



用于无线体域网的高鲁棒性可穿戴天线设计

杨帅超,李 霖,顾小卫

(浙江理工大学信息学院,杭州 310018)

摘 要: 为了在无线体域网中实现可穿戴设备与基站间的体外通信,设计了一种工作在 WLAN(2.40~2.48 GHz)频段的高鲁棒性可穿戴天线。采用微带贴片结构,实现了天线体外模式辐射;采用完整铜箔作为天线的地面,提高了天线的鲁棒性;采用耦合馈电与槽缝曲流技术,增加了天线的阻抗带宽。进一步制作了天线实物,测试并比较了天线在自由空间内、加载人体后和改变外部环境后不同阶段的反射系数与辐射增益结果,以及加载人体后的链路余量与人体比吸收率的情况。结果表明:在自由空间内和加载人体后,天线阻抗带宽均可以覆盖 WLAN 频段,且天线具有体外模式的辐射方向图。在外部环境变化时,天线均谐振在了 WLAN 频段内,最大辐射增益变化仅有 3.04%,证明了天线具有较高的鲁棒性。在不伤害人体的情况下实现了无线体域网中可穿戴设备与基站间的高鲁棒性体外通信。

关键词: 可穿戴天线;体外模式;耦合馈电;无线体域网;鲁棒性

中图分类号: TN820

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2023)01-0089-08

引文格式: 杨帅超,李霖,顾小卫. 用于无线体域网的高鲁棒性可穿戴天线设计[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2023,49(1):89-96.

Reference Format: YANG Shuaichao, LI Lin, GU Xiaowei. Design of a wearable antenna with high robustness for wireless body area network applications[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University,2023,49(1):89-96.

Design of a wearable antenna with high robustness for wireless body area network applications

YANG Shuaichao, LI Lin, GU Xiaowei

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

Abstract: In order to realize off-body communication between wearable devices and base stations in wireless body area networks, a wearable antenna with high robustness in WLAN frequency band is proposed. The microstrip patch structure is adopted to realize off-body mode radiation of the antenna; a complete copper foil is used as the ground of the antenna to improve the robustness of the antenna; the coupled feeding and slotting & meandering technology is adopted to increase the impedance bandwidth of the antenna. In order to verify the robustness of antenna communication, the antenna is further fabricated. The reflection coefficient and radiation gain of the antenna in free space, after loading the human body and after changing the external environment, as well as the link margin and the specific absorption rate of the human body after loading the human body are tested. The results show that both in free space and after loading the human body, the impedance bandwidth of the antenna can cover the WLAN frequency band, and the antenna has an off-body mode radiation pattern. With the change of the external environment, the antenna resonance frequencies all fall into the WLAN frequency band and the maximum radiation gain change is merely 3.04%, demonstrating that the proposed antenna has high

收稿日期:2022-06-16 网络出版日期:2022-09-06

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:杨帅超(1998—),男,河南安阳人,硕士研究生,主要从事射频电路与天线技术方面研究。

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

robustness. And the high robust off-body communication between the wearable device and the base station in the wireless body area networks is realized without harming the human body.

Key words: wearable antenna; off-body; coupled feeding; wireless body area networks; robustness

0 引言

无线体域网是指由穿戴在人体表面或植入人体的传感器和便携式设备系统构建的以人体为中心的无线通信网络^[1-2]。随着无线通信技术的发展,无线体域网日益受到人们的关注,已成为当前国内外学者研究的重点之一,在医疗、军事、辅助通信等领域得到广泛应用^[3-4]。

作为无线体域网的关键组成部分之一,可穿戴天线在无线体域网系统的节点通信中发挥着接收和发送无线信号的功能。与常规天线不同,应用于无线体域网的可穿戴天线,因应用环境特殊,极易受到人体邻近效应的影响,容易因为外部环境变化而导致天线阻抗失配与定向辐射增益下降。天线的鲁棒性是指天线在外部环境变化时天线各项性能的不敏感性,如何进一步提高天线的鲁棒性,减少不同人体、佩戴位置等外部环境变化对天线通信性能的影响,解决阻抗失谐与定向辐射增益下降问题,已成为可穿戴天线研究的热点问题之一^[5-6]。

为提高可穿戴天线的鲁棒性,降低环境变化对天线通信性能的影响,研究者们已开展了多方面的研究,并尝试了天线结构、电可重构、机械可重构、缺陷地等多项技术。传统的微带贴片天线具有低剖面 and 体外定向辐射的特点,很适合应用于无线体域网^[7-8]。但微带贴片天线阻抗带宽较窄,在人体上极易发生天线失谐,导致天线无法正常工作。而微带单极子^[9]、平面倒F天线^[10]以及共面波导天线^[11]等虽然具有较大的阻抗带宽,能够更有效地抑制天线失谐,但其辐射方向极易受到人体邻近效应的影响,产生较多辐射旁瓣,减弱了辐射的方向性。电可重构技术通过重构天线频率和辐射方向,可减弱外部环境变化对天线阻抗与辐射增益的影响,但引入的有源元件和偏置电路既会占用额外的电路面积,也会大幅增加设计的复杂性^[12-13]。缺陷地技术可通过减少品质因素的方式提高天线的阻抗带宽,但对完整地面开槽,辐射增益会产生较多的旁瓣,降低体外辐射的方向性^[14]。机械式可重构技术可通过改变天线物理结构的方式来提高天线对外部环境的鲁棒性,但是难以同时激励起不同物理结构对应的辐射模式^[15]。

结合以上研究,本文采用了改进的微带贴片结构来设计高鲁棒性可穿戴天线。为解决微带贴片结构的阻抗带宽较窄问题,本文通过耦合馈电和槽缝曲流的方式拓宽了天线阻抗带宽;为解决天线在人体上极易发生失谐的问题,本文通过采用完整铜箔作为天线的地面提高了天线与人体的隔离度。该天线结构由两块纵向堆叠的基板构成,在顶层基板上放置了微带贴片结构、在底层基板上放置了带状微带线和底层的地面。制作了天线实物,测试并比较了天线在自由空间内、加载人体后和改变外部环境后不同阶段的反射系数与辐射增益结果,以及加载人体后的链路余量与人体比吸收率的情况。

1 天线设计方案

本文采用改进的微带贴片结构作为可穿戴天线体外通信的设计方案。微带贴片结构可激励起 $\lambda/2$ 波长的 TM_{01} 辐射模式, TM_{01} 辐射模式具有指向贴片方向的定向辐射能力,适用于可穿戴设备体外通信。通过对微带贴片与馈电结构的改进,解决了微带贴片结构的阻抗带宽较窄与极易失谐的问题。具体设计如下:

首先,设计天线的总体结构。天线由两块纵向堆叠的基板构成,总体结构如图1(a)所示。两块基板均采用相对介电常数 $\epsilon_r=4.4$ 和损耗正切 $\tan\delta=0.02$ 的FR4材料,并通过4个绝缘尼龙螺丝固定基板。为避免螺丝对顶层的微带贴片造成影响,用于绝缘尼龙螺丝嵌入的过孔放置在基板的4个顶角处。过孔的半径为2.0 mm,圆心距离边缘3.5 mm。由于过孔位置离贴片较远,绝缘尼龙螺丝几乎不会对天线的电流路径产生影响。

其次是设计天线的各层结构。基板顶层是一个矩形微带贴片,确定工作频率后,贴片尺寸可通过式(1)~(3)计算:

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_e}} - 2\Delta L \quad (1)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h_t}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\Delta L = 0.412h_t \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{w}{h_t} + 0.64 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{w}{h_t} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

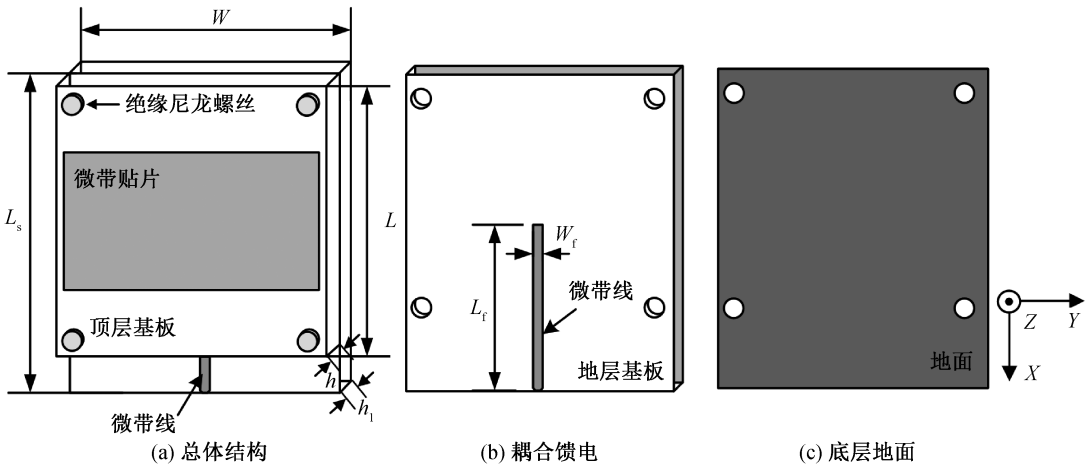


图 1 天线结构示意图

其中: L 为微带贴片长度, m ; f 为工作频率, GHz ; ΔL 为等效辐射缝隙长度, m ; ϵ_e 是有效介电常数; ϵ_r 是基板相对介电常数; w 为微带贴片宽度, m ; h_t 为基板总高度, m 。

微带贴片天线的激励有底馈、侧馈和耦合馈电三种方式。天线采用底馈方式激励会减弱可穿戴天线的集成度。天线采用侧馈方式激励的阻带带宽较窄,无法覆盖整个 WLAN 频段。因此,天线采用了耦合馈电激励拓宽了阻抗带宽,如图 1(b)所示。耦合馈电微带线和微带贴片的间隙电容,可抵消馈线引入的电感,提高天线的阻抗带宽。天线耦合馈电结构放置在天线结构的中间层。为方便天线与外部电路的连接,微带线和底层基板向 X 正方向延伸了 10.0 mm 。天线的底层由完整的铜箔构成地面,底层地面如图 1(c)所示。天线采用耦合馈电激励的阻抗带宽相比侧馈有较大提高。但该天线仍具有较高的品质因数,阻抗带宽仅有 0.04 GHz ,无法覆盖 WLAN 频段。

因此,在微带贴片上加载了槽缝结构,进一步拓宽天线阻抗带宽,加载槽缝的微带贴片天线结构如图 2 所示。天线在微带贴片边缘开槽,可在原 TM_{01} 模式谐振点右侧激发了一个新的谐振点,微带贴片天线在两个谐振点的表面电流分布如图 3 所示。产生新的谐振点后,微带贴片天线的阻抗带宽为 0.11 GHz ,可覆盖 WLAN 频段。最终天线优化后的主要结构参数见表 1。

2 天线性能测试

为验证天线的各项性能,本文将设计的天线制作成实物,天线正面与背面实物照片如图 4 所示。制作的天线通过 SMA 接头连接至馈电端,通过矢

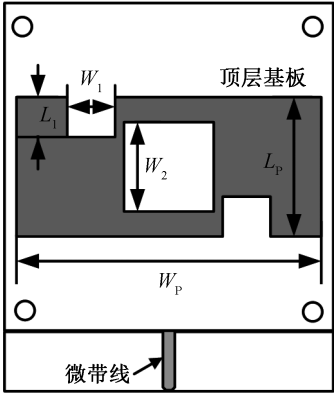


图 2 加载槽缝的微带贴片天线结构示意图

表 1 天线优化后的主要结构参数

参数	数值/mm	参数	数值/mm
基板宽度 W	55.0	微带贴片宽度 W_p	52.0
顶层基板长度 L	55.0	微带线宽度 W_f	2.0
顶层基板厚度 h	0.8	微带线长度 L_f	34.0
底层基板厚度 h_1	0.8	槽缝宽度 W_2	14.5
曲流缝隙长度 L_1	7.0	微带贴片长度 L_p	24.0
曲流缝隙宽度 W_1	6.0	底层基板长度 L_s	65.0

量分析仪 AV3656A 测试天线反射系数 $|S_{11}|$ 。通过 HFSS 15.0 仿真软件对天线进行有限元法的数值求解,计算得到天线反射系数与辐射增益仿真数据。天线在自由空间内的反射系数与辐射增益、在加载人体后的反射系数、在改变外部环境情况下的反射系数与辐射增益、在加载人体后的链路余量以及人体比吸收率 (Specific absorption ratio, SAR) 的测试结果表明,该天线在不伤害人体的情况下具有高鲁棒性的体外通信能力。

2.1 天线在自由空间内的反射系数与辐射增益

测试了天线在自由空间内的反射系数与辐射增益。如图 5(a)所示,天线在自由空间内谐振在 2.43 GHz ,反射系数最低为 -28.15 dB ,天线阻抗

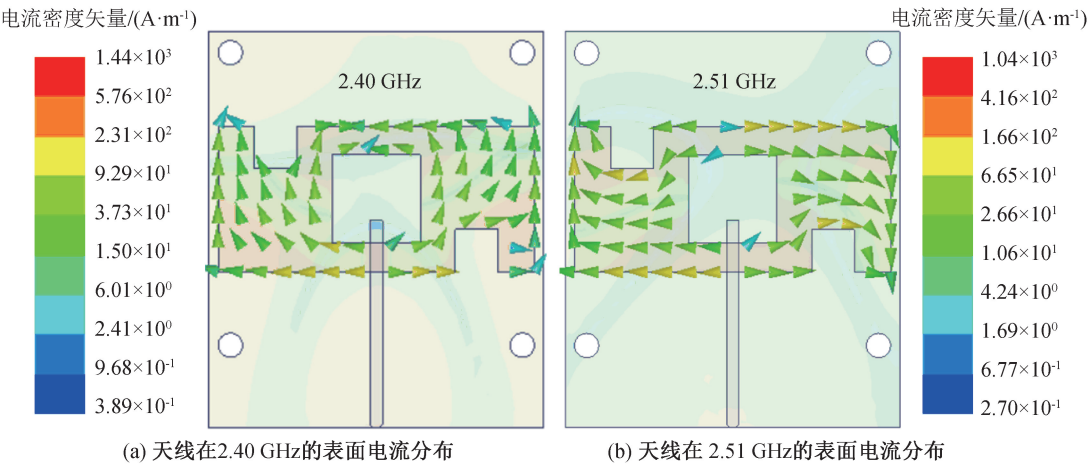


图 3 加载槽缝的微带贴片天线在 2.40 GHz 与 2.51 GHz 的表面电流分布图

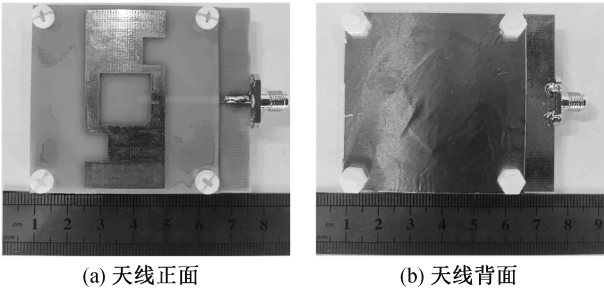


图 4 天线实物图

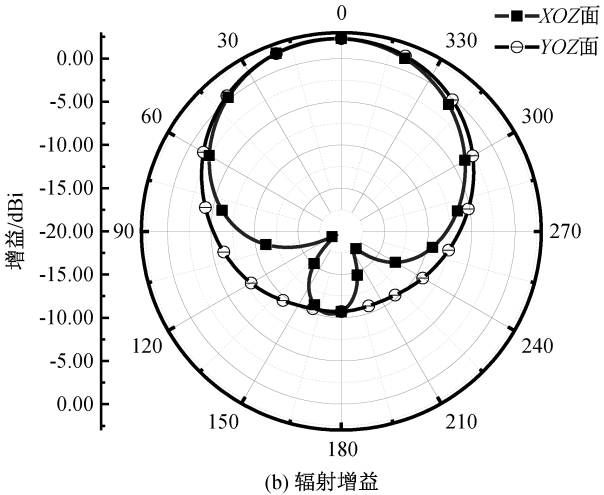
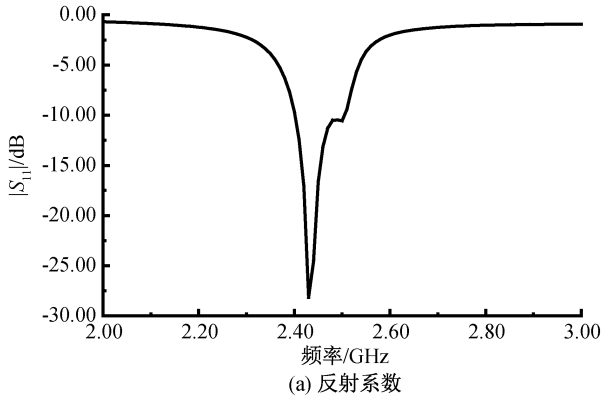


图 5 自由空间内天线的反射系数与辐射增益曲线

带宽为 2.40~2.51 GHz,可覆盖 WLAN 频段工作阻抗带宽。如图 5(b)所示,天线最大辐射增益为 2.33 dBi,在 XOZ 面 146°~238°角有 1 个旁瓣,旁瓣增益小于-10.00 dBi。天线在自由空间内主辐射方向垂直于人体向外,符合体外模式需求。

2.2 天线在加载人体后的反射系数

可穿戴天线工作邻近人体组织,必须考虑人体加载效应。为保证在仿真软件中模拟的准确性,需在仿真中加入人体组织仿真模型模拟实际情况。根据文献[16]提出的人体组织仿真模型,本文在仿真软件中设置了正常人体手臂的电磁仿真模型,该模型由 1 个高度为 1.0 mm 空气层、1 个高度为 1.0 mm 皮肤层、1 个高度为 2.0 mm 脂肪层、1 个高度为 2.0 mm 肌肉层、1 个高度为 10.0 mm 骨骼层组成。人体组织仿真模型如图 6 所示。在 WLAN 频段人体皮肤、脂肪、肌肉和骨骼组织的相对介电常数与体电导率参数见表 2。

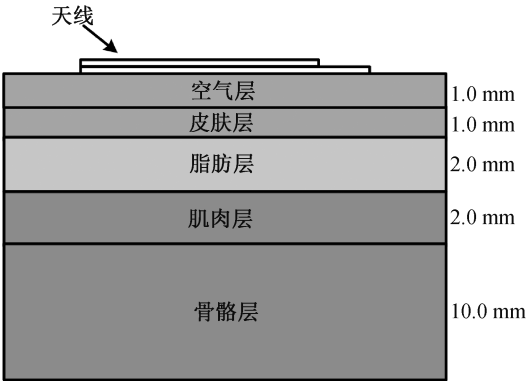


图 6 人体组织仿真模型示意图

使用透明胶带将天线绑定在人体手臂上,测试了天线在人体手臂上的反射系数。加载人体后的天线反射系数测试如图 7 所示。加载人体后可穿戴天线仿真和实测的反射系数 $|S_{11}|$ 结果如图 8 所示。

天线实测 $|S_{11}|$ 谐振在 2.43 GHz,最低反射系数为-16.21 dB,天线仿真 $|S_{11}|$ 谐振在 2.43 GHz,最低反射系数为-30.43 dB。天线实测的阻抗带宽为 2.40~2.52 GHz,阻抗带宽仿真结果为 2.40~2.51 GHz。天线仿真结果与测试结果均满足 WLAN 频段工作阻抗带宽需求。仿真与测试结果之间的偏差主要来源于制作误差和测试环境与仿真环境的差异。

表 2 人体各组织在 WLAN 频段的相对介电常数与体电导率

人体组织	相对介电常数 ϵ_r	体电导率/($S \cdot m^{-1}$)
皮肤	38.0	1.30
脂肪	11.0	0.08
肌肉	56.0	2.33
骨骼	17.4	0.60

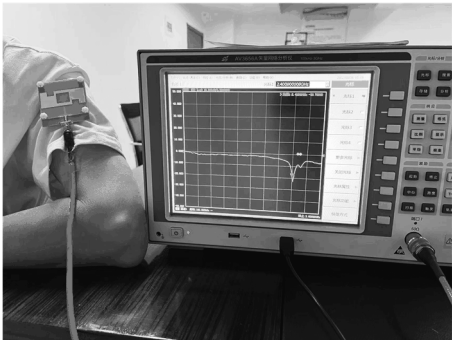


图 7 加载人体后的天线反射系数测试图

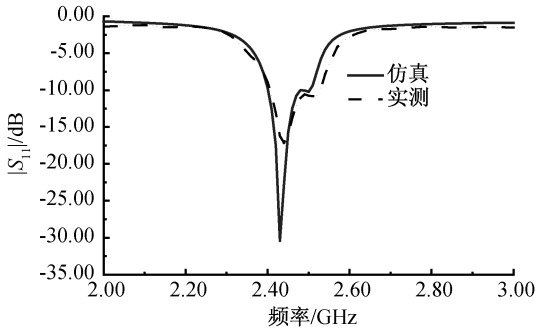


图 8 天线实测与仿真反射系数曲线

2.3 天线在改变外部环境情况下的反射系数与辐射增益

可穿戴天线集成在衣物上,其外部环境会随着人体姿态变化而发生改变,主要的变化为佩戴位置、人体体态和穿戴材质的改变。为验证天线对改变外部环境仍有较好的鲁棒性,测试了天线在不同佩戴位置、人体体态以及穿戴材质上的反射系数,并且测试了天线在改变仿真模型后的仿真反射系数与辐射增益。

首先在手臂、腹部和背部环境等多种不同佩戴位置对天线进行了 $|S_{11}|$ 的测试。天线在不同佩戴

位置上的实物测试如图 9 所示。这些位置的脂肪含量、肌肉分布和骨骼密度均有较大的差异。因此,通过调整人体组织仿真模型的脂肪层、肌肉层和骨骼层的高度,模拟了人体手臂、腹部和背部环境。人体手臂、腹部和背部环境对应的组织仿真模型高度见表 3。

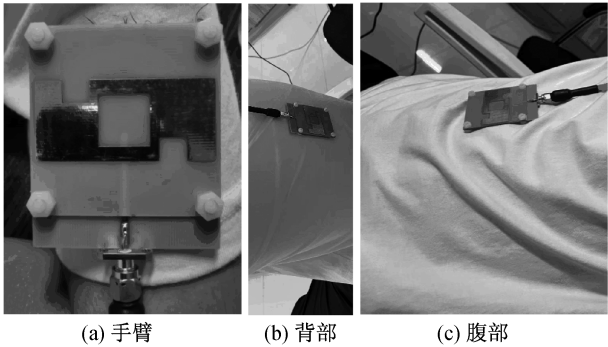


图 9 天线在不同佩戴位置上的实物测试图

表 3 人体手臂、腹部和背部环境对应的组织仿真模型高度

人体部位	高度/mm		
	脂肪层	肌肉层	骨骼层
手臂	2.0	2.0	10.0
腹部	10.0	2.0	2.0
背部	2.0	5.0	10.0

天线在不同佩戴位置上的测试与仿真反射系数曲线如图 10 所示。改变天线的人体组织仿真环境,对天线仿真反射系数影响较小,天线阻抗带宽均可覆盖 WLAN 频段。在人体手臂上测试时,天线谐振在 2.43 GHz,阻抗带宽为 2.40~2.51 GHz。在人体腹部上测试时,天线谐振在 2.44 GHz,阻抗带宽为 2.40~2.49 GHz。在人体背部上测试时,天线谐振在 2.47 GHz,阻抗带宽为 2.44~2.50 GHz。仿真与测试结果表明,改变天线的佩戴位置,天线均能谐振在 WLAN 频段内,表明天线具有一定的鲁棒性。

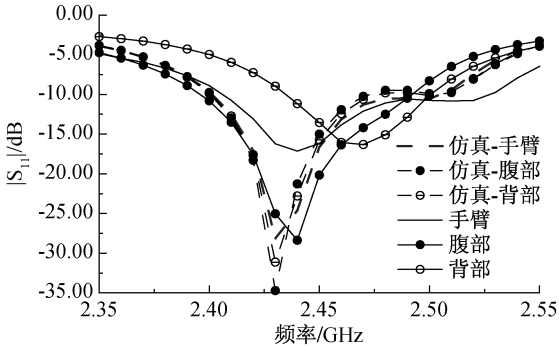


图 10 天线在不同佩戴位置上的反射系数曲线

天线放置在人体手臂、背部和腹部不同佩戴位置上的仿真辐射增益如图 11 所示。天线 XOZ 面

在腹部仿真环境的 10° 角获得最大增益为 1.30 dBi,在手臂仿真环境的 198° 角获得最小增益为 -29.46 dBi。天线在 XOZ 面整体垂直人体向外辐射,在 $140^{\circ}\sim 200^{\circ}$ 角有 1 个旁瓣,旁瓣整体增益小于 -15.00 dBi,对体外辐射模式影响较小。天线 YOZ 面在腹部仿真环境的 0° 角获得最大增益为 1.20 dBi,在背部仿真环境的 186° 角获得最小增益为 -19.94 dBi。天线在 YOZ 面整体垂直人体向外辐射,无旁瓣生成。天线在不同部位仿真环境的辐射特性大致相同,且主方向均指向体外,表明天线辐射增益能满足体外通信需求,且受佩戴位置变化的影响较小,具有一定的鲁棒性。

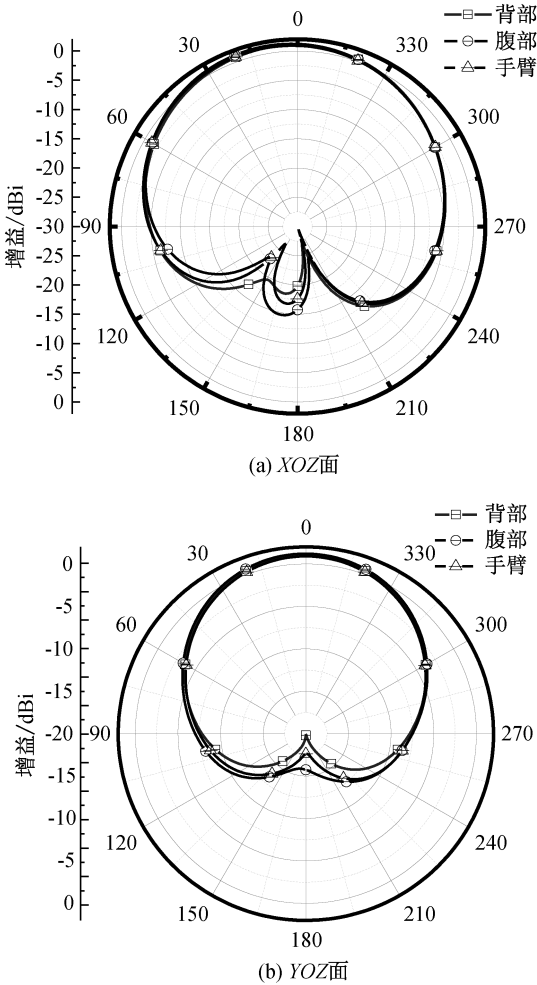


图 11 天线在人体不同佩戴位置上的仿真辐射增益

其次,测试了天线在偏胖、正常与偏瘦的不同人体体态手臂上的反射系数和反射系数曲线,如图 12 所示。偏胖、正常与偏瘦人体的身体质量指数 (Body mass index, BMI) 见表 4。天线在正常人体上的实测环境与仿真最为相似,因此天线谐振在 2.43 GHz,阻抗带宽为 2.40~2.51 GHz,满足 WLAN 频段阻抗带宽需求。在偏胖人体上,天线谐

振在 2.42 GHz,阻抗带宽为 2.28~2.50 GHz。在偏瘦人体上,天线谐振在 2.47 GHz,阻抗带宽为 2.42~2.51 GHz。不同人体的组织电磁参数有着较大差异,但天线均谐振在 WLAN 频段内。

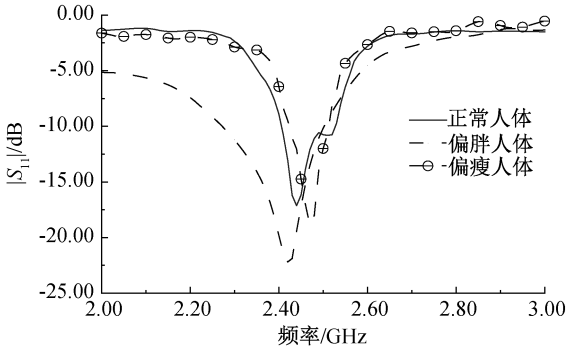


图 12 天线在不同人体体态手臂上的反射系数曲线

表 4 偏胖、正常与偏瘦人体的 BMI 值

人体体态	体重/kg	身高/m	BMI 值/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
偏胖	70	1.6	27.34
正常	66	1.7	22.84
偏瘦	56	1.7	19.38

最后,将天线放置在 1.0 mm 厚的棉布、皮革和绒布等不同穿戴材质上测试了天线的阻抗性能,实物测试如图 13 所示,反射系数曲线如图 14 所示。在棉布上时,天线谐振在 2.46 GHz,阻抗带宽为 2.43~2.51 GHz。在皮革上时,天线谐振在 2.45 GHz,阻抗带宽为 2.41~2.49 GHz。在绒布上时,天线谐振在 2.48 GHz,阻抗带宽为 2.45~2.52 GHz。结果表明,在不同穿戴材质的织物上时,天线仍可在 WLAN 频段谐振。

由以上测试结果可知,改变天线的佩戴位置、人体体态和穿戴材质,天线反射系数均能谐振在 WLAN 频段内。改变人体仿真模型,天线辐射增益主方向也均指向体外。因此,表明了该天线在阻抗与辐射特性上均具有较强的鲁棒性。

2.4 天线在加载人体后的链路余量

可穿戴天线主要用于可穿戴设备与基站之间的通信,因此本文测试了加载人体后的天线链路余量。主要测试了上行链路的信号传输,考虑到人体对天线辐射性能的影响,为避免发射天线与接收天线极化失配的问题,需要用到圆极化的接收天线接收信号,才能获得较为准确的链路余量。因此,将可穿戴天线作为发射天线,接收天线采用轴比带宽为 1.64~2.92 GHz、远场增益为 3.79 dBi 的宽带圆极化微带贴片天线进行信号传输。对于远场通信,接收端的接收功率可用式(4)计算:

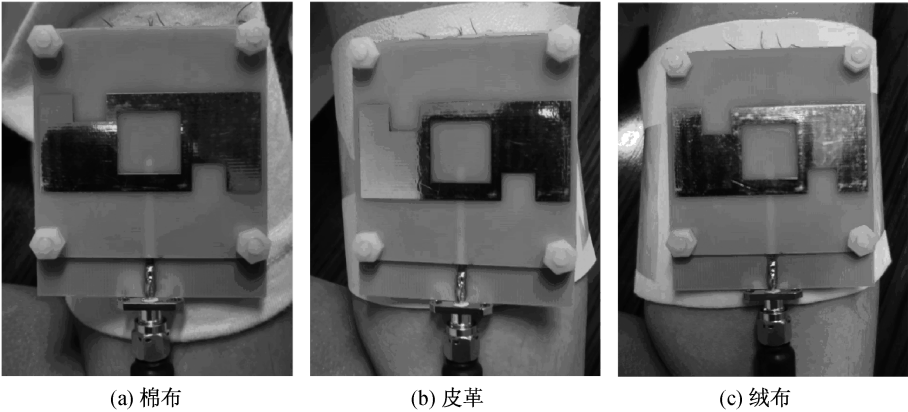


图 13 天线在不同穿戴材质上的实物测试图

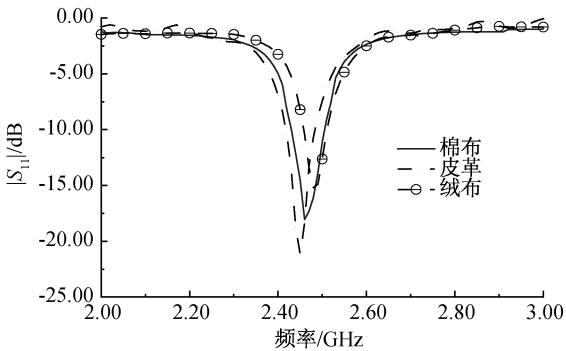


图 14 天线在不同穿戴材质上的反射系数曲线

$$P_{\text{receiver}} = P_{\text{t}} + G_{\text{t}} + G_{\text{r}} - A - L_{\text{fp}} \tag{4}$$

其中: P_{t} 是发射天线输入功率,dBm; P_{receiver} 是接收机接收的功率,dBm; G_{t} 是发射天线增益,dBi; G_{r} 是接收天线增益,dBi; A 是附加损耗,包括收发天线的馈电损耗、大气损耗、系统损耗和匹配损耗,dB; L_{fp} 是自由空间内的路径损耗,dB。

本次通信测试所用的收发芯片型号为 CC2530, 是适用于 WLAN 频段 IEEE 802. 15. 4 标准下的射频收发器,具有较高的接收灵敏度和抗干扰性能。该芯片在传输速率为 250 kps 下具有−91.00 dBm 的接收功率灵敏度。链路余量用式(5)计算:

$$P_{\text{Link-margin}} = P_{\text{receiver}} - P_{\text{sensitivity}} \tag{5}$$

其中: $P_{\text{sensitivity}}$ 为芯片接收功率灵敏度,dBm; P_{receiver} 为 WLAN 频段接收功率,dBm; $P_{\text{Link-margin}}$ 为链路余量,dB。

在 WLAN 频段接收与发射天线不同间距时的接收功率见表 5。天线接收功率随着传输距离的增加而降低,根据式(5)得到天线在 WLAN 频段不同距离下通信的链路余量值。当发射天线与接收天线距离 0.5、1.0、2.0 m 时,收发芯片均具有链路余量。测试结果表明,在无线体域网应用中,可穿戴天线可与外部基站收发天线实现正常通信。

表 5 不同距离下的链路余量

距离/m	WLAN 频段 接收功率 $P_{\text{receiver}}/\text{dBm}$	芯片接收 功率灵敏度 $P_{\text{sensitivity}}/\text{dBm}$	链路余量/dB
0.5	−36.57		44.43
1.0	−40.31	−91.00	40.69
2.0	−45.86		35.14

2.5 人体比吸收率

比吸收率 SAR 是指电磁波与人体组织之间的相互作用,为了不对人体产生伤害,中国测试标准 YD/T 1644 规定了 10-gSAR 不能超过 2.00 W/kg。将天线放置在人体模型上方 1.0 mm 高处,仿真后得出天线 SAR 值较大的区域主要在寄生微带贴片中心开槽部分,位于耦合馈电正下方,天线 SAR 仿真分布如图 15 所示。对天线谐振处仿真后得出,本次设计提出的天线入射功率为 1 W 对应的 10-gSAR 值为 0.32 W/kg,满足中国标准要求。

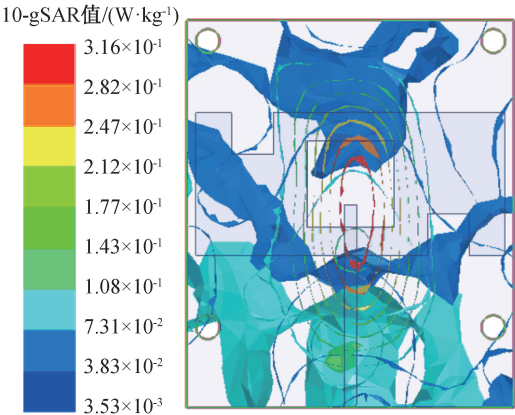


图 15 天线 SAR 仿真分布图

3 结 论

本文设计了一种工作在 WLAN 频段内的具有高鲁棒性的可穿戴天线。通过耦合馈电和槽缝电流的方式对具有体外辐射能力的微带贴片结构进行改

进,使得天线阻抗带宽可以覆盖 WLAN 频段。通过采用完整铜箔地面,有效地增加了天线的鲁棒性。仿真与测试结果的一致性较好,天线在不伤害人体的情况下,具有体外定向辐射增益。改变天线外部环境,天线的反射系数与辐射增益变化较小,具有较高的鲁棒性。因此,该天线适用于可穿戴设备与基站间的体外通信,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Kahng S, Lee C, Park H, et al. A WBAN reader antenna to improve the wireless link with an in-body WBAN antenna[C]//2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP). Hyderabad, India: IEEE, 2018: 1-3.
- [2] Samal P B, Jack Soh P, Zakaria Z. Compact and wearable microstrip-based textile antenna with full ground plane designed for WBAN-UWB 802.15.6 application[C]//2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Krakow, Poland: IEEE, 2019: 1-4.
- [3] Lee H, Tak J, Choi J. Wearable antenna integrated into military berets for indoor/outdoor positioning system [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1919-1922.
- [4] Afruz U, Kabir M A. Design of wearable microstrip patch antenna for wireless body area network[C]//2021 24th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT). Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2021: 1-5.
- [5] Sayem A S M, Simorangkir R B V B, Esselle K P, et al. Development of robust transparent conformal antennas based on conductive mesh-polymer composite for unobtrusive wearable applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(12): 7216-7224.
- [6] Joshi R, Podilchak S K, Anagnostou D E, et al. Analysis and design of dual-band folded-shortened patch antennas for robust wearable applications [J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2020, 1: 239-252.
- [7] Li H Y, Du J X, Yang X X. Compact triple-band wearable circular patch antenna for WLAN/WiMAX applications [C]//2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). Taipei, Taiwan, China: IEEE, 2021: 1-2.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 何鱼, 刘毅, 杨银堂. 基于 PDMS 衬底的可延展柔性倒 F 天线设计[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(6): 724-733.
- [11] 张笑恒, 贺青, 迟宗涛. 一种应用于 ISM 频段和 WiFi 频段的共面波导型天线[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2021, 36(2): 83-86.
- [12] Dang Q H, Chen S J, Ranasinghe D C, et al. A frequency-reconfigurable wearable textile antenna with one octave tuning range [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(12): 8080-8089.
- [13] Mohamadzade B, Simorangkir R B V B, Hashmi R M, et al. A conformal, dynamic pattern-reconfigurable antenna using conductive textile-polymer composite[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(10): 6175-6184.
- [14] Gharaati A, Goudarzi A, Mirzavand R. Compact circularly polarized wideband wearable slot antenna for WBAN/WLAN applications[C]//2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Dusseldorf, Germany: IEEE, 2021: 1-3.
- [15] Jouade A, Himdi M, Chauloux A, et al. Mechanically pattern-reconfigurable bended horn antenna for high-power applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 457-460.
- [16] Ahmed S, Mehmood A, Sydänheimo L, et al. Glove-integrated textile antenna with reduced SAR for wearable UHF RFID reader [C]//2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA). Pisa, Italy: IEEE, 2019: 231-235.

(责任编辑:康 锋)