

## 面向头部可穿戴式设备的体表传输特性研究

熊竹, 廖薇

上海工程技术大学电子电气工程学院, 上海 201620

**【摘要】**首先,采用时域有限差分方法建立超宽带(UWB)传输系统;然后,对头部穿戴设备模型中的输入阻抗特性、传输特性以及电场分布进行分析,明确设备间的UWB传输机制;最后,对人体模型进行简化,并对比简化前后模型的路径损耗。结果表明本研究提出的UWB传输系统路径损耗低,传输特性稳定,对面向头部可穿戴设备体表传输技术的发展具有重要意义。

**【关键词】**可穿戴设备;人体通信技术;超宽带;传输特性

**【中图分类号】**R318;TN911

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2024)07-0864-06

### Body surface transmission characteristics for head wearable devices

XIONG Zhu, LIAO Wei

School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

**Abstract:** The finite difference time domain method is used to establish the ultra wide band (UWB) transmission system; the input impedance characteristics, transmission characteristics, and electric field distribution in the head wearable device model are analyzed to clarify the UWB transmission mechanism between the devices; and the path loss before and after the simplification of the human body model is compared. The results show that the proposed UWB transmission system has low path loss and stable transmission characteristics, which is of great significance for the development of body surface transmission technology for head wearable devices.

**Keywords:** wearable device; human communication technology; ultra wide band; transmission characteristic

### 前言

随着电子产品微型化和无线通信技术快速发展,信息通信设备逐渐从移动式向可穿戴转变<sup>[1]</sup>,智慧医疗服务设备应用越来越广泛。无线体域网络是附着在人体附近的设备网络<sup>[2]</sup>,医疗穿戴设备可通过无线体域网络连接进行数据交互,在不影响人体正常活动前提下,利用人体组织实现人与物随时随地的信息交流<sup>[3-4]</sup>。超带宽信号通常指相对带宽超过20%~25%的信号<sup>[5-6]</sup>,在低功耗、抗衰减等方面具有优势<sup>[7-10]</sup>,在可穿戴设备的应用研究方面有发展潜力。

Liao等<sup>[11]</sup>针对可穿戴医疗检测设备在体域网中的应用进行研究,评估设备控制的生物传感器的电磁干扰,并提出一种利用生物传感器测量人体与接地层之间由外部正弦或脉冲电磁场产生的共模电压的方法,这种方法为在设计阶段评估可穿戴设备的干扰性提供检测手段。车克龙等<sup>[12]</sup>进一步对人体通信中穿戴式医疗设备的通信性能进行研究,使用人体模型,通过电磁仿真分析法研究体表信道,为体域网体表链路中医疗设备接收机的设计提供理论依据。Prananto等<sup>[13]</sup>对电子健康监测可穿戴设备(尤其是智能手表)的传输特性进行测量,结果表明使用人体组织液体等效模型会影响智能手表的性能和信号传播,这可能是由于人体可以吸收或反射智能手表发出的信号。Shukur等<sup>[14]</sup>提出一种可穿戴设备的安全协议,旨在保护用户身份并隐藏他们的个人敏感数据,以此创建一个安全的可穿戴设备数据处理环境。

本研究从两个助听器之间的通信考虑出发,提出一种使用人体作为传输媒介的超宽带(Ultra Wide

**【收稿日期】**2024-01-15

**【基金项目】**国家自然科学基金(62001282)

**【作者简介】**熊竹,硕士研究生,研究方向:人体区域通信, E-mail: 1429860459@qq.com

**【通信作者】**廖薇,副教授,硕士生导师,上海高校青年东方学者,研究方向:人体区域通信、生物电磁学、医疗领域或电磁兼容性, E-mail: liaowei54@126.com

Band, UWB)传输系统,并分析两个头戴式可穿戴设备之间的UWB传输特性。图1为UWB传输系统的示意图,助听器的电极贴附在皮肤上,建立适用于实际应用场景的人体通信信道模型,并详细分析传输特性、输入阻抗特性及围绕人体头部电磁分布,验证在UWB传输系统中可穿戴设备传输的稳定性,并对比分析了传统无线通信频段的传输特性。

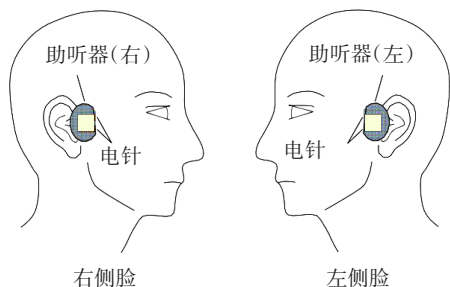


图1 由两个头戴式可穿戴设备(助听器)组成的UWB传输系统  
Figure 1 UWB transmission system consisting of two wearable devices (hearing aids)

## 1 电磁分析方法

采用时域有限差分电磁分析(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法计算分布在人体模型表面的电场和磁场,FDTD是目前公认的最适用于人体电磁场数值分析方法<sup>[15]</sup>。本研究设定的电磁场边界条件为完全匹配层吸收边界条件。使用二阶微分高斯脉冲作为激励源,因为此类信号容易被实际脉冲发生器产生,并能高效地辐射出去。人体组织具有复杂的介电特性,其相对介电常数及电导率与频率密切相关,这意味着无线信号在体域网中的传播会受到人体组织的极大影响。人体组织的复介电常数可通过德拜方程计算得出<sup>[16]</sup>:

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_\infty + \chi(\omega) + \frac{\sigma_0}{j\omega\epsilon_0} \quad (1)$$

其中, $\epsilon_\infty$ 和 $\chi(\omega)$ 与生物组织频率弥散性相关; $\epsilon_r$ 为介电特性参数,是一种可以表征人体介电特性的频率函数; $\epsilon_0$ 是自由空间中的电导率; $\sigma_0$ 是频域为零时的离子电导率; $\omega$ 是角频率; $\epsilon_\infty$ 是频率为无穷大时的相对介电常数; $\chi(\omega)$ 是频域磁化系数。

本研究通过构建静态人体模型来模拟真实人体穿戴助听器的情况,利用电磁仿真软件和FDTD数值分析方法,分析电磁波信号在静态人体表面的传输特性。 $S$ 是散射参数,用于描述传输信道在频域的特性。 $S_{21}$ 表示插入损耗,即从端口1传输到端口2的能量。由于发射端作为能量注入端口,接收端为能量

接收端口,因此, $S$ 也可用来表示路径损耗。通过在人体头部左右耳各放置一个发射器和接收器,研究左耳到右耳通信链路的 $S_{21}$ 参数特性,即从发射器发出的电磁波沿人体表面传输到接收器过程中的路径损耗<sup>[17-18]</sup>。路径损耗可以由式(2)表示:

$$S = PL_{dB} = 10n\lg(d) + C \quad (2)$$

其中, $PL_{dB}$ 表示路径损耗,该路径损耗以dB为单位; $n$ 表示路径损耗指数; $d$ 表示发射器与接收器间的通信距离; $C$ 表示系统损耗的常数。

## 2 模型建立

为有效地节约硬件资源,本研究基于磁共振成像技术采集的人体截面切片的灰度图像数据建立模型,其数据来源于日本情报通信研究机构(National Institute of Information and Communications Technology, NICT)。模型以 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的立方体单元为基本单位,构成全身数字人体模型和简化的人体头部模型<sup>[19-20]</sup>。数字模型包含人体多种组织类型,如骨髓、肌肉、皮肤、细胞等。人体模型参数参考亚洲成年男性生理参数的统计平均值<sup>[21]</sup>,年龄33.35岁,身高168.76 cm,体重64.73 kg。人体模型如图2所示。

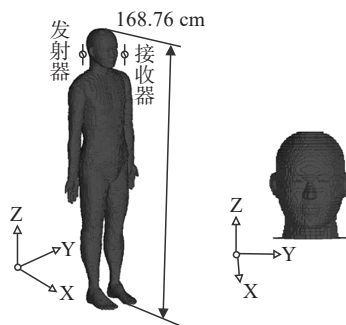


图2 人体模型尺寸  
Figure 2 Human body model size

如图3所示,发射器和接收器由两个方形电极和一个激励源组成,以模拟赫兹偶极子天线。所有的发射器和接收器均采用完美的导体材料。赫兹偶极子天线不仅可以作为检测生物信号的传感器,同时也可以作为发射器来传输信号,这种方法有助于减少可穿戴设备的尺寸和规格。在2.4~2.5 GHz WC频段中,采用偶极子天线<sup>[22]</sup>作为发射器和接收器。这种天线由长度为54 mm的PEC元件构成,发射器端有一个内部阻抗为 $50\ \Omega$ 的馈电点,接收器端则有一个 $50\ \Omega$ 的无源负载。图4显示了在2.4~2.5 GHz WC频段仿真中天线的位置。

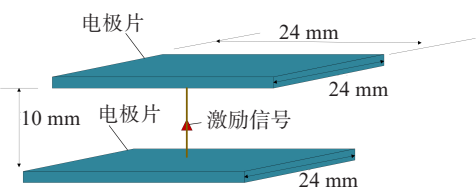


图3 赫兹偶极子发射器和接收器  
Figure 3 Hertz dipole transmitter and receiver

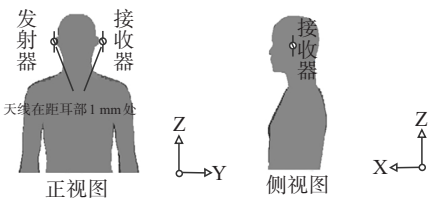


图4 2.4~2.5 GHz WC天线位置  
Figure 4 Antenna locations at 2.4~2.5 GHz WC frequency

3 人体对信号传输的影响

根据两个设备间电磁波传播方式的不同,可以分为视距(Line of Sight, LOS)信道和非视距(Non Line of Sight, NLOS)信道<sup>[23-24]</sup>。本研究中,两个设备分别处于人体左侧及右侧,属于NLOS传播,此场景下电磁波可能会由于围绕身体衍射而产生损耗。本节进一步研究人体对头戴式可穿戴设备之间通信的影响。对2.4~2.5 GHz WC和3.1~4.8 GHz UWB低频段在LOS和NLOS两种情境下进行分析。在2.4~2.5 GHz和3.1~4.8 GHz频段的仿真中,接收器和发射器的天线馈电点及接收负载的阻抗均设定为50 Ω。如图5、6所示,通过电磁分析方法计算出不同频段下的路径损耗。结果显示在2.4~2.5 GHz频段,人体对路径损耗的影响极大。在3.1~4.8 GHz频段,NLOS条件下的路径损耗与LOS条件下的路径损耗仅相差10 dB左右,在该频段人体对路径损耗影响不大,且本研究提出的UWB传输系统在NLOS情况下的路径损耗比常用无线通信频段NLOS情况下低很多。

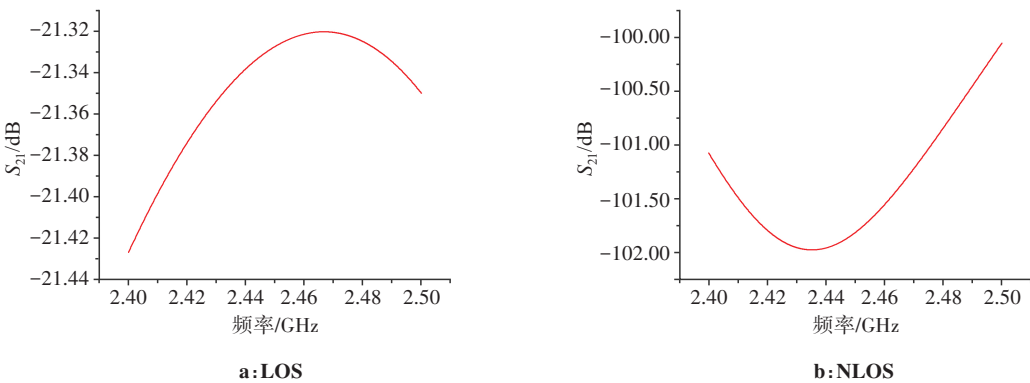


图5 2.4~2.5 GHz条件下的路径损耗  
Figure 5 Path loss at 2.4~2.5 GHz

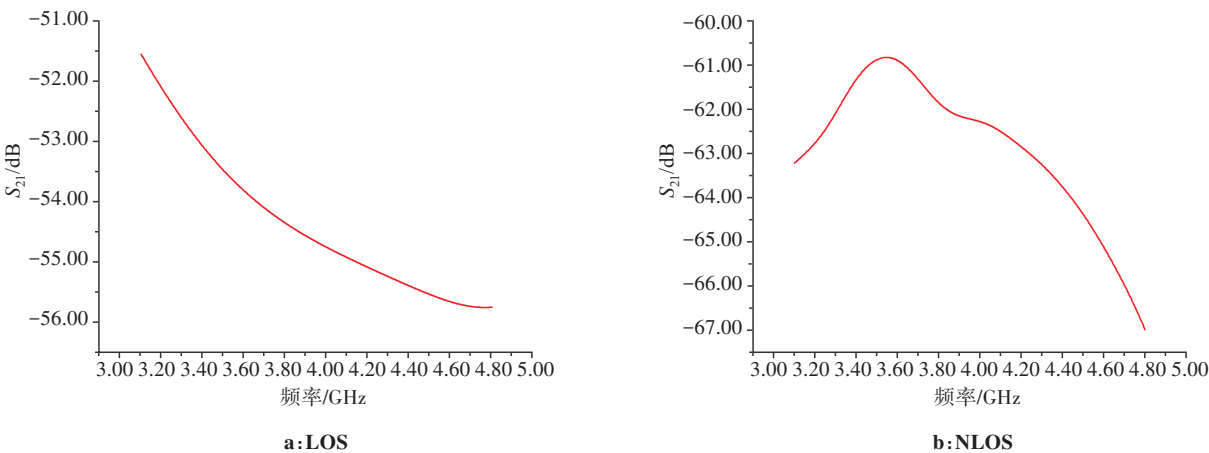


图6 3.1~4.8 GHz条件下的路径损耗  
Figure 6 Path loss at 3.1~4.8 GHz



图7为2.45 GHz(中心频率)下LOS和NLOS两种条件下的电场分布,图8为3.95 GHz(中心频率)下LOS和NLOS两种条件下的电场分布。表1为对应情境下的传输特性。电场分布均是在y-z平面内观察,其中黑色人体轮廓线概述了人体模型与自由空间之间的边界。在中心频率2.45 GHz时,人体阻挡了接收器与发射器之间的电场,因此2.45 GHz WC频段的信号无法传播(图7)。在UWB传输系统中,当通信频率为3.95 GHz时,信号能通过头部传播(图8)。

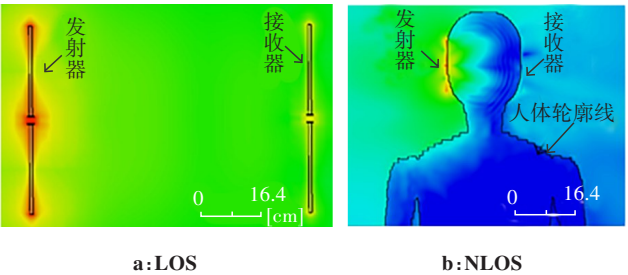


图7 2.45 GHz 频率下电场分布  
Figure 7 Electric field distribution at 2.45 GHz frequency

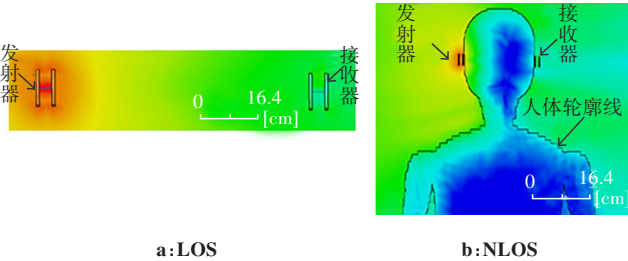


图8 3.95 GHz 频率下电场分布  
Figure 8 Electric field distribution at 3.95 GHz frequency

表1 4种仿真条件下的传输特性

中心频率/GHz	输入阻抗实部/ $\Omega$	输入阻抗虚部/ $\Omega$	路径损耗/dB
2.45(LOS)	22.7	-14.0	21.0
2.45(NLOS)	115.7	263.0	101.0
3.95(LOS)	14.7	77.9	54.0
3.95(NLOS)	27.0	110.0	62.1

表1表示4种仿真条件下的传输特性。在中心频率2.45 GHz时,在距离馈电点16.4 cm的自由空间中,LOS和NLOS条件下的路径损耗分别是21.0和101.0 dB,人体使电场衰减80 dB。同理,在中心频率3.95 GHz时,LOS和NLOS条件下的路径损耗分别是54.0和62.1 dB,在相同自由空间中人体使电场衰减

小于9 dB。因此,2.45 GHz无线通信频段不适合在存在人体的环境中使用,如头戴式可穿戴设备间的通信。在有人体阻挡的NLOS情境下,3.95 GHz通信频率比2.45 GHz的路径损耗低38.9 dB,由于电场呈指数下降,信号沿人体传播时不会干扰其他设备,这一特性有利于保密通信和电磁兼容性。这些结果表明,3.1~4.8 GHz UWB频段相比2.4~2.5 GHz WC频段更适合用于可穿戴设备间的通信,且UWB传输系统降低了功耗。

#### 4 体表传输特性分析

##### 4.1 人体模型简化

为在计算机资源与计算结果准确性之间寻求平衡,需要简化模型,但不能显著影响其传输特性和电场分布的计算。图9b展示模型是从全身人体模型中提取出,由23个生物组织构成的头部模型,这个模型删除了身体的其他部分,从而减少内存占用、CPU/GPU功率以及计算时间,大大节省计算机资源。然而,考虑到躯干和四肢可能影响电磁场的分布和传输特性,需要对这个简化模型进行验证。

本研究选用方形赫兹偶极子作为信号接收器和发射器,通过分析3.1~4.8 GHz频段下的信号传输,对简化模型进行验证。在实验中,接收器和发射器的馈电点以及接收负载的阻抗都设定为50  $\Omega$ 。图9展示了在载波频率为3.95 GHz时,全身人体模型和详细头部模型电场分布的计算结果。电场分布的观察是在y-z平面上进行的,其中黑色人体轮廓线划定了人体模型与自由空间之间的边界。表2列出了电极输入阻抗的电阻虚数分量和电阻实数分量以及发射器和接收器之间的路径损耗。通过比较图9,发现在全身人体模型和详细头部模型中,头部周围和内部的电场分布几乎相同,这是因为在载波频率为3.95 GHz时,其波长大于人体的总长度,因此电场分布主要由局部条件,即头部决定。3.95 GHz仿真条件下,全身人体模型和头部模型的路径损耗分别是62.10和61.84 dB,所有的传输参数基本不受颈部以下身体部位的影响。在分析UWB的传输特性时,为权衡资源需求与计算结果的准确性,选择忽略颈部以下的身体部位。后续的研究将采用详细的头部模型。

##### 4.2 传输特性分析

如图10所示,在3.1~4.8 GHz通信频段中,输入阻抗的实部分量值由频率为3.1 GHz时的18.2  $\Omega$ 上升至频率4.8 GHz时的27.0  $\Omega$ ,输入阻抗虚部分量值由频率为3.1 GHz时的79.0  $\Omega$ 上升至频率为4.8 GHz时的

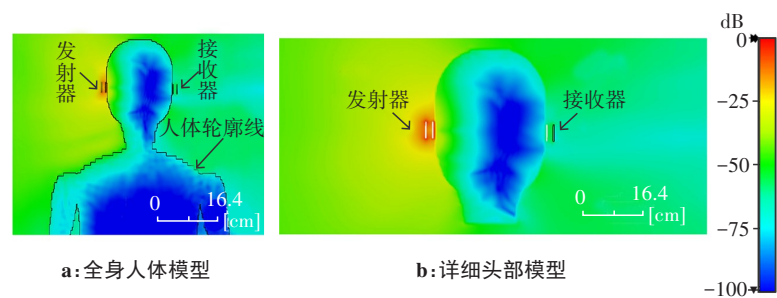


图9 人体模型周围和内部的电场分布  
Figure 9 Electric field distribution around and inside the human body model

表 2 2种仿真条件下的传输特性			
Table 2 Transmission characteristics under 2 simulation conditions			
仿真条件 (3.95GHz)	输入阻抗实部/ $\Omega$	输入阻抗虚部/ $\Omega$	路径损耗/dB
全身人体模型	27	110	62.10
简化头部模型	27	110	61.84

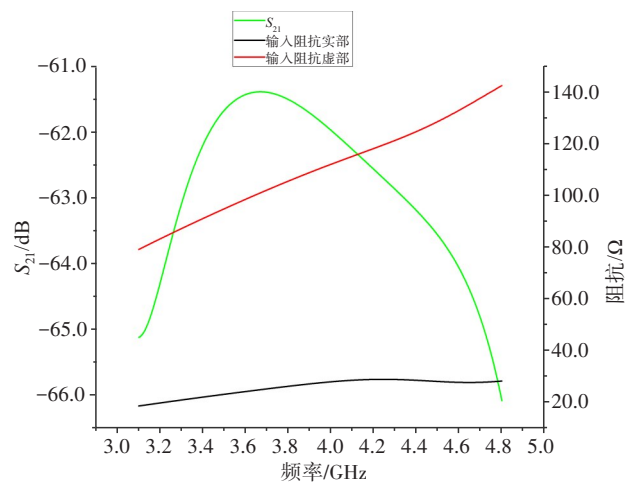


图10 头部模型传输分析  
Figure 10 Head model transmission analysis

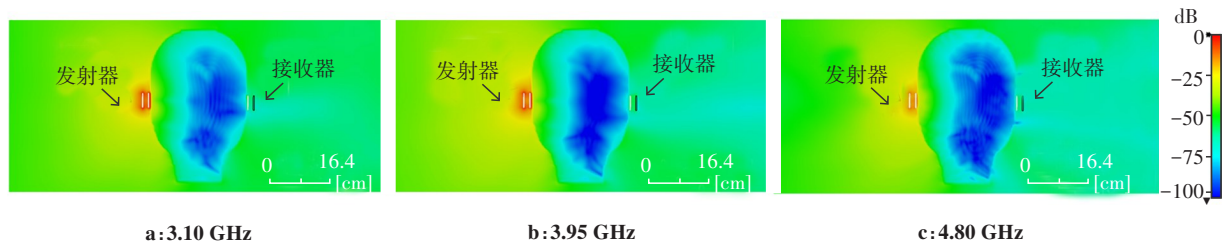


图11 头部模型内部和周围电场分布  
Figure 11 Electric field distributions inside and around the head model

**5 总 结**

本研究应用FDTD方法,明确头戴式可穿戴设备间UWB传输机制、收发器的输入阻抗特性、传输特

性和头部模型附近的电场分布。使用全身人体模型,分析NLOS和LOS情况下,常见的无线通信频段2.4~2.5 GHz以及3.1~4.8 GHz UWB低频段下的传输141.9  $\Omega$ 。可以看出,随着载波频率的增加,输入阻抗实数分量和虚数分量呈上升趋势, $S_{21}$ 数值分布在-66.0~-61.8 dB。

图11展示了y-z平面内3.10、3.95、4.80 GHz频率下人体头部及其周围的电场分布。从图中可以看出,收发器电场不是穿透头部,而是环绕头部形成,这意味着生物组织中的电流很小,从人体安全的角度来看,这一发现是有利的。在3.1~4.8 GHz的频段内,信号频率对于收发器的传输特性和电场分布的影响不大,表明传输特性在3.1~4.8 GHz的频段内是稳定的。

本研究探讨体表传输特性的多个影响因素,包括传输频率、人体的介电特性、输入阻抗以及信号传播环境,结果表明在3.1~4.8 GHz UWB低频段中,路径损耗明显优于2.4~2.5 GHz WC的常用无线通信频段。本研究提出的UWB传输系统具有低路径损耗和高电磁兼容性等优点,同时通过人体模型的合理简化方法来节省计算资源;然而,该方法的计算复杂性高,并需要更多实验数据来验证其准确性。总体来说,本研究对面向头部可穿戴设备体表传输技术的发展具有重要意义。

性和头部模型附近的电场分布。使用全身人体模型,分析NLOS和LOS情况下,常见的无线通信频段2.4~2.5 GHz以及3.1~4.8 GHz UWB低频段下的传输

特性,研究发现3.1~4.8 GHz频段更适合头戴式可穿戴设备的传输。此外,为了在节省计算资源的同时保持计算结果的准确性,通过分析全身人体模型和头部模型的传输特性及电场分布,验证详细头部模型的有效性。然后,通过分析3.1~4.8 GHz UWB低频段的传输特性和电场分布,验证UWB传输系统中信号传输稳定性,发现信号频率对穿戴设备传输特性和电场分布影响较小。未来的工作可以研究个体差异和通信环境等因素对通信质量的影响,并通过阻抗匹配方式改善头戴式可穿戴设备接收器的通信质量。

## 【参考文献】

- [1] Muramatsu D, Yokoyama Y, Sasaki K. Clarification of transmission mechanism in Human body communication between head-mounted wearable devices with detailed model [C]//2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 740-743.
- [2] Movassaghi S, Abolhasan M, Lipman J, et al. Wireless body area networks: a survey[J]. IEEE Commun Surv Tutor, 2014, 16(3): 1658-1686.
- [3] 徐自远,姜宇.基于无线网络的可穿戴式人体健康监测系统[J].自动化技术与应用, 2023, 42(9): 58-62.  
Xu ZY, Jiang Y. Wearable human health monitoring system based on wireless network[J]. Techniques of Automation and Applications, 2023, 42(9): 58-62.
- [4] Mohammadi Z, Saadane R, Aboutajdine D. New high-rate UWB scheme for WBAN-based healthcare systems[J]. Prog Electromagn Res B, 2014, 60: 125-139.
- [5] Fowler C, Entzminger J, Corum J. Assessment of ultra-wideband (UWB) technology[J]. IEEE Aerosp Electron Syst Mag, 1990, 5(11): 45-49.
- [6] 葛利嘉,曾凡鑫,刘郁林,等.超宽带无线通信[M].北京:国防工业出版社,2005.  
Ge LJ, Zeng FX, Liu YL, et al. Ultra wide band wireless communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [7] Yang LQ, Giannakis GB. Ultra-wideband communications: an idea whose time has come[J]. IEEE Signal Process Mag, 2004, 21(6): 26-54.
- [8] Aiello GR, Rogerson GD. Ultra-wideband wireless systems[J]. IEEE Microw Mag, 2003, 4(2): 36-47.
- [9] Hasan Z, Phuyal U, Yadav V, et al. ISI-free pulses for high-data-rate ultra-wideband wireless systems[J]. Can J Electr Comput Eng, 2007, 32(4): 187-192.
- [10] Sakib MN, Hraimel B, Zhang XP, et al. Impact of optical transmission on multiband OFDM ultra-wideband wireless system with fiber distribution[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(18): 4112-4123.
- [11] Liao W, Nagai K, Wang JQ. An evaluation method of electromagnetic interference on bio-sensor used for wearable robot control[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2020, 62(1): 36-42.
- [12] 李克龙,廖薇,周灵丽,等.基于人体通信的穿戴式医疗设备通信性能分析[J].中国医学物理学杂志, 2022, 39(3): 357-363.  
Che KL, Liao W, Zhou LL, et al. Communication performance of wearable medical equipment based on human body communication [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2022, 39(3): 357-363.
- [13] Prananto HD, Bakti AN, Ardiatna W, et al. Measurement of wireless on body propagation characteristics from e-Health monitoring wearable device [C]//2023 IEEE 7th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2023: 42-43.
- [14] Shukur F, Fatlawi A. Privacy and security awareness for sensitive/non-sensitive data based wearable devices [C]//2022 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 1-4.
- [15] Ha SG, Jung KY. Dispersive FDTD modeling of human body[J]. J Korean Inst Electromagn Eng Sci, 2020, 31(3): 205-215.
- [16] Wang JQ, Wang Q. Electromagnetic characteristics of the human body [M]//Body Area Communications. Singapore: John Wiley & Sons Inc., 2012: 21-53.
- [17] Le TT, Yun TY. Wearable dual-band high-gain low-SAR antenna for off-body communication[J]. IEEE Antennas Wirel Propag Lett, 2021, 20(7): 1175-1179.
- [18] Fan J, Zhang L, Wang T, et al. The influence on medical activities by mobile medical application [C]//2018 4th Annual International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 104-106.
- [19] 李少华,聂泽东,李景振,等.人体通信不同信道传播特性的研究[J].计算机工程与应用, 2017, 53(18): 67-72.  
Li SH, Nie ZD, Li JZ, et al. Study on propagation characteristic of different channels of human body communication [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(18): 67-72.
- [20] Mao JN, Yang HZ, Lian Y, et al. A five-tissue-layer human body communication circuit model tunable to individual characteristics[J]. IEEE Trans Biomed Circuits Syst, 2018, 12(2): 303-312.
- [21] Nagaoka T, Watanabe S, Sakurai K, et al. Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry[J]. Phys Med Biol, 2004, 49(1): 1-15.
- [22] Muramatsu D, Sasaki K. Transmission analysis in human body communication for head-mounted wearable devices[J]. Electronics (Basel), 2021, 10(10): 1213.
- [23] Ahmed BT. Propagation loss measurement of wireless body area network at 2.4 GHz and 3.35 GHz bands[J]. Wirel Pers Commun, 2020, 112(2): 685-716.
- [24] Goswami D, Sarma KC, Mahanta A. Path loss variation of on-body UWB channel in the frequency bands of IEEE 802.15.6 standard[J]. Healthc Technol Lett, 2016, 3(2): 129-135.

(编辑:谭斯允)