真时间,但不可避免的带来误差,针对人体局部的能量路径损耗也不够

准确。

本文结合人体信道损耗与电磁辐射危害相关理论,利用 CST 电磁仿真软件,基于 Yee 氏元胞法<sup>[16]</sup>建模空间分辨率 2 mm 小元胞的人头模型,将时域有限积分技术与高精度的人头体素模型结合,仿真得到不同频率下电磁波在人体组织中传播的路径损耗,并采用比吸收率(specific absorption rate, SAR)作为衡量电磁辐射危害的指标,对模型进行健康风险评估。仿真结果清晰的展示了电磁波在头部组织中的传播特性,以及对组织的辐射影响,可为植入式脑电极、无线收发器等工程应用设计中的链路预算、最大安全功率计算及最优频率选择等提供依据。

## 1 仿真模型与研究方法

### 1.1 通信频段选择与人头模型设计

人体区域通信的使用频段包括人体通信(human body communication, HBC)频段,医疗植入通信(medical implant communication service, MICS)频段,工业、科学和医疗(industrial, scientific and medical, ISM)频段及超宽带(ultra-wide band, UWB)频段等,如表 1 所示,其中 ISM 2.45 GHz 为人体区域通信最常见频段<sup>[17]</sup>。由于高频天线更易实现小型化,应用也更为广泛,故选择 400 MHz 以上频段电磁波进行仿真测试,分别为:400 MHz、900 MHz、1.8 GHz、2.45 GHz、3.5 GHz、4.9 GHz、5.8 GHz 以及 6.5 GHz 频段。

表 1 人体通信主流频段

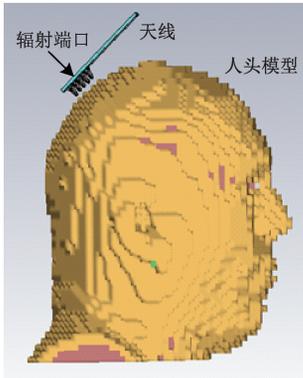
Table 1 Main frequency bands for body communication

通信频段名称	频段
人体通信(HBC)	10~50 MHz
医疗植入通信服务(MICS)	400 MHz
工业、科学及医疗(ISM)	900 MHz、2.45 GHz、5.8 GHz
超宽带(UWB)	3.1~10.6 GHz
其他通信频段	1.8 GHz 等

CST 微波工作室是达索公司开发的一款功能强大且上手简单的电磁仿真软件,可用于计算任意结构任意材料电大宽带的电磁问题。其提供了基于体素和基于 CAD 的人体模型,这些模型不仅具备详尽的内部结构,还呈现出精准的电磁和热特性。CST 体素模型包含各种组织,如人头分布有皮肤、脂肪、骨骼、肌肉、血液等组织,内部包含脑灰质、脑白质、小脑、脑脊液与脑干等组织,能够最大程度的复原真实人头模型,增加了仿真的可信度。

图 1 展示了仿真场景:微型天线作为辐射源,频率覆盖 400 MHz~6.5 GHz 的主流人体通信频率,添加人头体素模型,图 1(a)为体素模型仿真截图,图 1(b)为人头组织的剖面示意图,将天线贴近人头距离 2 cm 模拟近场区

无线设备充能环境,设置波导端口发射不同频率的电磁波,输入功率为 1W。仿真完成后利用后处理模板计算人头内部的电场强度、功率密度以及 SAR 值分布。



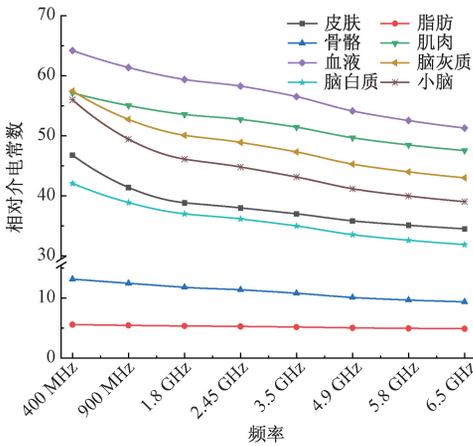
(a) 体素模型外观  
(a) Appearance of voxel model



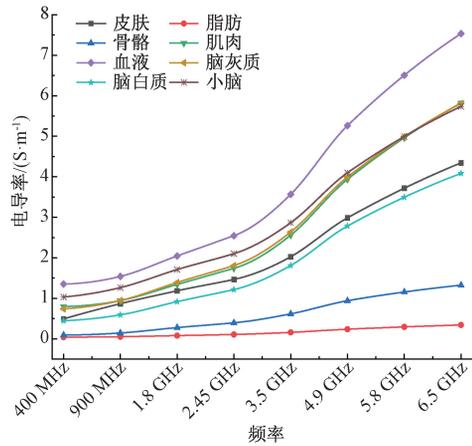
(b) 人头组织剖面图  
(b) Sectional view of Head tissue

图 1 人头模型与仿真场景布置

Fig. 1 Head model and simulation scene layout



(a) 相对介电常数曲线  
(a) Relative dielectric constant curve



(b) 电导率曲线  
(b) Electrical conductivity curve

图 2 不同频率下人体组织介电参数

Fig. 2 Dielectric parameters of human tissues at different frequencies

其中,  $E$  表示电场强度,  $H^*$  表示磁场  $H$  的共轭,  $\eta_0$  为电磁波在介质中的波阻抗,  $\mu, \varepsilon, \sigma$  为介质的磁导率、介电常数、电导率,  $\omega$  为电磁波的角频率。

根据路径损耗的定义,人头内部路径损耗  $E_L$  为人脑内部  $E_1$  处的电场强度与头皮  $E_2$  处的电场强度之比,  $P_L$

## 1.2 人体组织介电参数

人体组织是一种损耗介质,其电磁特性较为复杂。组织的相对磁导率  $\mu_r = 1$ ,即非磁性媒质;然而组织之间的电特性差异极大,且相对介电常数、电导率等参数会随电场频率发生变化:通常情况下相对介电常数随频率增大而减小,电导率随频率增大而增大。Gabriel 等<sup>[18]</sup>根据测量介电参数的结果,提出了采用 4-Cole-Cole 模型来计算人体组织的介电常数,得到 10 Hz~100 GHz 范围内的介电常数公开数据库<sup>[19]</sup>,通过查表得到通信频段的人体组织介电常数、电导率和频率之间的关系如图 2 所示,并将其应用到人头模型以保证仿真的准确性。

## 1.3 电场强度与功率密度损耗

无线设备的充能效率用功率密度来衡量,表征单位时间内通过与传播方向垂直的单位面积的能量,单位为  $W/m^2$ ,功率密度越大,单位面积内接收的功率越大,充能效率也就越高。通常使用瞬时坡印廷矢量来描述功率和电磁波的关系,根据坡印廷矢量以及麦克斯韦方程,功率密度与电、磁场强度的关系可以表示为:

$$Pd = \frac{1}{2} Re[E \times H^*] = \frac{|E|^2}{2\eta_0} \quad (1)$$

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon - j \times \frac{\sigma}{\omega}}} \quad (2)$$

为人脑内部  $P_1$  处的功率密度与头皮  $P_2$  处的功率密度之比,即:

$$E_L = 20 \lg\left(\frac{E_1}{E_2}\right), P_L = 10 \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (3)$$

### 1.4 SAR 值定义与计算

电磁波照射到人体时,携带的能量会通过传导电流消耗在人体组织中,并产生焦耳热。通常用比吸收率 SAR 值来评估人体组织暴露在电磁辐射中的强度,定义为单位质量人体所吸收的电磁波功率。联邦通信委员会(federal communications commission, FCC)和国际非电离辐射防护委员会(international commission on non-ionizing radiation protection, ICNIRP)分别在 2020 年、2019 年定义了 SAR 的安全限值为 2 W/kg(10 g),当超出安全限值时,电磁辐射就会对组织造成损害,尤其是离辐射源最近的组织。SAR 值计算采用 10 g 人体组织立方体吸收的电磁辐射功率<sup>[20]</sup>,公式为:

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} E^2 \quad (4)$$

其中,  $E$  为人体组织计算深度处的电场强度有效值,  $\sigma, \rho$  为人体组织电导率与密度。

## 2 信道损耗与 SAR 值计算

### 2.1 场强与功率密度路径损耗

在人体医疗安全领域,头部植入电极一般分为浅植入、中植入与深植入:浅植入电极在皮肤与颅骨之间,一般位于皮下 5 mm 内;中植入电极置于颅骨与大脑皮层之间,皮下约 12 ~ 15 mm 处<sup>[21]</sup>;深植入电极多位于皮下 20 mm 以上大脑灰、白质组织深处,如 Hout 等<sup>[22]</sup>研究了可植入电极作为体内辐射源植入 7 层人脑模型的空间平均 SAR 值,同轴电缆深入脑灰质部分,兰舒和王鸿宇等发明了一种基于蓝牙的无线无源脑深部刺激器系统,通过射频信号控制对脑组织进行脉冲刺激,植入靶点包括脑白质浅层网络,即皮下约 25 mm 处<sup>[23-24]</sup>。本文仿真分析皮下 30 mm 内的电磁场传播特性,为头部无线植入电极的充能频率选择提供参考依据。

图 3 展示了不同频率电磁波的电场强度在人头组织的衰减特性,可以看出:电场强度随着组织的深入逐渐衰减,其中 1.8 GHz 场强衰减最小,6.5 GHz 衰减相对最大。不同频率电磁波在空气与头皮界面处衰减值不同,是由于电磁波向人体入射时,在入射面处的反射系数、透射系数不同引起的反射损耗差异,陈志英等<sup>[25-26]</sup>对此现象做了相关研究。随着组织深度增加,3.5 GHz 以下频率场强衰减小于高频段,此外仿真发现在信号传播过程中 900 MHz 场强衰减较大,这是因为在 700 ~ 900 MHz 时,大脑生物组织结构或分子与电磁波发生共振,导致对电磁波的吸收能力增强,信号强度变弱,场强快速衰减<sup>[27]</sup>。深入组织 15 mm 以后,3.5 GHz 以上频段电场强度衰减超过 20 dB,基本衰减为 0,符合波长越短透射能力越弱的规律。图 4 展示了不同频率电磁波进入人头后

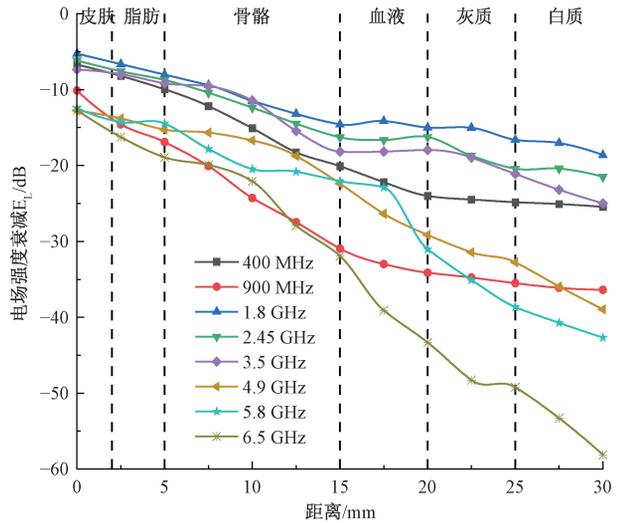


图 3 电场强度——距离损耗图

Fig. 3 Electric field intensity-distance loss diagram

功率密度随距离变化的关系,可以看出,在浅表层皮下 5 mm 以内,400 MHz、1.8 GHz 与 2.45 GHz 电磁波损耗相差不大,均小于 4 dB;皮下 5 ~ 25 mm,1.8 GHz 与 400 MHz 的功率密度损耗小于 8 dB;25 mm 以后,损耗随着频率的升高而急剧变大,3.5 GHz 以上频段功率损耗超过 15 dB,基本衰减为 0,这是人体组织的介电特性所决定的,血液和骨骼的相对介电常数与电导率较大,且随着频率的升高差距越来越大,导致电磁波能量衰减越来越快,损耗变大。仿真结果表明 3.5 GHz 以下频段的无线供能效率更高,是植入式设备的合适频率选择。

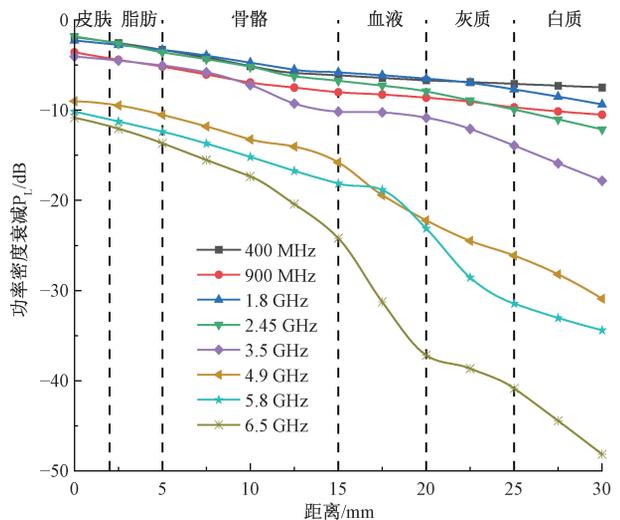


图 4 功率密度——距离损耗图

Fig. 4 Power density-distance loss diagram

### 2.2 SAR 值计算

由于无线植入式设备在工作时,人体组织不可避免

的会吸收辐射能量,从而造成安全隐患。图 5 为工作频率 2.45 GHz、输入功率 1 W 的天线仿真后的头部组织辐射截面图,可以看出,随着天线发射的电磁波穿透人体头部模型,能量随着辐射距离的增加而逐渐衰减,在皮肤层 SAR 值最高,经由各组织的能量吸收,到达组织深处仍有较高的 SAR 值,说明脑植入电极由电磁波定点定向无线传输功率的可行性,但同时也要考虑局部 SAR 值过高引起的人体安全问题。

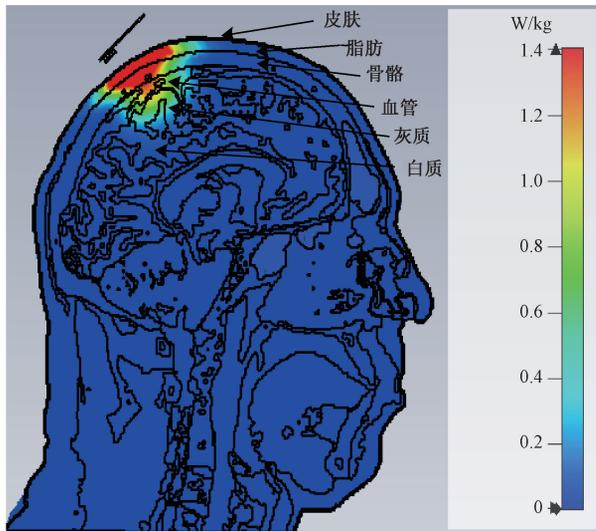


图 5 2.45 GHz 下人头 SAR 值分布

Fig. 5 Head SAR value distribution at 2.45 GHz

图 6 为天线工作在 1 W 功率时,不同频率下人体头部组织吸收电磁辐射的 SAR 最大值,可以看出,在 1.8 GHz 时 SAR 值达到了相对最大,为 1.7054 W/kg,说明人体组织对这个频段的电磁波吸收能力最强;频率超过 4.9 GHz 后,人体组织对电磁波的吸收能力减弱,SAR 值较小,因此在无线通信相关领域,可以考虑使用高频波通信以减少对人体的危害。结合图 4 功率密度随距离衰减的关系图可知,低频段在人体信道中虽然路径损耗较小,但对电磁辐射更加敏感,组织吸收的 SAR 值更高,因此在进行植入式器件频率选择时需要综合考虑无线电波的信道损耗与辐射对人体的危害性。

### 2.3 信道损耗与辐射危害综合考虑的频率选择

由于不同频率电磁波对人体组织的电磁辐射值不同,因此以人体安全为前提开展应用分析,调整天线发射功率,使得人头组织吸收的 SAR 值均达到安全标准临界值,比较能量传输效率的大小。图 7 为调整天线发射功率,使得不同频率电磁波辐射 SAR 值统一到 ICNIRP 标准 2 W/kg 时,人体组织中功率密度随距离变化的趋势,可以看出,2.45 GHz、1.8 GHz、400 MHz 分别在 5 mm、15 mm、25 mm 深度处功率密度达到了相对最大,即充能效率最高。

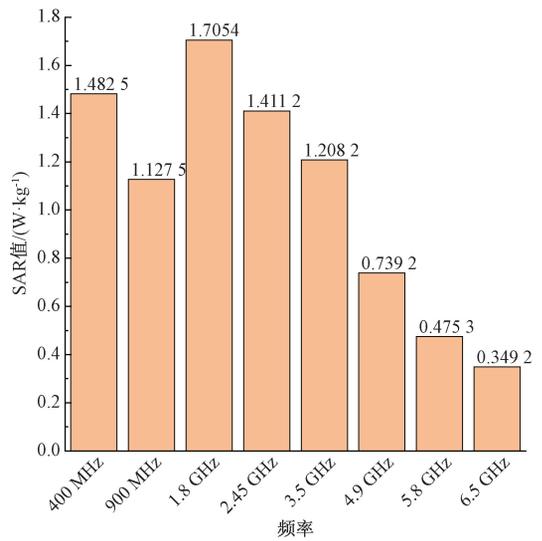


图 6 功率 1 W 不同频率电磁波辐射最大 SAR 值

Fig. 6 Maximum SAR value of electromagnetic waves of different frequencies under 1 W irradiation

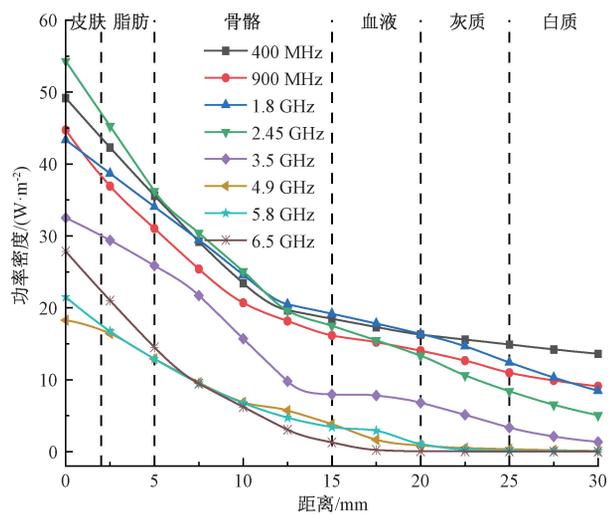


图 7 统一 SAR 值为 2 W/kg 时功率密度值分布

Fig. 7 Power density distribution when SAR value is 2 W/kg

ISM 2.45 GHz 频段是植入式天线的最常用频段,仿真发现,2.45 GHz 在皮下 5 mm 内皮肤与脂肪浅表层中是植入式设备的优势频率,然而随着组织的深入,高频段电磁损耗逐渐增大,如表 2 所示,在皮下 15 mm 骨骼与灰质间以及皮下 25 mm 脑白质组织处,1.8 GHz 与 400 MHz 的功率密度更大,相较于 2.45 GHz 分别提高了 9.6% 与 77.4%,是对应深度上植入式设备频率的合适选择。

表 2 400 MHz、1.8 GHz、2.45 GHz 在不同深度处功率密度  
Table 2 Power density of 400 MHz, 1.8 GHz,  
2.45 GHz at different depths

功率密度 W/m <sup>2</sup>	5 mm	15 mm	25 mm
400 MHz	35.61	18.50	<b>14.91</b>
1.8 GHz	34.07	<b>19.18</b>	12.41
2.45 GHz	<b>36.25</b>	17.51	8.40

### 3 结 论

人体信道损耗与电磁辐射危害是设计植入式设备时需要考虑的重要因素。本文使用 CST 电磁仿真软件,以无线植入式脑电极为例,利用 4 阶 Cole-Cole 公式获得人体组织介电参数,建模精密人头体素模型,仿真分析了不同频率的电磁波在头部组织的电磁场分布、功率密度损耗以及辐射 SAR 值,得出如下结论:首先,电磁波在人头组织中的路径损耗随着组织深度的增加而变大,不同频率电波在组织中衰减特性不同,3.5 GHz 以下频段信道损耗较小,功率密度在皮下 25 mm 组织内衰减不超过 10 dB,是植入式脑电极考虑充能效率的优先选择。其次,从 SAR 值仿真结果来看,人头组织对不同频率的电磁辐射吸收能力不同,其中 1.8 GHz 吸收的 SAR 达到了最大值,在 1 W 功率下为 1.705 4 W/kg。整体来看,高频段 SAR 值小于低频段,因此在无线通信应用上,可以使用 4.9 GHz 以上高频信号来减小电磁辐射对人体的危害。最后,综合考虑信道损耗与辐射危害,植入式脑电极的合适频率随植入深度变化:2.45 GHz 频段电磁波适合头部皮下 5 mm 内植入式脑电极,1.8 GHz 与 400 MHz 分别是皮下 15 mm 与 25 mm 处植入式脑电极的最优频率,充能效率更高,功率密度相较于 2.45 GHz 分别增加了 9.6% 与 77.4%。本文研究展示了人体电磁仿真与测量的创新性思路,仿真结果可为植入式脑电极、无线收发器等工程应用设计中的链路预算、最大安全功率计算及最优频率选择等提供依据。

### 参考文献

- [ 1 ] 石晶晶,刘力嘉,韩福晔,等. 人体通信频段体内至体表信道特性分析与建模[J]. 电子与信息学报,2022,44(5):1819-1827.  
SHI J J, LIU L J, HAN F Y, et al. In-body to on-body channel characteristics analysis and modeling in human body communication frequency band [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44 ( 5 ): 1819-1827.
- [ 2 ] 郭志明,梁亮,蔺代永,等. 胶囊机器人磁驱动力建模与测量[J]. 仪器仪表学报,2022,43(1):253-261.  
GUO ZH M, LIANG L, LIN D Y, et al. Modeling and

measurement of magnetic driving force in the capsule robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43 ( 1 ): 253-261.

- [ 3 ] 苏禹鸣. 多通道多功能柔性植入式脑电极的制备及应用[D]. 武汉:华中科技大学,2023.  
SU Y M. Fabrication and application of flexible multi-channel and multifunctional implantable brain electrode[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [ 4 ] 韩凌,李栋,王增霖,等. 基于人脸表情与脑电信号的情绪识别系统[J]. 国外电子测量技术,2023,42(10):190-195.  
HAN L, LI D, WANG Z L, et al. Design of an emotion recognition system based on facial expressions and EEG signals[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023,42(10):190-195.
- [ 5 ] 陈玉俊. 一种植入式人体通信芯片的设计实现[J]. 中国医疗设备,2023,38(8):58-66.  
CHEN Y J. Design and implementation of an implantable human communication chip[J]. China Medical Devices, 2023, 38(8):58-66.
- [ 6 ] 张祁梦莎,胡永建,孙成芹,等. 井下 NFC 天线的研究及仿真分析[J]. 电子测量技术,2024,47(1):17-22.  
ZHANG Q M SH, HU Y J, SUN CH Q, et al. Research and simulation analysis of downhole NFC antenna [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47 ( 1 ): 17-22.
- [ 7 ] KURUP D, VERMEEREN G, TANGHE E, et al. In-to-out body antenna-independent path loss model for multilayered tissues and heterogeneous medium [J]. Sensors, 2014, 15(1):408-421.
- [ 8 ] 李滚,李斌,严雅静,等. 人体组织等效电学参数的计算与应用[J]. 材料导报,2011,25(16):153-155,159.  
LI G, LI B, YAN Y J, et al. Calculation and application of effective electromagnetic parameters of human tissue [J]. Materials Reports,2011,25(16):153-155,159.
- [ 9 ] 闵靖. 电力环境谐波辐照对平衡感知影响的研究[D]. 南京:东南大学,2021.  
MIN J. Study on the influence of harmonic irradiation on balance perception in electric power environment [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [ 10 ] 何迪威,陈志英,唐丹枫,等. 植入式医疗器件通信与充电场景的电磁辐射安全研究进展[J]. 辐射防护,2023,43(3):193-208.  
HE D W, CHEN ZH Y, TANG D F, et al. Progress of research on electromagnetic radiation safety of implantable medical devices [J]. Radiation Protection, 2023,43 ( 3 ):193-208.
- [ 11 ] 陈登鹏,逯迈. 5G 手机天线辐照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): 75-90.
- CHEN D P, LU M. Radiation characteristics of 5G mobile phone antenna and its temperature field distribution in human head [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, 39 (3): 75-90.
- [12] 车克龙, 廖薇, 周灵丽. 超宽带信号在运动人体下阴影衰落对通信性能的影响[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 155-162.
- CHE K L, LIAO W, ZHOU L L. Influence of shadow fading of UWB signal under moving human body on communication performance [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (5): 155-162.
- [13] LAAKSO I, UUSITUPA T, ILVONEN S. Comparison of SAR calculation algorithms for the finite-difference time-domain method [J]. Physics in Medicine & Biology, 2010, 55(15): N421.
- [14] PERMANA H, FANG Q, LEE S Y. Comparison study on specific absorption rate of three implantable antennas designed for retinal prosthesis systems[J]. IET Microw. Antennas Propag, 2013, 7: 886-893.
- [15] ZRADZINSKI P, KARPOWICZ J, GRZYK K. Electromagnetic energy absorption in a head approaching a radio-frequency identification (RFID) reader operating at 13.56 MHz in users of hearing implants versus non-users [J]. Sensors, 2019, 19(17): 16.
- [16] 侯宋跃. 基于人体通信的信道传输相关特性研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.
- HOU S Y. Research on channel transmission characteristics based on human body communication[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering and Technology, 2021.
- [17] 隋耀宗. 用于人体区域通信的可植入天线与可穿戴天线设计[D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
- SUI Y Z. Design of implantable and wearable antennas for human body area communication [D]. Qingdao: Qingdao University, 2023.
- [18] GABRIEL S, LAU R W, GABRIEL C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues [J]. Physics in Medicine and Biology, 1996, 41(11): 2271-2293.
- [19] ANDREUCETTI D, FOSSI R, PETRUCCI C. An internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz-100 GHz [EB/OL]. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop>, 2021.
- [20] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 21288-2022, 移动通信终端电磁辐射暴露限值[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB21288-2022. Limits for human exposure to electromagnetic fields emitted by mobile communication terminals[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [21] SCHWERDT H, MIRANDA F, CHAE J. Analysis of the electromagnetic fields induced in operation of a wireless fully passive backscattering neurorecording microsystem in emulated human head tissue [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(5): 2170-2176.
- [22] HOUT S, CHUNG J Y. Design and characterization of a miniaturized implantable antenna in a seven-layer brain phantom [J]. IEEE Access, 2019, 7: 162062-162069.
- [23] 兰舒. 基于 BLE 的植入式无线供电神经刺激模块研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
- LAN SH. Study of implantable wireless powered nerve stimulation module based on BLE [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2022.
- [24] 王鸿宇. 基于多模态磁共振成像的帕金森病脑网络研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- WANG H Y. Multimodal magnetic resonance imaging based research on Parkinson's disease brain networks [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2022.
- [25] 陈志英, 高跃明, 杜民. 植入式人体通信中电磁波在不同组织分界面上的传播特性研究[J]. 电波科学学报, 2017, 32(2): 134-143.
- CHEN ZH Y, GAO Y M, DU M. Electromagnetic wave transmission characteristics on different tissue boundaries for implantable human body communication [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017, 32(2): 134-143.
- [26] 陈志英, 林峰, 龚赞, 等. 基于平面波斜入射的人体信道远场路径损耗建模[J]. 电波科学学报, 2022, 37(5): 782-792.
- CHEN Z Y, LIN F, GONG Z, et al. Modelling for far-field pathloss of body channel based on plane wave oblique incidence [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2022, 37(5): 782-792.
- [27] 宫腾飞, 廖薇. 面向人体通信的皮层脑电信号传输特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(11): 100-108.
- GONG T F, LIAO W. Research on the transmission characteristics of ECoG signal for human body communication [J]. Journal of Electronic Measurement

and Instrumentation, 2023, 37(11): 100-108.

## 作者简介



**程佳君**, 2022 年于东南大学获得学士学位, 现为东南大学仪器科学与工程学院硕士研究生, 主要研究方向为微波辐射与无线传感技术。

E-mail: 220223301@seu.edu.cn

**Cheng Jiajun** received his B. Sc. degree from Southeast University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in the School of Instrument Science and Engineering at Southeast University. His main research interests include microwave radiation and wireless sensing technology.



**陈翰** (通信作者), 1999 年及 2005 年于东南大学获得学士学位与硕士学位, 2010 年于上海交通大学获得博士学位, 现为东南大学仪器科学与工程学院副教授, 主要研究方向为无线通信、物联网技术和光纤传感系统。

E-mail: HanChen@seu.edu.cn

**Chen Han** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Southeast University in 1999 and 2005, and the Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2010. Now he is an associate professor in the School of Instrument Science and Engineering at Southeast University. His

main research interests include wireless communication, IoT technology and fiber optic sensing systems.



**刘翔宇**, 2023 年于长春理工大学获得学士学位。现为东南大学硕士研究生, 主要研究方向为传感器、无线传感技术和深度学习。

E-mail: 220233587@seu.edu.cn

**Liu Xiangyu** received his B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2023. Now he is a M. Sc. candidate at Southeast University. His main research interests include sensors, wireless sensing technology, and deep learning.



**秦江帆**, 2020 年及 2023 年于青岛科技大学获得学士学位与硕士学位, 现为东南大学仪器科学与工程学院博士研究生, 主要研究方向包括雷达信号分析、射频信号和无线感知。

E-mail: jf.qin@seu.edu.cn

**Qin Jiangfan** received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Qingdao University of Science and Technology in 2020 and 2023. Now he is a Ph. D. candidate in the School of Instrument Science and Engineering at Southeast University. His main research interests include radar signal analysis, radio frequency signal, and wireless sensing technology.