



用于 UHF RFID 和 WLAN 双频段的智能手套天线

吕涅奇,李霖,顾小卫

(浙江理工大学信息学院,杭州 310018)

摘要:为解决智能手套中 RFID(Radio frequency identification)阅读器天线在 WLAN 频段数据分发问题,设计了一种工作于 UHF RFID 和 WLAN 双频段的小型化可穿戴天线。采用非对称共面技术缩小天线接地面积,通过折叠天线辐射体实现双频工作,同时可进一步缩小天线面积。将天线附着于不同材质的手套及不同穿戴者身上测试天线的鲁棒性,对辐射方向图与比吸收率进行仿真分析以验证天线的辐射特性与安全性。结果表明:天线在 900 MHz 和 2.40 GHz 处实测工作频段分别为 0.69~1.03 GHz、1.29~3.00 GHz,可实现 UHF RFID 与 WLAN 频段通信。改变手套材质和测试者体型时,天线仿真与实测回波损耗相接近,具有较宽带宽。该天线设计简单、性能稳定,且辐射方向稳定,对人体危害较小,在智能手套领域具有一定应用前景。

关键词: 智能手套;UHF;WLAN;非对称共面;天线

中图分类号: TS820

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2023)01-0097-07

引文格式: 吕涅奇,李霖,顾小卫. 用于 UHF RFID 和 WLAN 双频段的智能手套天线[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(1):97-103.

Reference Format: LÜ Shengqi, LI Lin, GU Xiaowei. Smart glove antenna for UHF RFID and WLAN dual-band applications[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University,2023,49(1):97-103.

Smart glove antenna for UHF RFID and WLAN dual-band applications

LÜ Shengqi, LI Lin, GU Xiaowei

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the problem of data distribution in the WLAN frequency band of the RFID (radio frequency identification) reader antenna in smart gloves, a miniaturized wearable antenna that works in both UHF RFID and WLAN frequency bands is designed. The antenna adopts asymmetric coplanar technology to reduce the ground area of the antenna, and realizes dual-frequency operation by folding the antenna radiator, which further reduces the antenna area at the same time. To verify the robustness of the antenna, the antenna was attached to gloves of different materials and tested on different wearers. In order to reflect the radiation characteristics and safety of the antenna, we analyzed the simulation results of the radiation pattern and specific absorption rate. The results show that the measured working frequency bands of the antenna at 900 MHz and 2.40 GHz are 0.69-1.03 GHz and 1.29-3.00 GHz, respectively, which can realize the communication between UHF RFID and WLAN frequency bands. When the glove material and the tester's body shape are changed, the antenna simulation is close to the measured return loss and has a wider bandwidth. The antenna, simple in design, stable in performance and radiation direction, does little harm to the human body and has certain application prospects in the field of smart gloves.

Key words: smart gloves; UHF; WLAN; asymmetric coplanar strip; antenna

收稿日期: 2022-07-03 网络出版日期: 2022-09-14

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室开发基础研究课题(SKLLIM2113)

作者简介: 吕涅奇(1997—),男,江苏扬州人,硕士研究生,主要从事微波技术与天线设计方面的研究。

通信作者: 李霖, E-mail: lilin_door@hotmail.com

0 引言

随着无线通信技术和集成电子技术发展,以人体为中心的无线通信网络,即无线体域网(Wireless body area network, WBAN)得到了广泛关注^[1-2]。各种附着于可穿戴物的智能化穿戴设备在 WBAN 中得到了应用,如智能鞋帽、智能手套等^[3-5]。相对于智能鞋帽等智能穿戴物,智能手套轻便易用,已在可穿戴应用领域引起广泛研究。这种新型手套可穿戴设备最初用于构建支付系统,实现触碰支付。随着技术的发展,智能手套的应用范围持续扩大,已经应用于手势识别、人机交互等 WBAN 系统中^[6-7]。在各种 WBAN 系统中,智能手套特别适用于基于射频识别(Radio frequency identification, RFID)技术构建的 WBAN 系统。这种新型 WBAN 具有传感节点电路简单、刚性元件少和功耗低等优异特性,已成为近年来最受关注的 WBAN 系统。因此,基于 RFID 技术研发的智能手套在新型可穿戴领域具有现实意义。

在基于 RFID 技术构建的 WBAN 系统中,智能手套既可用于集成射频标签,实现用户定位、环境信息检测等功能^[8-9],也可用于集成射频阅读器,读取标签节点的传感数据^[10]。天线作为智能手套系统的关键部分,其小型化程度决定了整个智能手套系统的便携性。近年来,众多学者对应用于智能手套的穿戴天线做了各方面的研究,并已取得初步成果。Ahmed 等^[11]分别采用开槽贴片和开口环方案设计了两种工作于 866 MHz 阅读器天线,这两种天线的辐射增益分别为 -2.2 dB 和 -4.0 dB,在 UHF RFID 频段内具备良好匹配特性;改变天线与手套之间距离后,天线稳定的反射系数分别为 -20.0 dB 和 -12.0 dB,表明其鲁棒性较好。Singh 等^[12]设计了一种用于智能手套的八木型天线,该天线具备良好的定向性,适合数据定向读取,且其面积较小,适合集成于手套表面。手掌进行不同程度弯曲后,如果天线的反射系数稳定,那么表明天线的鲁棒性较好。然而,尽管智能手套天线在小型化、辐射特性和鲁棒性等方面均取得一定进展,但其单一模式的通信方式只能保证手套上的阅读器读取标签数据,要实现 WBAN 多传感节点的数据融合,那么阅读器需具备无线联网功能,以实现数据传送、数据分享和数据处理。为实现集成于智能手套上的射频标签阅读器的联网需求,Singh 等^[13]提出了一种结构紧凑的可穿戴双频准八木 RFID 阅读器天线,矩形折叠

偶极子和菱形折叠偶极子构成的双频元件分别对应 UHF RFID 和 WLAN 频段,实现 UHF RFID 频段定向辐射和 WLAN 频段全向辐射。这种双频天线的优势在于缩减了辐射元件的数量,减少了设备内部天线占用体积,保障了整个智能手套系统的便携性和穿戴舒适性。但这种天线结构较为复杂,对制作工艺要求较高,无法广泛应用。

本文针对智能手套 UHF RFID 阅读器天线联网传输数据需求,为了解决前人天线设计不足之处,设计了一种适用于 UHF RFID 和 WLAN 的双频(900 MHz 谐振 UHF RFID 频段和 2.40 GHz 谐振)紧凑型天线。该天线利用非对称共面馈电结构实现小型化特性,采用折叠结构为天线双频谐振提供解决方案。为了验证天线各项性能,本文制作了天线实物,并对天线的辐射能力、鲁棒性和电磁辐射危害进行了测试;通过仿真多层人体模型和模拟人体穿戴环境对该天线的回波损耗、辐射方向图和人体比吸收率(Specific absorption rate, SAR)参数进行分析。该双频段天线为 UHF RFID 智能手套阅读器联网传输数据提供新的解决方案,在智能手套领域具有一定的应用前景。

1 天线结构设计

相较于常规天线设计,应用于智能手套的穿戴天线需要特别考虑以下要求:a)由于天线安装于介电常数较高的人体附近,需考虑人体加载效应对天线性能的影响。b)天线应采用共面波导馈电,实现天线单面化,以方便天线和芯片的连接。c)天线要尽可能小型化,以方便天线在手套表面的安装。

分析人体加载对天线性能的影响,可建立人体模型,并在人体模型上对天线进行仿真。人体模型分为三种:一是由一定厚度的单层介质构成的单层人体模型^[14];二是由多层介质构成的多层人体模型,包括皮肤、脂肪和肌肉^[15];三是三维精确人体模型^[16]。考虑到单层模型过于粗糙,而三维精确人体模型计算效率太低,本文采用多层人体模型模拟天线邻近人体环境,该人体模型示意图如图 1 所示,各层介质的相对介电常数、体导率与厚度参数^[17-18]见表 1。考虑到天线的双频工作特性,表 1 同时给出了不同厚度介质层在 900 MHz 和 2.40 GHz 处的介质参数。

考虑到共面化和小型化的需求,本文在设计中采用了共面波导馈电的单极子天线,单极子的长度 l 可用式(1)计算^[19]:

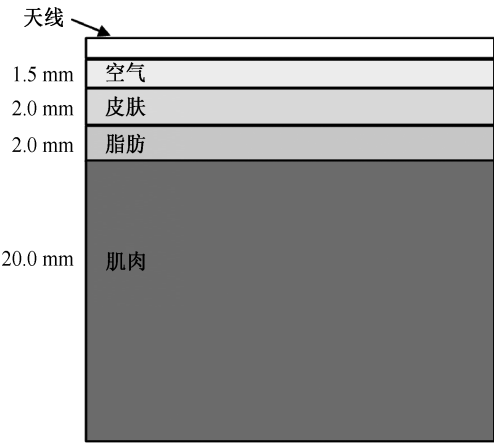


图 1 多层人体模型示意

表 1 人体组织层的厚度和不同频率的相对介电常数和电导率

人体组织	组织厚度/mm	900 MHz 相对介电常数	900 MHz 体电导率/(S·m ⁻¹)	2.40 GHz 相对介电常数	2.40 GHz 体电导率/(S·m ⁻¹)
皮肤	2.0	41.32	0.85	38.10	1.40
脂肪	2.0	5.46	0.05	5.20	0.10
肌肉	20.0	54.97	0.93	52.80	1.70

成,折叠前后天线结构版图如图 2 所示。介质基板材料为 FR4,介电常数 ϵ_r 为 4.40,损耗正切角为

$$l = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_r}} \tag{1}$$

其中: ϵ_r 表示计入人体加载效应后天线介质基板的等效介电常数; c 为电磁波在真空中传播速度,m/s; f 为谐振频率,GHz; l 为工作谐振频率对应波长,mm。

取单极子天线的谐振频率为 900 MHz,利用式(1)求得天线的总长约为 80.0 mm。通常而言,成人的手掌面积约为 6400~8100 mm²(不包含手指部分)。显然,80.0 mm 长度的单极子天线尺寸过长,难以安装在手套上。为满足智能手套上的应用需求,本文对天线做折叠处理,同时优化天线尺寸。所设计的天线主要由辐射面、介质基板和接地面组

$\tan\delta$ 为 0.02,厚度为 h 为 1.0 mm。折叠前后天线参数值见表 2 与表 3。

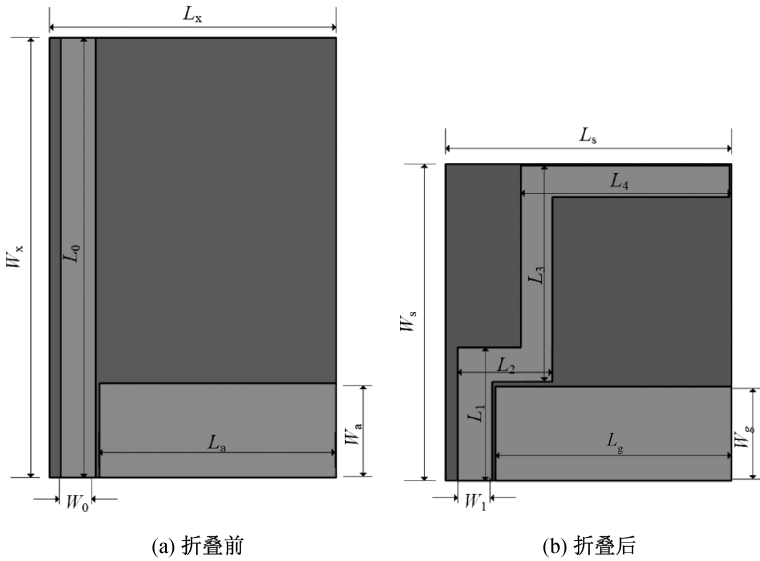


图 2 折叠前后天线结构版图

表 2 折叠前天线结构参数

参数	数值/mm	参数	数值/mm
基板长度 L_x	70.0	基板宽度 W_x	45.3
地面长度 L_a	37.4	地面宽度 W_a	15.0
贴片枝节长度 L_0	70.0	贴片宽度 W_0	5.5

与常规的对称共面波导馈电单极子天线不同,本文采用非对称共面波导馈电方式来设计天线。这种馈电结构仅具有单侧横向接地面,可省去另一侧的接地面,大幅减小天线馈电结构的尺寸。

表 3 折叠后天线结构参数

参数	数值/mm	参数	数值/mm
基板长度 L_s	50.5	基板宽度 W_s	45.3
地面长度 L_g	37.4	地面宽度 W_g	15.0
贴片宽度 W_1	5.5	贴片第一枝节长度 L_1	21.5
贴片第二枝节长度 L_2	15.0	贴片第三枝节长度 L_3	51.5
贴片第四枝节长度 L_4	33.0		

此外,天线的辐射部分采用折叠结构,折叠后天线结构如图 2(b)所示。折叠结构除了减小天线尺

寸外,也会对天线的回波损耗特性产生影响。为验证弯折结构对天线性能影响,本文利用 Ansys HFSS 软件对图 2 中折叠前后天线进行仿真。两种结构天线均采用多层人体模型。两者折叠前后的仿真回波损耗与频率关系曲线如图 3 所示,从图 3 中可以观察到,折叠后天线的第二频带从 2.20 GHz 移到 2.40 GHz。第二频带的偏移主要原因在于天线中部折叠靠近地面后产生了寄生电容,使得天线第二频带比第一频带扩大,因此天线可以在 900 MHz 和 2.40 GHz 工作,同时满足 UHF RFID 和 WLAN 工作要求。从图 2(b)可知,天线整体面积约为 2288 mm²,满足成人手套安装需求。

2 天线性能验证

为验证天线的各项性能,本文根据设计方案制作了天线,并进行测试;分析仿真实测结果。利用 AV3656A 型号矢量网络分析仪测得该天线回波损耗参数,其归一化方向图数据借助 Ansys HFSS 软件仿真。

2.1 回波损耗测试

实物测试时,采用 3M 纳米双面胶将天线固定于手套表面,由测试者穿戴手套进行测试;对比仿真与实测结果。手套照片如图 4(a)所示,天线仿真与实测回波损耗数据如图 4(b)所示。实测和仿真结果表明,该天线具有 900 MHz、2.40 GHz 双工作频段。受仪器测试频带影响,实测数据在 0~3.00 GHz 范围内。仿真结果显示,900 MHz 处工作带宽为 260 MHz(0.84~1.10 GHz),2.40 GHz 工作带宽为 1230 MHz(1.77~3.00 GHz)。实测结果显示,该天线同样谐振在 900 MHz、2.40 GHz 频点处,900 MHz 处工作带宽为 340 MHz(0.69~1.03 GHz),

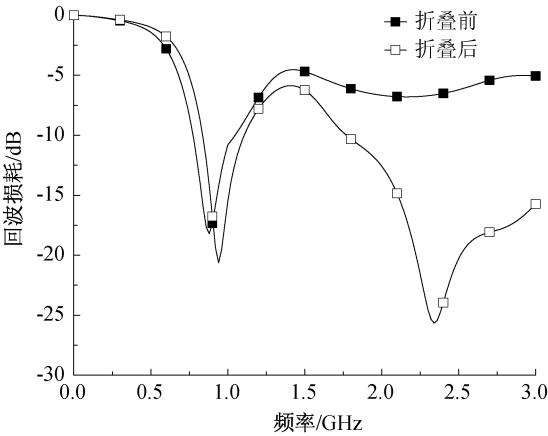
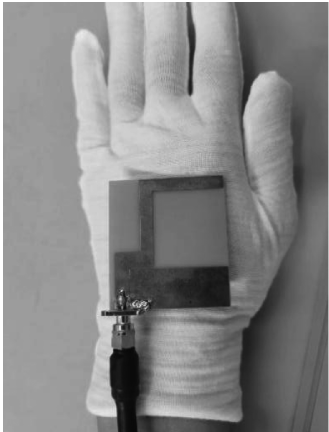


图 3 折叠前后天线仿真回波损耗与频率关系曲线

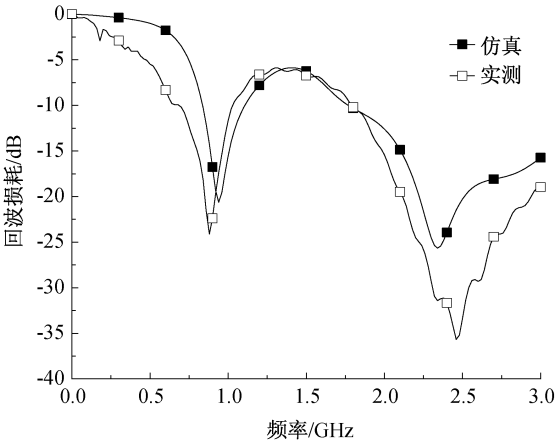
2.40 GHz 处工作带宽为 1210 MHz(1.79~3.00 GHz)。上述结果表明,该天线能够同时满足 UHF 与 WLAN 频段要求,较宽的频带能够克服人体邻近所产生频点偏移现象。实测结果与仿真结果具有一定程度偏差,主要原因在于天线制作中的加工公差以及测试环境中存在干扰信号。

2.2 方向图仿真分析

为分析 900 MHz 与 2.40 GHz 时方向图辐射模式,天线根据图 1 的人体模型进行仿真,得到的归一化辐射方向图如图 5 所示。仿真时,天线与人体间距为 1.5 mm,工作频率分别设为 900 MHz 和 2.40 GHz。900 MHz 时,XOZ 平面内天线具有圆形辐射方向图,YOZ 平面内天线方向图发生略微偏移,但仍能沿 Z 轴正半轴传播,最大增益为-10.4 dB。2.40 GHz 时,XOZ 与 YOZ 平面方向图近似上半球面,最大辐射增益为-3.9 dB。在 900 MHz 与 2.40 GHz 处,两者前后增益比分别为 4.9 dB 和 15.7 dB。仿真结果表明,天线能够克服人体加载效应,具有稳定的增益与定向辐射效果。



(a) 智能手套照片



(b) 仿真与实测回波损耗与频率关系曲线

图 4 智能手套照片和天线回波损耗与频率关系曲线

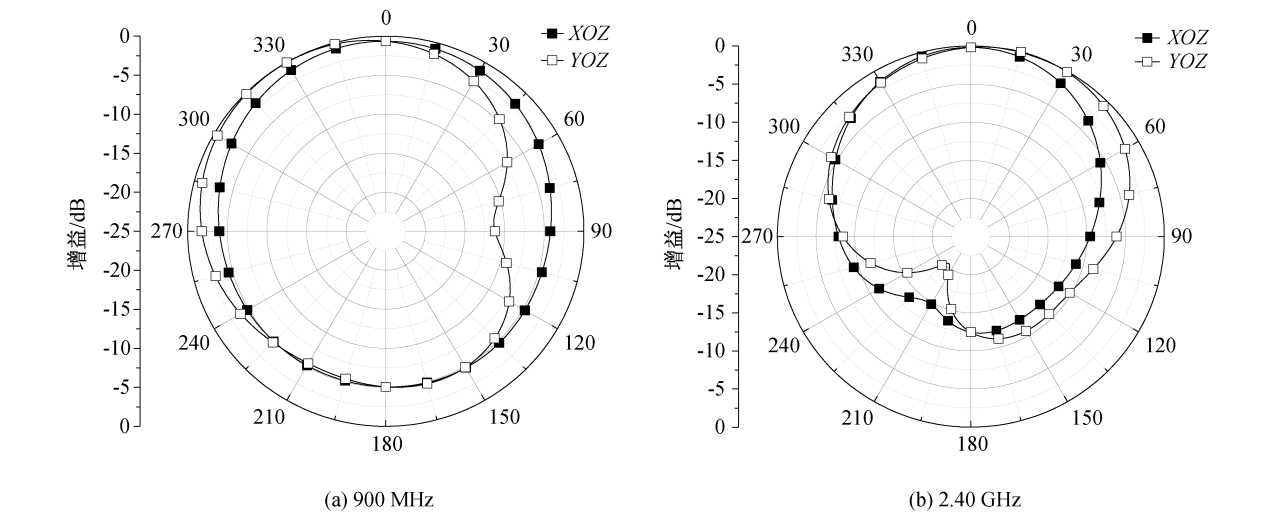


图 5 不同频率归一化辐射方向图

2.3 天线鲁棒性分析

本文设计的天线需用于智能手套穿戴应用中,作为穿戴式设备,天线在实际应用中会受到人体因素影响。因此,是否具有较好的鲁棒性是决定天线抵抗人体干扰的关键因素。为进一步验证天线鲁棒性,本文针对手套材质、穿戴者体型两者情况,通过改变智能手套材质、穿戴者体型,对待测天线回波损耗的影响进行研究。

2.3.1 不同材质手套对天线回波损耗的影响

为研究不同材质手套对天线性能影响,分别取牛津布、纯棉两种布料制成的手套穿戴在测试者手上,且天线粘贴固定于手套表面。将天线连接到矢量网络分析仪端口进行测试,测试结果如图 6 所示,提取图 6 中最低谐振点值及低于 -10 dB 数据,整合手套材质参数及测试结果见表 4。结果表明受手套布料影响,天线与不同材质手套集成时谐振点会产生一定程度偏移,信号传输能力也会变化。但是频带仍能覆盖 UHF RFID 与 WLAN 频段,回波损耗低于 -10.0 dB。

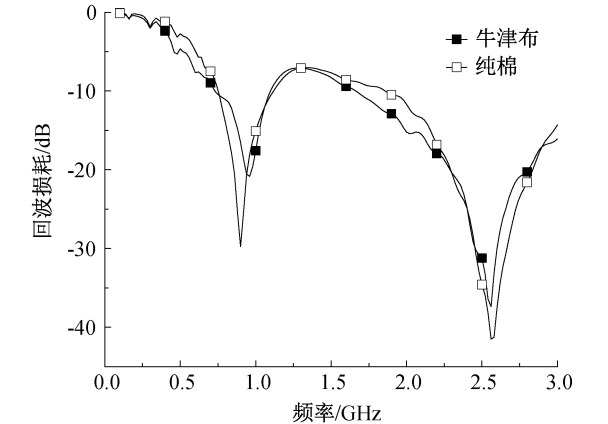


图 6 不同材质手套对应的天线回波损耗与频率关系曲线

表 4 不同材质手套测得的频点、频段及带宽数据				
手套材质	手套厚度/mm	谐振频点/GHz	工作频段/GHz	带宽/MHz
牛津布	0.8	0.86	0.64~1.00	360
		2.46	1.70~3.00	1300
纯棉	0.4	0.80	0.66~1.00	430
		2.46	1.78~3.00	1220

2.3.2 不同体型穿戴者对天线回波损耗的影响

智能手套作为一款面向大众的产品,受众群体广泛,需具备较强的适用性。考虑到穿戴者身体结构之间差异,需研究不同穿戴者对天线性能影响。本文采用控制变量方法进行测试,受试者均为同等身高不同体重标准体型男性。3 种体型受试者测量结果如图 7 所示,提取图 7 中最低谐振点值和低于 -10 dB 值,整合测试者健康状况及测试结果后见表 5。从图 7 可以看出,所设计天线针对不同体型穿戴者时,谐振点与工作频段均会发生一定程度偏移,但是天线工作频段依然能覆盖所需 UHF RFID 与 WLAN 频段。

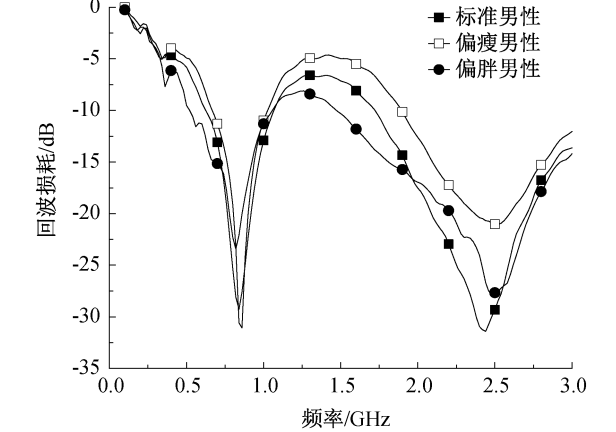


图 7 3 种体型受试者对应的天线回波损耗与频率关系曲线

2.4 人体辐射吸收率

可穿戴设备产生电磁辐射对人体具有一定危害,因此需要考虑天线的人体安全性,常用 SAR 评估人体对电磁波吸收程度来衡量天线安全性。目前,SAR 根据两个标准值进行评估:a)美国标准限制 1 g 人体组织中 SAR 限制为 1.60 W/kg;b)欧盟标准限制 10 g 人体组织中 SAR 限制为 2.00 W/kg。为降低可穿戴设备对人体危害,应将 SAR 控制合理范围内。对本文设计的天线进行

SAR 评估,鉴于实测所用的网络矢量分析仪输出功率为 10 mW,在 HFSS 软件中设定 10 mW 天线输入功率,将天线置于多层人体组织上进行 SAR 仿真,得到不同频率 SAR 结果图如图 8 所示。仿真得到 900 MHz 处的 SAR 值在 1 g 人体组织下为 0.04 W/kg, 2.40 GHz 处的 SAR 值在 0.17 W/kg,两者的 SAR 值均明显低于国际标准,表明该设备工作时天线所产生的电磁辐射不会对人体造成危害。

表 5 测试者健康状况及测试结果

测试者体重/kg	测试者身高/cm	谐振频点/GHz	回波损耗/dB	工作频段/GHz	带宽/MHz
65	175	0.86	−27.5	0.64~1.04	400
		2.44	−32.0	1.74~3.00	1260
53	175	0.86	−33.0	0.66~1.02	360
		2.52	−20.0	1.90~3.00	1100
76	175	0.82	−22.5	0.52~1.04	520
		2.5	−26.0	1.50~3.00	1500

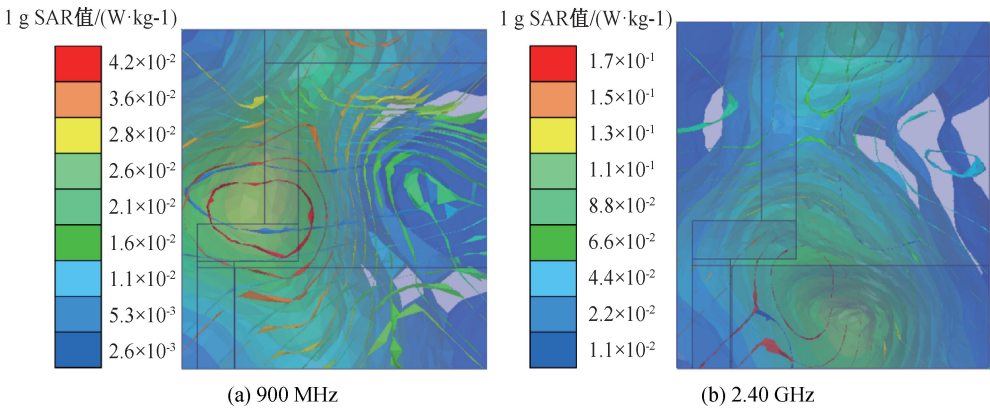


图 8 不同频率 SAR 仿真结果

3 结 论

本文设计了一种应用于智能手套阅读器的双频天线,谐振在 900 MHz、2.40 GHz 处,支持 UHF RFID 与 WLAN 双频工作。该天线采用非对称共面馈电结构缩小地面面积,其简化的单层馈电结构减小了天线剖面尺寸;对比折叠前后天线回波损耗结果,发现折叠后的天线能够实现双频覆盖,同时能够缩减天线尺寸。为验证所提天线辐射能力、鲁棒性和电磁辐射危害,对其辐射方向图、回波损耗和 SAR 参数进行测试。测试结果表明:该天线谐振在 900 MHz 和 2.40 GHz 处,工作带宽分别为 0.69~1.03 GHz 和 1.79~3.00 GHz,对应最大增益分别为−10.4 dB 和−3.9 dB。该天线面对牛津布、纯棉两种材质手套时,天线在 900 MHz 处分别具有 360、430 MHz 带宽,在 2.4 GHz 处分别具有 1300、

1220 MHz 带宽;面对标准、偏瘦和偏胖体型穿戴者时,天线在 900 MHz 处分别具有 400、360、520 MHz 带宽,在 2.4 GHz 处分别具有 1260、1100、1500 MHz 带宽,均具有较高的鲁棒性,适用于复杂工作环境。该设计方案针对传统智能手套 UHF RFID 阅读器采集传输数据问题,为具备联网功能的阅读器设计提供可行的天线方案。本文智能手套天线中采用 FR4 基板不具备穿戴舒适性,后续改进中,将针对柔性基材舒适性和天线鲁棒性展开研究,进一步完善天线。

参考文献:

[1] 张靓韞,杨曙辉,逯贵祯,等. 应用于体域网的可穿戴天线研究进展[J]. 中国传媒大学学报(自然科学版), 2021, 28(4): 72-81.

[2] 孙英,刘乃源,余臻伟,等. 基于 NFC 的可穿戴传感器

- 中柔性/可拉伸天线的研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 122-137.
- [3] 丁大业, 范婷, 宫卓宏. 一种应用在可穿戴电子设备的 5G 柔性天线的设计[J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(10): 221-223.
- [4] 陈沁文, 张斌珍, 段俊萍, 等. 一种超宽带柔性梯形环分形天线的设计[J]. 微纳电子技术, 2022, 59(4): 335-340.
- [5] 金杰, 何政蕊, 刘凯燕, 等. 基于 Sierpinski 六角分形的小型化可穿戴天线[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2022, 55(3): 10-14.
- [6] Pan J M, Luo Y X, Li Y D, et al. A wireless multi-channel capacitive sensor system for efficient glove-based gesture recognition with AI at the edge [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(9): 1624-1628.
- [7] Wu Y C, Karakurt I, Beker L, et al. Piezoresistive stretchable strain sensors with human machine interface demonstrations[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279: 46-52.
- [8] Le D, Ahmed S, Ukkonen L, et al. A small all-corners-truncated circularly polarized microstrip patch antenna on textile substrate for wearable passive UHF RFID tags [J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2021, 5(2): 106-112.
- [9] Le D, Ukkonen L, Björninen T. A dual-ID RFID tag for headgear based on quasi-yagi and dipole antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(8): 1321-1325.
- [10] Ahmed S, Le D, Sydänheimo L, et al. Wearable metasurface-enabled quasi-yagi antenna for UHF RFID reader with end-fire radiation along the forearm[J]. IEEE Access, 2021, 9: 77229-77238.
- [11] Ahmed S, Qureshi S T, Sydänheimo L, et al. Comparison of wearable E-textile split ring resonator and slotted patch RFID reader antennas embedded in work gloves [J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2019, 3(4): 259-264.
- [12] Singh R K, Michel A, Nepa P, et al. Compact and wearable yagi-like textile antennas for near-field UHF-RFID readers[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(3): 1324-1333.
- [13] Singh R K, Michel A, Nepa P, et al. Wearable dual-band quasi-yagi antenna for UHF-RFID and 2.4 GHz applications [J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2020, 4(4): 420-427.
- [14] Cara D D, Trajkovikj J, Torres-Sánchez R, et al. A low profile UWB antenna for wearable applications: the tripod kettle antenna (TKA) [C]. 2013 7th European Conference on Antennas & Propagation (EuCAP). Gothenburg, Sweden; IEEE: 2013; 3257-3260.
- [15] 刘阔, 郑宏兴, 刘瑞鹏, 等. 基于 PDMS 嵌入式超宽带天线设计[J/OL]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022: 1-5. [2022-08-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1746.TN.20210210.1801.004.html>.
- [16] Agarwal K, Guo Y X and Salam B. Wearable AMC backed near-endfire antenna for on-body communications on latex substrate[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2016, 6(3): 346-358.
- [17] Casula G A, Michel A, Nepa P, et al. Robustness of wearable UHF-band PIFAs to human-body proximity [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(5): 2050-2055.
- [18] Liu Z F, Wang M, Dong J. A dual-band antenna using liquid metal for wearable bracelets communications [C]// 2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSRSWTC). Fuzhou, China; IEEE: 2020: 1-3.
- [19] 丁大业, 范婷. 一种柔性超宽带单极子天线的设计[J]. 长江信息通信, 2021, 34(10): 23-26.

(责任编辑:康 锋)