

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508517

可穿戴柔性环保混合可重构双频天线*

杨文冬^{1,2} 成 曦^{1,3}

(1. 辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 葫芦岛 125105; 2. 辽宁省无线射频大数据智能应用重点实验室 葫芦岛 125105; 3. 南京航空航天大学电子与信息工程学院 南京 210016)

摘 要:针对当前可穿戴医疗设备对天线宽频带、多功能集成与生物兼容性等方面的迫切需求,设计了一款基于环保柔性纸基材的混合可重构双频天线。该天线选用相纸作为介质基板,结构尺寸为 $22\times 25\times 0.27\text{ mm}^3$,兼具优良的柔韧性与轻量化特性。通过枝节加载技术实现双频特性,并集成PIN二极管作为射频开关,调节其通断状态以改变电流路径,从而实现频率和辐射方向图的4种可重构工作模式,具体包括两种双频定向辐射模式、一种低频全向辐射模式及一种高频全向辐射模式。采用丝网印刷银浆技术在相纸基板上制备天线结构,并结合偏置电路模块集成PIN二极管控制单元,完成天线实物的制作。测试结果表明,该天线在2.4和5.8 GHz频段均可工作于双频或单频模式,各模式下-10 dB阻抗带宽均大于20%,峰值增益稳定在3 dBi左右,辐射效率高于60%。在曲率半径为20 mm的弯曲状态下及人体组织模型加载条件下,天线仍保持良好的阻抗匹配与辐射性能,展现出良好的结构鲁棒性与佩戴适应性。比吸收率在2.5与6 GHz时分别为1.145与1.312 W/kg,均低于国际安全限值,满足可穿戴设备对人体的电磁安全要求。环保材料、紧凑结构与混合可重构能力的有机结合,使得该天线在短期医疗监测与体域网通信等可穿戴系统中具备良好的实用潜力。

关键词: 可穿戴天线; 柔性天线; 频率可重构; 方向图可重构; 相纸基材

中图分类号: TN821.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Wearable flexible eco-friendly hybrid reconfigurable dual-band antenna

Yang Wendong^{1,2} Cheng Xi^{1,3}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. Liaoning Key Laboratory of Radio Frequency and Big Data for Intelligent Applications, Huludao 125105, China;
3. School of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In response to the pressing demands of current wearable medical devices for wide bandwidth, multi-functional integration, and biocompatibility, this paper presents the design of a hybrid reconfigurable dual-band antenna based on an eco-friendly flexible paper substrate. The proposed antenna employs photo paper as the dielectric substrate, with compact dimensions of $22\times 25\times 0.27\text{ mm}^3$, offering excellent flexibility and lightweight characteristics. Dual-band operation is achieved through stub-loading techniques, while integrated PIN diodes function as RF switches. By controlling their ON/OFF states to alter the current paths, the antenna achieves four reconfigurable operating modes in both frequency and radiation pattern: specifically, two dual-band directional radiation modes, one low-frequency omnidirectional radiation mode, and one high-frequency omnidirectional radiation mode. The antenna structure was fabricated on the photo paper substrate using the screen-printing technique with silver paste, and the prototype was completed by integrating PIN diode control units via a bias circuit module. The measured results demonstrate that the antenna operates effectively in either dual-band or single-band modes across the 2.4 and 5.8 GHz bands. Across all modes, the -10 dB impedance bandwidth exceeds 20%, the peak gain remains stable at approximately 3 dBi, and the radiation efficiency is above 60%. Under bending conditions with a curvature radius of 20 mm and when loaded with a human tissue model, the antenna maintains stable impedance matching and radiation performance,

收稿日期: 2025-06-28 Received Date: 2025-06-28

* 基金项目: 博士启动项目-可喷印电子墨水及其印刷光电/射频器件的研究(21-1039)项目资助

demonstrating good structural robustness and wearability. The specific absorption rate (SAR) values are 1.145 W/kg at 2.5 GHz and 1.312 W/kg at 6 GHz, both complying with international safety standards and meeting the electromagnetic safety requirements for wearable devices used on the human body. The combination of eco-friendly materials, a compact structure, and hybrid reconfigurability endows the proposed antenna with significant potential for practical applications in short-term medical monitoring and body area communication wearable systems.

Keywords: wearable antenna; flexible antenna; frequency reconfigurable; pattern reconfigurable; photopaper substrate

0 引言

物联网(internet of things, IoT)^[1]和第五代移动通信技术(5th generation mobile communication technology, 5G)^[2]的发展推动了可穿戴设备的创新及应用^[3-4]。可穿戴市场不断扩大,应用场景涵盖智能手表、智能手环等消费类电子设备以及用于医疗监测和数据传输领域的小型贴片传感等,其功能的多样化发展作为通信设备关键组件的天线提出了更高的要求:天线的设计需同步满足小型化、轻量化、柔性化、宽频带、多功能及高辐射效率等多方面需求。同时这类天线在可穿戴设备中的应用会受到空间、形状和柔性等方面的限制,因此基于传统刚性基板的天线设计已难以满足可穿戴设备对天线弯曲变形的需求^[5-6]。

柔性天线凭借其优越的柔韧性和共形特性,能满足可穿戴设备对于轻量、柔软、小型化的要求,成为可穿戴设备的理想选择^[7]。面向可穿戴设备的多功能需求和实际应用场景,宽带天线^[8-10]和多频天线^[11-12]由于能够兼容不同的通信标准已被广泛研究。例如,文献[13]提出了一种谐振频率为 3.5 GHz 和 5.8 GHz 的双频可穿戴天线,其带宽分别为 7.55% 和 4.00%,低频可用于数据传输,高频可用于健康监测。但这类天线频段固定,缺乏按需调整天线工作模式的灵活性,难以适应多变的应用需求,限制了其在可穿戴设备中的广泛应用。能根据不同使用需求动态调整天线工作频段或辐射模式的可重构天线为可穿戴设备的发展提供了新的可能性^[14]。这类天线可以通过控制加载在天线上的可调器件,提高其频谱利用率并增强其在实际佩戴环境中的适用性。因此,能够应用于可穿戴的可重构天线成为研究热点。文献[15]提出了一种尺寸为 $39.6 \times 46 \times 1.6 \text{ mm}^3$ 的六波段方向图可重构天线,天线各波段的带宽在 1.90% ~ 2.82%,通过控制主贴片边缘的二极管与副贴片的连接,改变辐射贴片的有效电长度以实现天线方向图的可重构。文献[16]提出了一种尺寸为 $30 \times 30 \times 0.13 \text{ mm}^3$ 的柔性频率可重构天线,通过使用二极管控制天线右臂的长度实现了频率可重构,并评估了天线在弯曲状态下的性能。文献[17]提出了一种结合刚性基板 FR-4 和柔性基板毛毡的宽带双模可重构天线,天线尺寸为 $55 \times 55 \times$

3.6 mm^3 ,通过 4 个二极管(positive-intrinsic-negative diode, PIN)的切换使得天线实现了体和离体工作两种模式,评估了天线在弯曲情况下的性能。文献[18]则提出了一种频率和方向图同时可重构的可穿戴纺织天线,天线尺寸为 $70 \times 70 \times 4.8 \text{ mm}^3$,通过不同激励圆形贴片边缘加载的 3 个变容二极管,允许天线在宽边和全向辐射模式间进行切换,同时对低频工作频段进行频率可重构。上述天线通过多频设计和按需分配工作模式有效提升了其在可穿戴设备多样化通信场景中的应用潜力。然而,现有天线设计在宽频覆盖、混合可重构设计以及低成本制造等方面仍面临如天线尺寸较大,带宽较窄、可重构类型单一,未充分考虑弯曲和近人体工作时对天线性能的影响等挑战。可穿戴设备在实际应用中需面对由佩戴位置和姿势不同导致的复杂环境,因此在进行可重构设计时必须充分考虑天线的适用性,确保天线能保持多功能性、信号可靠性和设备集成性,结合频率和方向图的混合可重构设计是实现这一目标的有效途径。除天线类型的适应性外,对于佩戴在人体的可穿戴设备而言,选择对人体无害的基材也至关重要。已经有不同的柔性基材被用于制作可穿戴的可重构天线,如文献[19]通过喷墨工艺印制在商用相纸上制作了一款频率可重构天线,文献[20]在柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)基材上设计了一款频率可重构天线,文献[21]则在柔性液晶聚合物(liquid crystal polymer, LCP)基板上设计了一款频率可重构天线。其中,纸基材料具备环保、低成本、轻量化及易于制作等特性,在用于短期健康监测的贴片传感领域具有显著优势。

针对上述问题,从可穿戴应用场景的宽频及多功能需求出发,开发一种基于低成本和环保的柔性材料、兼具多模式可重构能力且符合穿戴安全标准的小型化天线具有重要的研究意义。因此,本文介绍了一种小型化的柔性混合可重构天线,以实现可穿戴设备在医疗与通讯领域的应用需求。该天线采用柔性的环保相纸作为介质基板,尺寸设计为 $22 \times 25 \times 0.27 \text{ mm}^3$ ($0.176\lambda_0 \times 0.2\lambda_0 \times 0.002\lambda_0$, λ_0 为 2.4 GHz 时的自由空间波长),通过在双频单极子天线上加载两个 PIN 二极管对天线不同辐射单元和不同长度枝节实现有效激励,实现了天线在 2.4 和 5.8 GHz 双频模式下的辐射方向图可重构及其单频模式下的频率可重构。经由丝网工艺制作天线实物并进行了实测。仿真和实验结果表明,天线成功实现预期的 4 种

工作模式,且在工作频段内的阻抗带宽均超过 20%,在曲率半径为 20 mm 的最大弯曲条件下仍可稳定工作,且符合穿戴应用的电磁安全标准。该天线既能按需分配工作频段,又能按照场景佩戴需求调整辐射覆盖区域,并兼顾环保与低成本特性,在面向医疗与通讯的短期可穿戴系统中具有应用潜力。

1 天线设计与制作

重点介绍双频单极子天线、可重构双频天线以及偏置电路的理论设计、仿真模型与实物制作过程。

1.1 双频天线的设计

本文提出的天线采用银浆导电材料,通过丝网印刷工艺将天线图案制作在环保的相纸基板上。相纸基板厚度为 0.27 mm,介电常数和损耗正切值分别为 3.2 和 0.05。天线的结构演化过程及相应的反射系数变化如图 1 所示,其中蓝色部分代表由导电银浆制作的辐射单元部分;黄色部分代表使用的相纸基板。

为了实现多频工作模式,常见的方法包括枝节法、刻槽法、寄生枝节法等。其中,枝节法结构简单,调谐直观,在传统的全球移动通信系统(global system for mobile, GSM)、双频无线局域网(dual-band wireless local area network, WLAN)和无线网络(wireless fidelity, WiFi)天线的设计中应用广泛。其核心思想是不同长度的枝节提供不同的有效电长度,从而形成独立的谐振模式,实现多频特性。在调谐过程中,由于各枝节相对较为独立,某一支路的长度调整主要影响其对应的工作频段而不会显著干扰其他频段,因此鉴于后续可重构功能设计与控制的简便性,选择采用枝节法实现天线的双频特性。根据其设计原理,枝节通常按照等效单极子结构近似,谐振时的长度应满足以下条件:

$$L_0 = \frac{\lambda_0}{4} \quad (1)$$

$$L_{eff} = \frac{\lambda_{eff}}{4} \quad (2)$$

式中: λ_0 是自由空间中的波长; λ_{eff} 是考虑基板介电常数的有效波长。枝节的长度通常介于 L_0 和 L_{eff} 之间。该设计原理已在多篇研究中被验证,例如,文献[14]通过 PIN 二极管控制不同长度辐射枝节的接入,使天线的等效电长度可在多种状态间切换,实现 2.4、3.5、4 GHz 等多个谐振点。文献[17]等在纸基可重构天线中采用 U 型与 L 型枝节,每个枝节对应不同的工作频段,并通过 PIN 二极管实现 1.9 和 2.4 GHz 频带的切换。

面向可穿戴短期监测应用,论文将天线设计工作在 2.4 GHz 和 5.8 GHz 两个频段,可覆盖工业、科学和医疗网络(industrial scientific medical, ISM)、WiFi、蓝牙及

WLAN 等典型通信协议,适用于体域网环境下的数据采集及传输需求。根据上述枝节等效长度的计算公式,谐振频率越低所需枝节越长,用于实现低频 2.4 GHz 谐振的长枝节长度应位于 17.47 ~ 31.25 mm;用于生成 5.8 GHz 谐振的短枝节需在 7.22 ~ 12.93 mm 范围内。本文最终优化得到的枝节尺寸与计算范围一致,验证了基于枝节等效电长度构建双频结构的有效性与设计合理性。

图 1 的插图展现了天线的设计过程。天线 1 是由介质层、共面地、馈线、右侧的高频单极子天线和左侧的低频单极子天线组成的双频天线,其工作频段覆盖 2.4 GHz 和 5.8 GHz 的两个频段。基于天线 1 的设计,将控制高频和低频枝节设计到天线同侧以实现小型化,得到了辐射单元结构相同但方向对称的天线 2 和天线 3。从图 1 中其对应的三维辐射方向图和 S_{11} 曲线可以看出,这两个天线有相同的工作频段和谐振频率,仍能覆盖 ISM 频段和 WLAN 频段,但其方向图由于表面电流分布不同而有所差异。

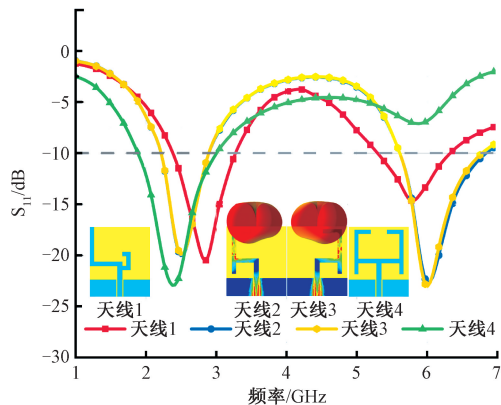


图 1 双频天线的设计过程

Fig. 1 Design process of the dual-band antenna

这种特性与方向图可重构在相同频率下,方向图波束可控的特性相符。因此,后续可重构设计考虑将天线 2 和 3 整合到一个天线中得到天线 4,并通过在合适的位置加载二极管单独激励左/右侧的辐射单元实现方向图可重构。在未添加二极管控制时,天线 4 的辐射单元整体呈现为一款具有较长枝节的单极子天线,从图 1 中天线 4 的仿真 S_{11} 曲线可以看出,该天线能够工作在 2.4 GHz 的低频频段中。将两个单极子天线单元设计到同一个天线结构中,枝节间的耦合作用会使二者互相影响,因此,后续可重构设计中需要进一步优化枝节尺寸,并合理选择二极管加载位置。

1.2 可重构双频天线的设计

采用枝节法实现多频天线的设计难点在于需要平衡枝节间的耦合,而可重构天线的设计难点在于需要保持

天线频率特性稳定的前提下对天线的方向图或工作频段进行灵活重构。为了实现稳定且性能良好的可重构双频天线,设计在图 1 插图中天线 4 结构的馈线与左、右辐射单元连接的适当位置处添加了二极管(命名为 SW1 和 SW2),并对天线的参数进行了优化设计。天线的最终结构及其关键参数如图 2 所示。

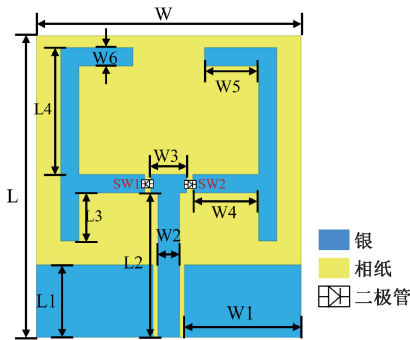


图 2 可重构天线结构

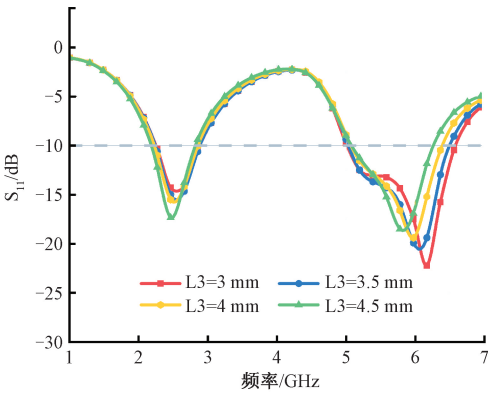
Fig. 2 Configuration of the reconfigurable antenna

为了展现天线的设计过程,此处对天线的关键参数 $L3$ 和 $W3$ 进行了优化分析,结果如图 3 所示。 $L3$ 为天线控制高频枝节的关键长度参数,从图 3(a)可以看出随着 $L3$ 的增大,天线的高频谐振点出现明显的左移,这与枝节法设计多频天线的原理相符,一般情况下,枝节越长,天线的谐振点越低;同时由于枝节间的耦合影响,该模式下天线的低频谐振点也出现轻微左移;而 $W3$ 为天线在单个低频模式下控制高频有效枝节长度的关键参数,从图 3(b)则表明随着 $W3$ 的增大,天线的高频谐振点同样左移。最终为了满足设计要求,优化后的 $L3$ 和 $W3$ 的尺寸分别为 4 和 3 mm,最终优化后的天线参数如表 1 所示。

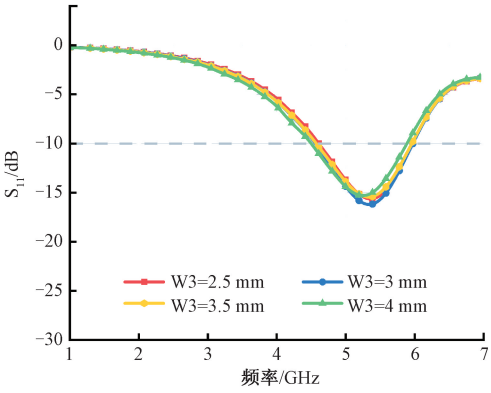
表 1 可重构天线的结构参数
Table 1 Structural parameters of the reconfigurable antenna (mm)

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
W	22	W4	5.5	L1	6	H	0.27
W1	9.7	W5	4.5	L2	12	—	—
W2	1.8	W6	1.5	L3	4	—	—
W3	3	L	25	L4	10.5	—	—

当二极管 SW1 或 SW2 导通时,可以控制左/右辐射贴片的单独接入,从而引起天线辐射贴片两侧的相位差,使得天线的辐射方向图可进行 180° 的调节,实现双频模式下的方向图可重构。同时,通过调整二极管的位置,可以在两个二极管同时切换为导通或截止状态下,改变天线整体的有效辐射枝节长度,进一步实现单频模式下的



(a) 不同 $L3$ 参数对应的 S_{11} 值
(a) S_{11} values for different $L3$ parameters



(b) 不同 $W3$ 参数对应的 S_{11} 值
(b) S_{11} values for different $W3$ parameters

图 3 可重构天线的优化过程

Fig. 3 Optimization process of the reconfigurable antenna

频率可重构。因此,通过控制两个二极管的通断状态,天线共可实现 4 种模式的可重构,如图 4 所示。

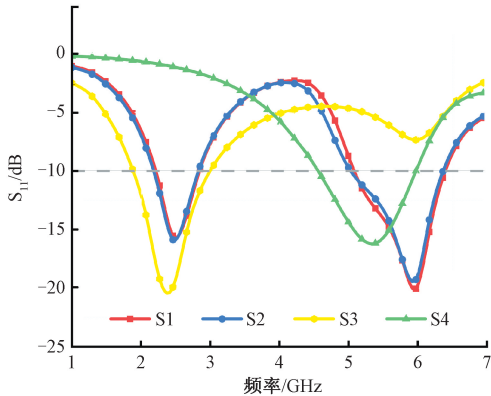


图 4 可重构天线设计的不同模式对应的 S_{11} 值

Fig. 4 The S_{11} values corresponding to different modes of reconfigurable antenna design

从图 4 可以看出,天线 4 种工作模式下的性能分别为模式 S1:二极管 SW1 截止,SW2 导通,仅右侧辐射单

元接入,辐射特性可等效为天线3,天线工作在ISM和WLAN双频带;模式S2:二极管SW1导通,SW2截止,仅左侧辐射单元接入,辐射特性可等效为天线2,天线工作在ISM和WLAN双频带;模式S3:二极管SW1、SW2均导通,馈线两侧的辐射单元都被接入,天线整体呈现对称分布,等效为单极子天线,辐射特性可等效为天线4,天线工作在低频的ISM频段;模式S4:二极管SW1、SW2均截止,天线工作在高频的WLAN频段。

图5所示为可重构天线在4种模式谐振频率下的电流分布特性,图6所示为对应模式下天线的三维方向图。结果显示,通过有效控制二极管的通断,天线的电流分布会发生显著变化,进而影响天线的工作频段和辐射方向图,这与前文所述的设计理念相符。在模式1/2中,电流主要集中在右/左侧辐射单元,二者通过不同的电流分布产生了不同的天线辐射方向;在模式3中,两侧的辐射单元同时接入,天线的有效激励枝节长度较长,其电流分布对称且广泛,天线进入全向低频工作模式;而在模式4中,二极管断开使得两侧单元均未接入,天线电流主要集中在馈线区域,较短的有效枝节长度使得天线工作在高频的5.8 GHz频段。因此,通过控制二极管调节天线电流的分布,最终实现了天线在方向图和频段上的可重构性。

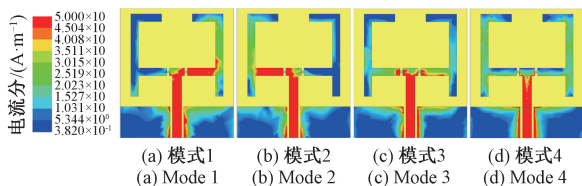


图5 可重构天线不同模式下的表面电流分布

Fig. 5 Surface current distribution of the reconfigurable antenna in different modes

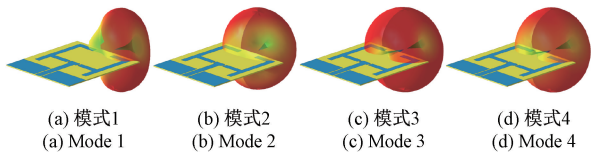


图6 可重构天线在不同模式下的三维辐射方向图

Fig. 6 Three-dimensional radiation patterns of the reconfigurable antenna in different modes

1.3 二极管的等效电路设计及天线实物制作

本文提出的可重构天线通过加载PIN二极管实现方向图和频率特性的动态调控,因此需对二极管的控制方式进行研究。所选用的二极管型号为MA4AGFCP910,由于二极管的“导通”和“截止”不是理想的短路和开路,采用等效的集总元件模型仿真二极管的两种状态。当二极管处于正向偏置状态时(ON状态),其等效为 $5.2\ \Omega$

的电阻;当二极管处于反向偏置状态时(OFF状态),其等效为 $0.018\ \text{PF}$ 的电容^[22-23]。

在天线实测阶段,为控制PIN二极管的通断状态,并降低天线与外部电源及电路之间的影响,需在其两端施加特定的直流偏置电压并合理设计偏置电路^[24]。在该电路中,除了两个PIN二极管外,还引入了射频扼流圈电感($27\ \text{nH}$,标注为L1、L2、L3)以防止高频信号流向直流源,并引入了隔直电容($10\ \text{PF}$,标注为C1、C2、C3)以避免直流信号对辐射源的影响;此外,在电路中引入了 $120\ \Omega$ 的电阻(R)用于限制电路中的电流,保护电子元件。图7所示为该天线加载二极管的偏置电路原理图。

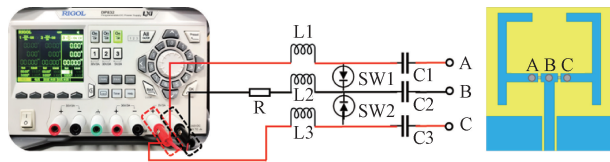


图7 可重构天线的偏置电路原理

Fig. 7 Schematic diagram of the bias circuit for the reconfigurable antenna

图8所示为可重构天线制作的3个阶段。首先是天线设计,导电材料、基板材料、印刷工艺的选择以及印刷网版和电路元器件的准备;其次通过丝网印刷导电银浆料的方式在环保相纸上印刷天线图案及PIN二极管的偏置线路;最后是印刷后处理,包括天线与SMA接头的粘接及二极管的偏置线路与电抗元件的连接。在实际制作过程中,分别制作了二极管与偏置电路粘接的结构和天线结构,通过将前者整体集成至天线结构以提升天线的结构紧凑性,并降低寄生效应对高频性能的影响。

2 实验结果与讨论

为了验证所拟天线的实际性能,将前述的天线模块和偏置电路模块进行了集成,并且通过连接外接直流电源和矢量网络分析仪进行测试。集成后的天线实物及其测试示意图如图9所示。

2.1 反射系数测试

通过控制电路模块中两个PIN二极管的状态,测试了天线在平坦状态下4种工作模式的反射参数 S_{11} ,如图10所示。实验结果表明,在模式S1下,只有右侧二极管导通,天线工作在双频 $2.15 \sim 2.88\ \text{GHz}$ 和 $5.12 \sim 6.71\ \text{GHz}$ 频段,与仿真结果 $2.21 \sim 2.84\ \text{GHz}$ 和 $5.08 \sim 6.40\ \text{GHz}$ 相比,天线在高频带宽略有扩展;在模式S2下,只有左侧二极管导通,天线工作在双频 $2.19 \sim 2.89\ \text{GHz}$ 和 $5.32 \sim 6.41\ \text{GHz}$ 频段,与仿真结果 $2.18 \sim$

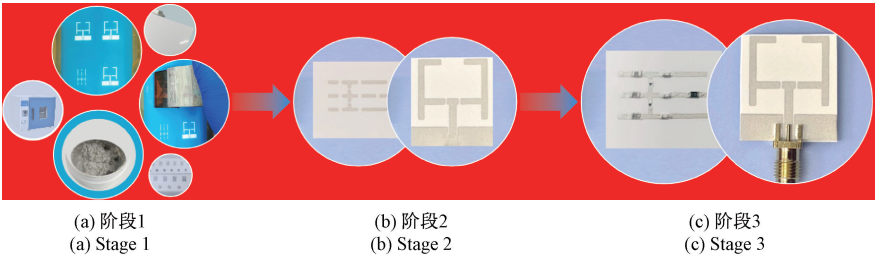


图 8 可重构天线的制作过程

Fig. 8 Fabrication process of the reconfigurable antenna

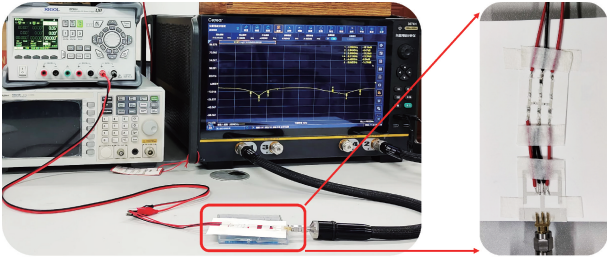


图 9 可重构天线的实物与测试示意图

Fig. 9 Prototype photo and measurement setup of the reconfigurable antenna

2. 83 GHz 和 5.03~6.36 GHz 相比,在低频基本一致,而高频段出现轻微偏移;在模式 S3 下,两个二极管均导通,天线工作在单一低频 1.86~3.16 GHz 模式,仿真与实测结果一致;在模式 S4 下,两个二极管均未导通,天线工作在单一高频 4.50~6.07 GHz 模式,与仿真结果 4.56~5.97 GHz 基本吻合。综合来看,通过调节 PIN 二极管的状态,天线能够在不同工作模式下实现方向图或频段的可重构,体现了设计的多功能性。这些测试结果与仿真结果的一致性验证了天线设计的有效性,测试和仿真之间的差异主要源于制造过程中可能存在的加工误差以及,包括尺寸偏差和二极管及电路模块的电气特性差异。

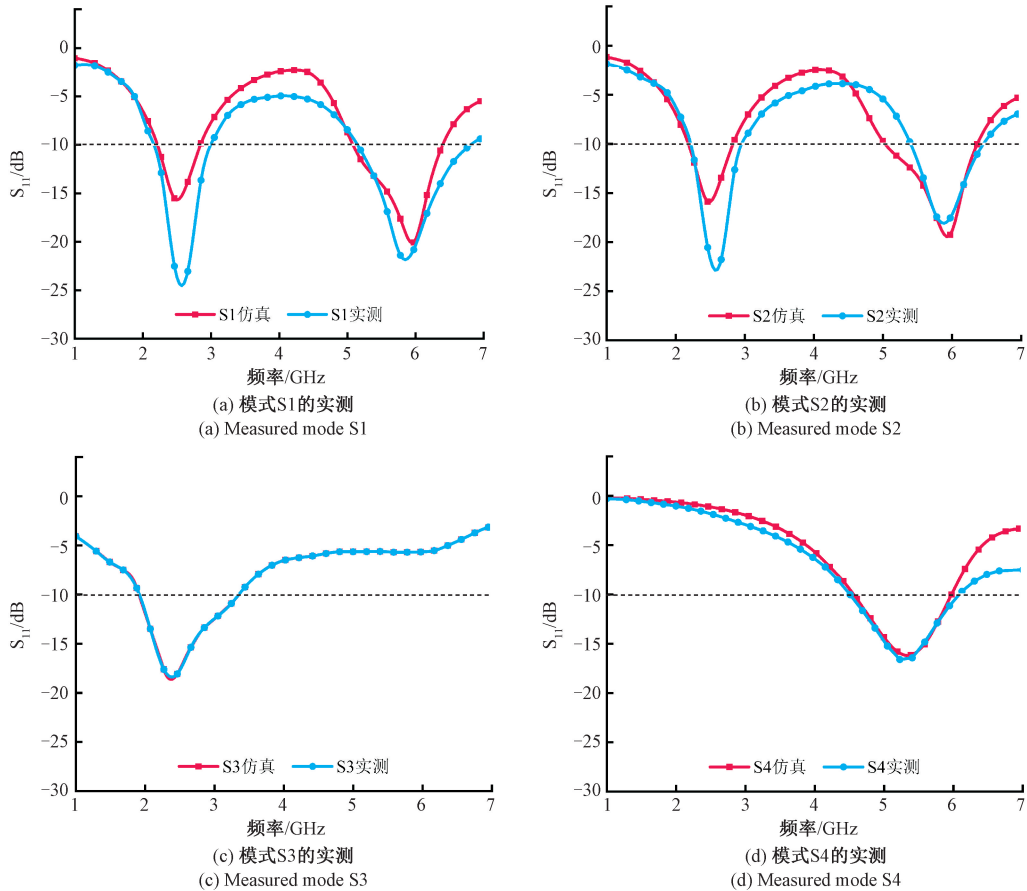


图 10 可重构天线 4 种模式的实测 S_{11}

Fig. 10 Measured S_{11} of the four modes of the reconfigurable antenna

2.2 辐射性能测试

图 11 所示为天线在 4 种工作模式下的辐射方向图特性。图 11(a) 和 (b) 分别为天线在双频模式下 (6 GHz 处) 的辐射方向图。在 E 面 (xoy 平面) 上, 天线表现出典型的双向辐射特性; 而在 H 面 (xoz 平面) 上, 通过二极管的切换激励不同的辐射单元, 使得天线的辐射方向发生变化, 主瓣方向实现了 180° 的切换, 表现出良好的定向辐射特性。

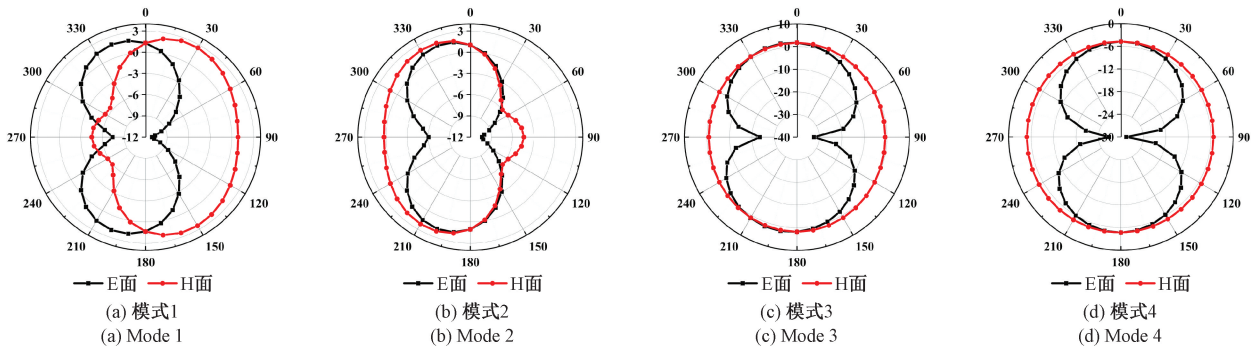


图 11 可重构天线 4 种模式下的辐射方向图
Fig. 11 Radiation pattern of reconfigurable antenna in four modes

天线的模式 1 和 2 均为具有定向辐射特性的双频模式, 模式 3 和 4 均为具有全向辐射特性的单频模式, 因此选取可代表天线在双频和单频工作状态的模式 1 和模式 3 对其效率和增益进行测试。

图 12 所示为天线在模式 1 和 3 下通带内的效率和增益曲线。观察曲线数据可得天线在两种模式下的平均效率可维持在 60% 左右, 双频模式下天线峰值增益约为 3 dBi 左右, 单频模式下可达 3.8 dBi, 这说明天线在两种模式的工作频带内均具有良好的辐射效率和带内增益,

射特性。该特性对于天线应用在可穿戴设备上具有重要意义, 通过按需切换辐射方向性可以使其适应不同的佩戴位置, 避免因佩戴位置的变化导致信号衰减或干扰, 从而提高通信质量和稳定性。图 11(c) 和 (d) 为天线在两种单频模式下的辐射方向图。在 E 面上, 天线依然呈现双向辐射特性, 而在 H 面则表现为全向辐射特性, 适用于需要全向辐射的应用场景。

实现了良好的辐射, 能够有效地传输和接收信号, 进一步验证了天线设计的合理性。

表 2 对天线在 4 种工作模式下的二极管状态和其工作频段的仿真值做出了总结, 并且列出了每种工作模式下的谐振频点、峰值增益和辐射效率。实测数据如图 10 及其相关描述。从表 2 可以看出, 天线在不同工作模式下均具有稳定的峰值增益和较高的辐射效率, 在可重构特性下保持了可靠的性能。这进一步验证了天线设计的可行性和性能稳定性。

表 2 可重构天线 4 种工作模式及性能参数总结

Table 2 Summary of four operating modes and performance parameters of the reconfigurable antenna

工作模式	二极管状态	仿真工作频段/GHz	谐振频率/GHz	峰值增益/dB	效率/%
1	SW1 OFF, SW 2 ON	2.21~2.84, 5.08~6.40	2.53, 5.94	2.94, 3.03	66.89, 62.71
2	SW 1 ON, SW 2 OFF	2.18~2.83, 5.03~6.36	2.49, 5.90	2.86, 2.92	65.52, 64.15
3	SW 1 ON SW 2 ON	1.86~3.16	2.51	3.84	62.51
4	SW 1 OFF SW 2 OFF	4.56~5.97	5.35	3.05	64.48

2.3 柔性 and 可穿戴性评估

为评估天线在弯曲状态下的性能, 本文选取可代表天线在双频和单频工作状态的模式 1 和模式 3 对天线的弯曲特性进行了测试。如图 13 所示, 在两种模式下, 分别仿真了天线在曲率半径 $R_{XY}=20, 30$ mm 时沿 X 轴和 Y

轴弯曲时的情况并且对天线沿 X 轴和 Y 轴以半径 $R_{XY}=20$ mm 弯曲时进行了实际测试。可以看出, 天线在模式 1 和模式 3 下分别在曲率半径 $R_{XY}=20, 30$ mm 时的弯曲表现均保持稳定, 尤其是在沿 Y 轴弯曲时, 天线几乎没有性能变化。而在沿 X 轴弯曲时, 随着曲率半径的减小

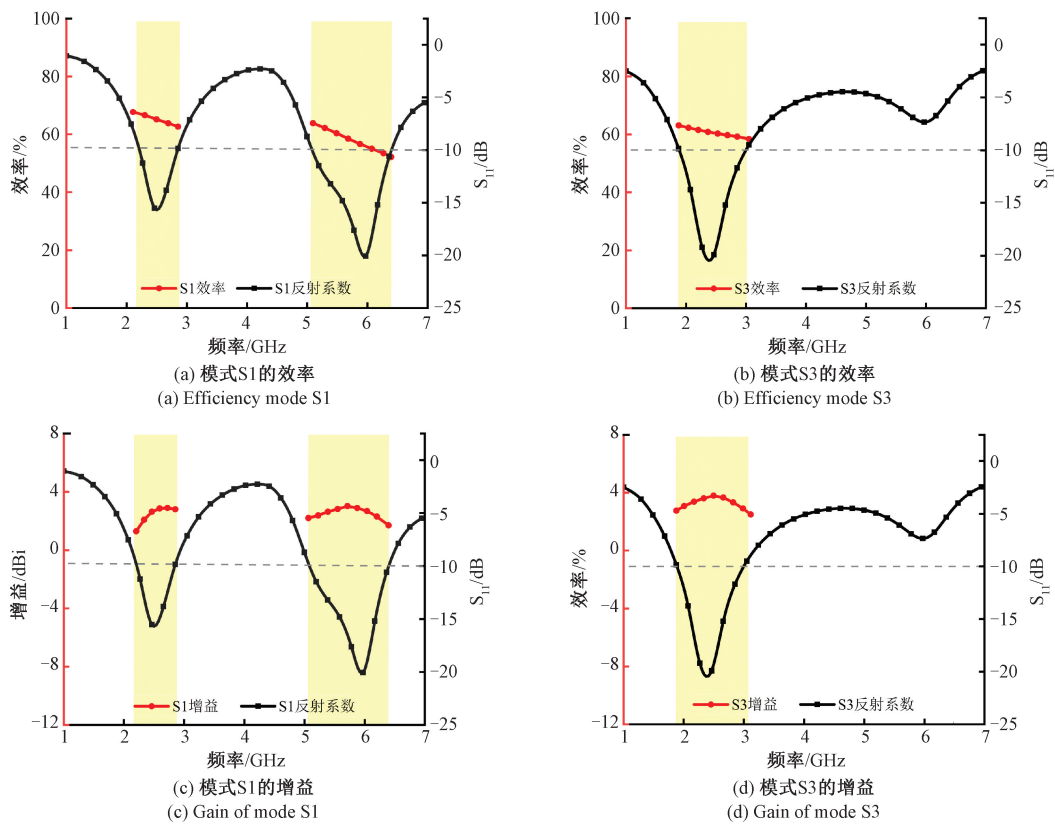


图 12 可重构天线模式 1 和模式 3 的仿真效率和增益
Fig. 12 Simulated efficiency and gain of mode 1 and mode 3 of reconfigurable antenna

(即弯曲程度增大),天线在两种模式下的谐振频率出现不同程度偏移。尽管如此,其工作频段仍可覆盖目标频段,表明天线在弯曲状态下具备良好的功能保持能力,满足弯曲可靠性要求。考虑到本文采用的相纸基材属低成本材料体系,其机械强度与防潮性能有限,难以承受上千次弯曲循环的耐久性测试。因此,本研究聚焦于短期佩戴与非频繁弯曲的应用场景(如贴附于腕带、手臂外侧或衣物内侧等相对平整区域),其使用周期与弯折次数远低于长期可穿戴设备的要求,适用于一次性或短期使用后可废弃的应用场合。此外,由于未施加封装保护,相纸基材在多次弯折后会出现轻微褶皱并伴随性能衰减。基于实际应用条件,本文重点验证天线在有限弯曲角度下的性能稳定性。实验结果表明,天线在曲率半径为 20 mm 与 30 mm 的弯曲条件下仍能保持稳定工作,证实其在手腕、手臂等轻度弯曲场景中具备适用性。

此外,针对天线在人体附近工作的安全性,构建了人体模型(图 14(a))并进行了比吸收率(specific absorption rate, SAR)测试。人体组织的参数会随频率变化,因此表 3 给出了人体模型的厚度及天线在模式 1 的谐振频率

附近的 2.5 和 6 GHz 处人体组织的介电常数。在设定输入功率为 0.1 W,天线距离人体组织为 10 mm 时进行了仿真。实验结果表明,两个频率点下的 10 g 组织平均 SAR 值分别为 1.145 和 1.312 W/kg,均低于国际非电离辐射防护委员会(the international commission for non-ionizing radiation protection, ICNIRP)规定的 2.0 W/kg 安全标准^[25],图 14(b)给出了天线在 6 GHz 处的 SAR 值仿真图,验证了天线在可穿戴应用中的安全性。

最后,表 4 将本文设计的天线与相关文献的天线性能进行了对比,其中“/”表明文献[15-17,19-21]没有此类描述,“√”表示所引文献中进行了相应测试。比较内容包括天线尺寸、基板材料、工作频段、阻抗带宽、可重构情况以及弯曲和可穿戴的评估情况。其中天线的阻抗带宽计算为反射系数 $S_{11} < -10$ dB 的信号带宽与中心频率的比值。与现有设计相比,本文所提出的天线在尺寸上更为紧凑,具有更宽的工作带宽,并采用了环保的基材,同时通过混合可重构技术提升了天线在实际应用中的灵活性和适应性,特别是针对可穿戴应用,天线的弯曲性能和可穿戴性也得到了验证,确保了其在复杂环境中的可靠性。

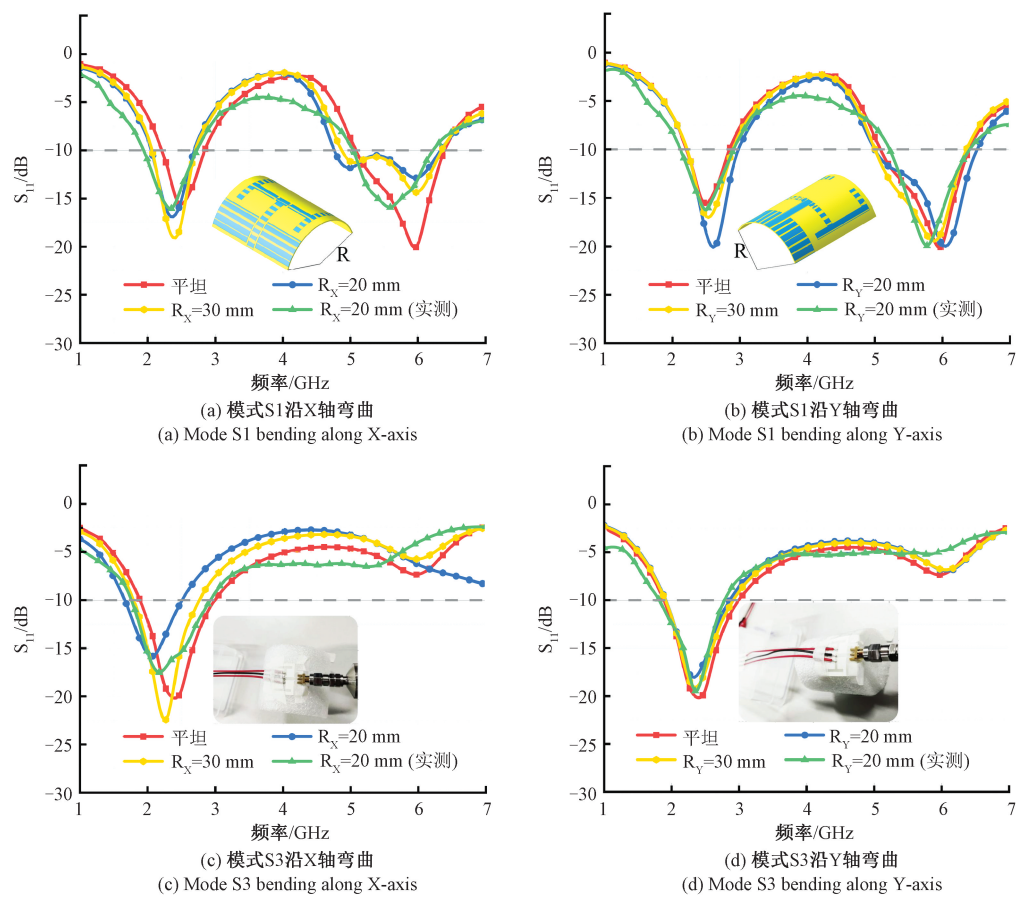


图 13 可重构天线模式 S1 和 S3 的弯曲仿真和测试

Fig. 13 Simulated and measured bending of reconfigurable antenna mode S1 and S3

表 3 人体模型组织参数和厚度(保留 4 位有效数字)

Table 3 Human model tissue parameters and thicknesses (retain 4 significant figures)

组织	2.5 GHz			6.0 GHz			厚度/mm
	ε_r	$\tan\delta$	$\sigma/(S\cdot m^{-1})$	ε_r	$\tan\delta$	$\sigma/(S\cdot m^{-1})$	
皮肤(干)	37.95	0.282	1.488	34.95	0.334	3.891	2
脂肪	5.275	0.145	1.107	4.937	0.186	0.306	8
肌肉	52.67	0.242	1.773	48.22	0.323	5.202	23

表 4 本文所提出的天线与文献中报道的其他天线的对比

Table 4 Comparison of the proposed antenna in this chapter with other antennas reported in the literatures

文献	尺寸/mm ³	基板材料	工作频率/GHz	阻抗带宽/%	可重构类型/模式数量/ 开关数量	弯曲 测试	可穿戴 评估
[15]	39.6×46×1.6	FR-4	2.4/3.8/4.35/4.7/5.5/6.25	1.90~2.82	方向图可重构/4/PIN×2	/	/
[16]	30×30×0.13	ROGERS 3003	2.4/3.5/4	/	频率可重构/3/PIN×2	✓	/
[17]	55×55×3.6	FR4+毛毡	2.4	/	方向图可重构/2/PIN×4	✓	/
[19]	30×40×0.44	相纸	2.4/3.4	16.86/25.35	频率可重构/4/PIN×2	/	/
[20]	59×31×0.1	PET	2.36/2.42/3.64	7.63/6.61/7.42	频率+极化可重构/3/PIN×1	✓	/
[21]	40×28×0.1	LCP	2.45/5.5	/	频率可重构/4/MEMS×2	✓	✓
本文	22×25×0.27	相纸	2.49/2.51/5.35/5.94	26.10/51.59/26.36/22.22	频率+方向图可重构/4/PIN×2	✓	✓

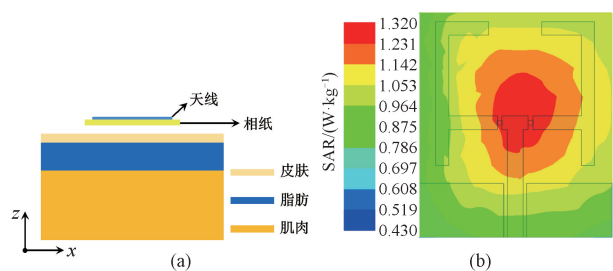


图 14 可重构天线模式 S1 的可穿戴测试

Fig. 14 Wearable test of reconfigurable antenna mode S1

3 结 论

本文面向医疗与通信领域中可穿戴设备对多功能、短期应用的需求,设计并实现了一种基于环保相纸材料的混合可重构双频柔性天线。该天线尺寸为 $22 \times 25 \times 0.27 \text{ mm}^3$,结构紧凑,采用枝节加载方法实现双频特性,并通过集成二极管控制电流路径,在 2.4 与 5.8 GHz 频段实现了包括双频方向图可重构与单频率可重构在内的 4 种工作模式,从而能够根据不同场景灵活调整工作频段与辐射特性。基于丝网印刷工艺制作了天线实物,实测结果表明,在平面状态及曲率半径为 20 mm 的弯曲条件下,天线均能稳定工作,成功实现了预期的 4 种工作模式,各模式下的阻抗带宽均大于 20%,并满足可穿戴设备相关的电磁暴露安全标准。上述结果验证了天线设计的可行性与实用性,可为面向医疗与通信集成系统的小型化、多频可重构柔性天线设计提供指导。由于本研究聚焦于短期可穿戴应用,所选用的相纸基材及其制备工艺具有低成本特性,但材料在长期湿热或汗液浸润环境下可能发生性能变化,因此未对天线在长期使用中的稳定性展开系统测试。后续研究如拓展至长期可穿戴场景,可考虑采用表面封装或防水涂层等方式以提升其环境鲁棒性。

参考文献

- [1] DIAN F J, VAHIDNIA R, RAHMATI A. Wearables and the internet of things (IoT), applications, opportunities, and challenges: A survey [J]. IEEE Access, 2020, 8: 69200-69211.
- [2] LI S, XU L D, ZHAO S. 5G Internet of things: A survey [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2018, 10: 1-9.
- [3] POONGODI T, KRISHNAMURTHI R, INDRAKUMARI R, et al. Wearable devices and IoT [J]. A handbook of Internet of Things in Biomedical and Cyber Physical System, 2020: 245-273.
- [4] SURANTHA N, ATMAJA P, WICAKSONO M. A review

of wearable internet-of-things device for healthcare [J]. Procedia Computer Science, 2021, 179: 936-943.

- [5] YANG W D, CHENG X, GUO Z H, et al. Design, fabrication and applications of flexible RFID antennas based on printed electronic materials and technologies [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2023, 11(2): 406-425.
- [6] 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.
- SUN Y, LIU N Y, YU ZH W, et al. Research progress of flexible/stretchable antennas in wearable sensors based on NFC [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 122-137.
- [7] 杨文冬, 孙浩强, 南敬昌, 等. 小型化柔性印制天线: 材料、工艺及应用 [J]. 材料导报, 2023, 37(12): 24-36.
- YANG W D, SUN H Q, NAN J CH, et al. Printed miniaturized flexible antennas: Materials, processes and applications [J]. Materials Reports, 2023, 37(12): 24-36.
- [8] 徐锦鹏, 储昭俊, 李凯, 等. 柔性超宽带可穿戴陷波天线 [J]. 微波学报, 2019, 35(S1): 66-68.
- XU J P, CHU ZH J, LI K, et al. Flexible ultra-wideband wearable antenna with band-notch characteristic [J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(S1): 66-68.
- [9] 张众贺, 张斌珍. 一款基于表面改性和 MEMS 工艺的超宽带柔性天线 [J]. 现代电子技术, 2021, 44(17): 12-16.
- ZHANG ZH H, ZHANG B ZH. UWB flexible antenna based on surface modification and MEMS technology [J]. Modern Electronic Technique, 2021, 44(17): 12-16.
- [10] 杨国, 肖如奇, 沈飘飘, 等. 宽带多谐振偶极子天线设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(5): 136-142.
- YANG G, XIAO R Q, SHEN P P, et al. Design of wideband and multi-resonant dipole [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(5): 136-142.
- [11] 胡泽龙. 多频段柔性石墨烯基共形天线研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- HU Z L. Research on the flexible graphene-based multi-band conformal antenna [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.
- [12] 段雅琼, 金杰. 带有电磁带隙的 5 边分形多频可穿戴天线的研究 [J]. 南开大学学报 (自然科学版), 2021, 54(1): 85-88.
- DUAN Y Q, JIN J. Durer pentagon fractal antenna with EBG for multiband wearable applications [J]. Journal of

- Nankai University (Natural Science), 2021, 54(1): 85-88.
- [13] 王丽黎, 李君君, 张诗雨, 等. 加载人工磁导体的双频柔性可穿戴天线[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(9): 3637-3645.
- WANG L L, LI J J, ZHANG S H Y, et al. A dual-band flexible wearable antenna loaded with an artificial magnetic conductor [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(9): 3637-3645.
- [14] MUSA U, SHAH S M, MAJID H A, et al. Recent advancement of wearable reconfigurable antenna technologies: A review [J]. IEEE Access, 2022, 10: 121831-121863.
- [15] SINGH G, KANAUIA B K, PANDEY V K, et al. Hexa-band pattern reconfigurable antenna with defected ground plane [J]. International Journal of Electronics, 2021, 108(11): 1899-1913.
- [16] IBRAHIM A A, MOHAMED H A, ABDELGHANY M A, et al. Flexible and frequency reconfigurable CPW-fed monopole antenna with frequency selective surface for IoT applications [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 8409.
- [17] GAO G P, ZHANG B K, DONG J H, et al. A compact dual-mode pattern-reconfigurable wearable antenna for the 2.4-GHz WBAN application [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 71(2): 1901-1906.
- [18] DANG Q H, CHEN S J, NGUYEN-TRONG N, et al. Multifunctional reconfigurable wearable textile antennas using coplanar reconfiguration modules [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(5): 3806-3815.
- [19] ABUTARBOUSH H F, SHAMIM A. A reconfigurable inkjet-printed antenna on paper substrate for wireless applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(9): 1648-1651.
- [20] SAEED S M, BALANIS C A, BIRTCHER C R. Inkjet-printed flexible reconfigurable antenna for conformal WLAN/WiMAX wireless devices [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1979-1982.
- [21] PRUDHVI NADH B, MADHAV B, SIVA KUMAR M, et al. MEMS-based reconfigurable and flexible antenna for body-centric wearable applications [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2022, 36(10): 1389-1403.
- [22] BANDYOPADHYAY A, SARKAR P, GHATAK R. A bandwidth reconfigurable bandpass filter for ultrawideband and wideband applications [J]. IEEE Transactions on Circuits And Systems II: Express Briefs, 2022, 69(6): 2747-2751.
- [23] WANG Z, GE Y, PU J, et al. 1 bit electronically reconfigurable folded reflectarray antenna based on pin diodes for wide-angle beam-scanning applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(9): 6806-6810.
- [24] NAN J, ZHAO J, GAO M, et al. A compact 8-states frequency reconfigurable UWB antenna [J]. IEEE Access, 2021, 9: 144257-144263.
- [25] YANG W D, CHENG X, ZHAO X, et al. Flexible wearable tri-notched UWB antenna printed with silver conductive materials [J]. ACS Omega, 2024, 9(38): 39792-39803.

作者简介



杨文冬 (通信作者), 2019 年于英国赫瑞瓦特大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为柔性电子材料、印制光电/通信传输器件和微纳米结构表面化学。

E-mail: wendong_2007@163.com

Yang Wendong (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Heriot-Watt University in 2019. Now he is a professor at Liaoning Technical University. His main research interests include printed flexible electronic materials, printed optoelectronic/communication transmission devices, and surface and interface chemistry of micro/nano structures.



成曦, 2025 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 现为南京航空航天大学博士研究生, 主要研究方向为柔性印制天线和面向全息无线电的非相干全息术。

E-mail: xcheng0491@163.com

Cheng Xi received her M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2025. Now she is a Ph. D. candidate at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her main research interests include flexible printed antennas and incoherent holography for holographic radio.