



面向体表通信的透明柔性全向圆极化可重构天线

朱文进, 刘雄英, 范 艺

Transparent and flexible antenna with omnidirectional circular-polarization reconfigurability for on-body communications

ZHU Wenjin, LIU Xiongying, and FAN Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024113>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低剖面极化可重构超表面天线

Low-profile polarization reconfigurable metasurface antenna

电波科学学报. 2021, 36(6): 912–917

高增益圆极化双槽Vivaldi天线

A dual-slot Vivaldi antenna with high gain and circular polarization

电波科学学报. 2023, 38(3): 470–475

Ka频段宽带圆极化微带天线

Ka-band broadband circularly polarized microstrip antenna

电波科学学报. 2022, 37(6): 1073–1079

一种用于LoRa可穿戴设备的小型化双频段天线

Miniaturized dual band antenna for LoRa wearable devices

电波科学学报. 2019, 34(5): 582–589

一种新型双频双圆极化复合微带天线设计

Design of a new dual-band dual-circularly polarized composite microstrip antenna

电波科学学报. 2024, 39(2): 355–360

2.4 GHz宽带圆极化微带天线的研究与实现

Research and realization of 2.4 GHz wideband circularly polarized microstrip antennas

电波科学学报. 2019, 34(3): 380–389



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

朱文进, 刘雄英, 范艺. 面向体表通信的透明柔性全向圆极化可重构天线[J]. 电波科学学报, 2025, 40(2): 338-346. DOI: 10.12265/j.cjors.2024113
ZHU W J, LIU X Y, FAN Y. Transparent and flexible antenna with omnidirectional circular-polarization reconfigurability for on-body communications[J]. Chinese journal of radio science, 2025, 40(2): 338-346. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2024113

面向体表通信的透明柔性全向圆极化可重构天线

朱文进¹ 刘雄英¹ 范艺^{2*}

(1. 华南理工大学, 广州 510640; 2. 广东技术师范大学, 广州 510665)

摘 要 根据无线体域网体表通信的需求和复杂的人体表面应用场景, 结合介质谐振器和等效电流环, 提出了一款透明柔性的全向圆极化可穿戴天线, 并拓展了其圆极化可重构功能。圆柱形介质谐振器的 TM_{016} 模式和接地近似 L 形枝节上的环形电流分别产生电场的 E_θ 和 E_ϕ 分量, 两分量幅值相等、相位相差 90° , 实现了全向圆极化。天线的 -10 dB 阻抗带宽覆盖 5.8 GHz 的工业、科学和医用 (industrial, scientific and medical, ISM) 频段, 通过机械旋转可以在全向左旋圆极化和全向右旋圆极化间切换, 两状态下的轴比相对带宽分别为 10.9% 和 10.8% 。在 5.8 GHz 频点, 最大辐射方向 ($\theta = 50^\circ$ 面) 的 3 dB 轴比波束宽度达到了 360° 全覆盖。介质谐振器和接地枝节分别由聚二甲基硅氧烷和导电网格布构成, 在保证天线舒适性、透明性和隐蔽性的同时实现了 59% 的辐射效率和 2.6 dBic 的增益。利用 $3D$ 打印技术加工天线样本, 并通过测试验证了设计的合理性。

关键词 圆极化; 全向辐射; 可重构; 透明天线; 柔性天线; 可穿戴天线

中图分类号 TN828.4

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2025)02-0338-09

DOI 10.12265/j.cjors.2024113

Transparent and flexible antenna with omnidirectional circular-polarization reconfigurability for on-body communications

ZHU Wenjin¹ LIU Xiongying¹ FAN Yi^{2*}

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

Abstract Aiming at the requirements of on-body communications and complex on-body application scenarios in wireless body area network (WBAN), a transparent and flexible wearable antenna with omnidirectional circular polarization (CP) is developed, based on the dielectric resonator (DR) loaded with an equivalent current loop. And, the reconfiguration of CP is further implemented. Radiated electric field components of E_θ and E_ϕ are generated by the TM_{016} mode of the cylindrical DR and the loop current of the grounded L-shaped branches, respectively. Omnidirectional CPs are realized when the two components are equal in magnitude but differ in phase by 90° . The proposed antenna can be switched between left- and right-handed circularly polarized omnidirectional radiations through mechanical rotation, with -10 dB impedance bandwidth covering the 5.8 GHz industrial, scientific, and medical (ISM) band. The 3 dB axial ratio (AR) bandwidths at 5.8 GHz of two states are 10.9% and 10.8% , respectively. The DR and grounded branches are constructed of polydimethylsiloxane (PDMS) and conductive mesh fabric, respectively. The radiation efficiency of 59% and gain of 2.6 dBic are enabled, together with the advantages of comfort, transparency, and concealment. Furthermore, the 3 dB AR beamwidth in the $\theta = 50^\circ$ plane achieves a full coverage of 360° . Antenna prototypes were fabricated with the aid of $3D$ printing technology and the proposed design was verified through tests.

Keywords circular polarization; omnidirectional radiation; reconfiguration; transparent antenna; flexible antenna; wearable antenna

收稿日期: 2024-05-27

资助项目: 广东省数字孪生人重点实验室开放课题 (2022B1212010004); 国家自然科学基金 (61372008)

通信作者: 范艺 E-mail: fanyi@gpnu.edu.cn

0 引言

透明柔性的可穿戴天线具有高隐蔽性和舒适性,可以在最大程度上减小用户的心理负担,避免干扰其日常生活。天线的透明程度主要取决于导电材料的透明程度和天线结构。透明柔性可穿戴天线中,金属氧化物^[1]和导电网格布^[2-6]为常用的两类导电材料,单极子、偶极子、环天线及贴片天线为常用天线结构。目前已公开报道的透明柔性可穿戴天线在人体上都表现为定向辐射,仅支持体外通信。

可穿戴设备遍布人体多个部位,使得无线体域网系统节点增多,通过体表通信的方式加强设备间的协作性,可以在提高系统效率的同时避免拥堵损耗、减少信号干扰、降低系统功耗^[7],需要部署体表全向辐射天线。不同于各向同性天线,体表全向辐射天线辐射的电磁波主要沿平行于人体表面的方向,而垂直体表方向的辐射要尽量小。目前,可穿戴天线主要通过以下两种方式实现体表全向辐射:一种是利用纽扣形式的单极子产生全向垂直极化辐射^[8];另一种是激励圆形贴片或环形贴片的 TM_{01} 模式^[9]或矩形贴片的 TM_{00} 模式^[10]形成类似单极子的全向辐射。

在复杂的人体表面应用场景下,圆极化天线具有众多优势,尤其是能够避免线极化天线由于人体运动造成的极化失配,降低极化失配损耗。结合贴片天线的类单极子模式和 L 形槽的 $3\lambda/4$ 谐振模式,文献^[11]提出的柔性天线实现了 5.8 GHz 频段的全向圆极化辐射。结合单极子的全向垂直极化和等效电流环产生的平行极化,文献^[12]提出了一款全向圆极化的纽扣天线。

此外,可重构的可穿戴天线支持用一个天线实现多种不同的特性,有利于无线体域网系统提高集成度、提升通信容量和系统智能化^[13]。其中,由于左旋圆极化和右旋圆极化具有极化正交性,圆极化可重构天线利用极化匹配和极化隔离可实现灵活的多功能设计,具有广阔的应用前景。

本文针对无线体域网系统的体表通信应用场景和可穿戴天线佩戴在人体表面的隐蔽性和舒适性需求,提出了一款工作在 5.8 GHz 工业、科学和医用(industrial, scientific and medical, ISM) 频段的全向辐射透明柔性天线,实现了圆极化以尽量避免极化失配,拓展了圆极化可重构功能,以适应无线体域网系统的多功能和智能化发展趋势。

1 天线设计和原理

1.1 天线设计

两种状态的天线结构如图 1 所示,各参数具体取值见表 1。聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 构成圆柱形介质谐振器,其相对介电常数和损耗角正切分别为 2.65 和 0.02,实测透光率为 89.9%,利用直径 1 mm 的铜柱进行中心激励。为尽量提高天线整体的透明程度,选用六个近似 L 形的导电网格布枝节代替地板,每个枝节都由矩形枝节 1 和圆弧形枝节 2 构成,枝节呈中心对称关系,相邻枝节间隔 60° 。导电网格布由聚酯纤维、铜和镍制成,面电阻为 $0.05 \Omega/\text{sq}$,厚度为 0.1 mm,实测透光率约为 44.2%。

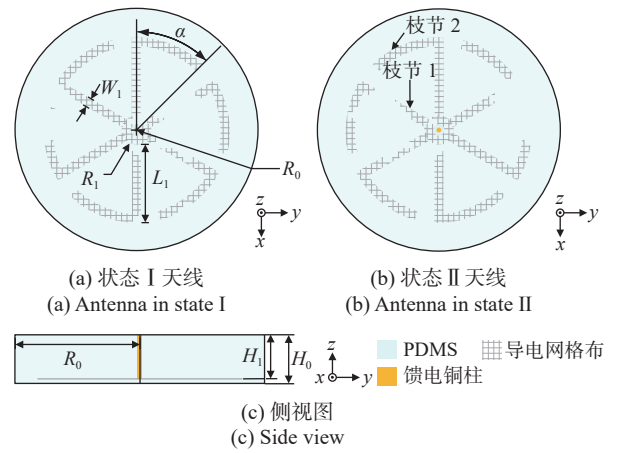


图 1 可重构天线的结构图

Fig. 1 Geometry of the reconfigurable antenna

表 1 可重构天线的结构参数

R_0	R_1	L_1	W_1	H_1	H_0	α
25 mm	3 mm	17.5 mm	2 mm	9 mm	10 mm	45°

1.2 设计原理

1.2.1 全向圆极化原理

本设计通过介质谐振器的全向垂直极化波和等效电流环的平行极化波叠加实现全向圆极化。

介质谐振器天线的辐射方向图由其谐振模式决定,利用铜柱进行中心馈电激励圆柱形介质谐振器的 TM_{01} 模式得到类似单极子天线的全向垂直极化辐射。根据圆柱形介质谐振器的工作原理,当其半径 a 和高度 H 满足 $0.33 \leq a/H \leq 5$ 时, TM_{01} 模式对应的波数 k_0 满足^[14]

$$k_0 a = \frac{\sqrt{3.83^2 + \left(\frac{\pi a}{2H}\right)^2}}{\sqrt{\epsilon_r + 2}} \quad (1)$$

式中, ε_r 为介质的相对介电常数。波数 k_0 与谐振频率 f_0 以及真空中光速 c 的关系满足

$$k_0 = \frac{2\pi f_0}{c} \quad (2)$$

将所设计天线的尺寸和介电常数代入式 (1), 再由式 (2) 计算得到谐振频率约为 5.2 GHz, 数值仿真结果表明天线工作在 5.8 GHz 附近。由图 2(a) 所示 yOz 面的电场分布可以看出, $t=0$ 时, E_ϕ 分量可相互抵消, 电场主要为介质谐振器产生的 E_θ 。

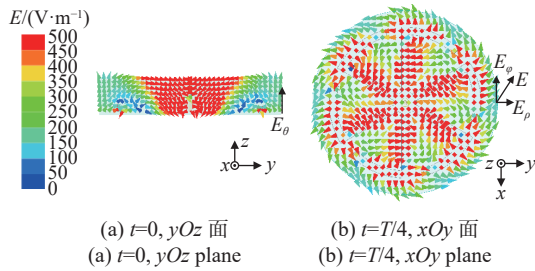


图 2 状态 I 天线 5.8 GHz 的电场分布

Fig. 2 Electric field distributions at 5.8 GHz of the antenna in state I

六个近似 L 形的枝节用以构建环形电流, 图 3 为 $t=T/4$ 时刻状态 I 天线的枝节表面电流分布, 枝节 1 的表面电流矢量可视为相互抵消, 枝节 2 表面电流都由枝节 1 的末端流向枝节 2 的末端, 六个枝节 2 的表面电流可等效为电流环。此时, xOy 面的电场分布见图 2(b), 电场矢量的方向主要为平行于 xOy 面的方向, 矢量可进一步分解为 E_ρ 分量和 E_ϕ 分量。其中, E_ρ 分量由介质谐振器产生, 而 E_ϕ 分量由等效电流环产生, 由于 E_ϕ 分量的存在, 电场呈现逆时针旋转。 E_θ 和 E_ϕ 两个电场分量正交, 且两电场相位相差 90° , 幅度相近, 进而叠加形成圆极化辐射。

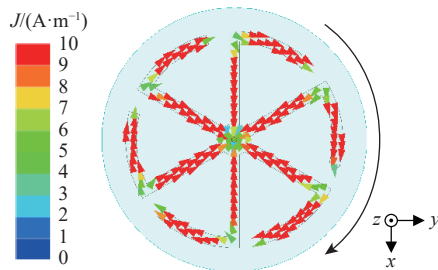


图 3 $t=T/4$ 状态 I 天线的环形电流分布

Fig. 3 Loop current distributions of the antenna in state I when $t=T/4$

以图 2 所示天线表面一点作为参考点, $t=0$ 时刻电场为 $+z$ 方向, $t=T/4$ 时刻电场为 $-x$ 方向, 而电磁波朝 $+y$ 方向辐射。因此, 电场矢量的方向随时间的

推移满足左手定则, 为左旋圆极化 (状态 I)。图 1(b) 所示的枝节旋向与状态 I 相反, 枝节表面电流和 $t=T/4$ 时刻的电场方向均与状态 I 相反, 电场在参考点为 $+x$ 方向, 电场矢量的方向随时间满足右手定则, 实现了右旋圆极化 (状态 II)。

1.2.2 结构参数分析

本文的数值分析结果来自 ANSYS 的 HFSS 2022 R1 版软件。模拟可穿戴天线的实际应用场景, 设置如图 4 所示的两种人体组织模型, 总尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 31.1 \text{ mm}$, 组织的电特性和厚度见表 2。

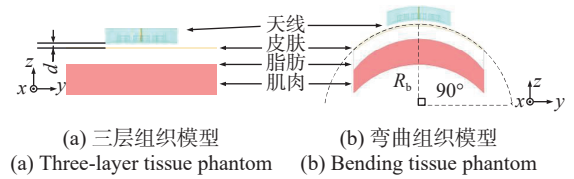


图 4 天线仿真环境

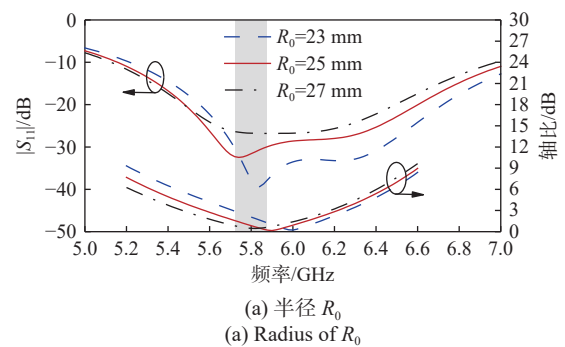
Fig. 4 Simulation environments of the antenna

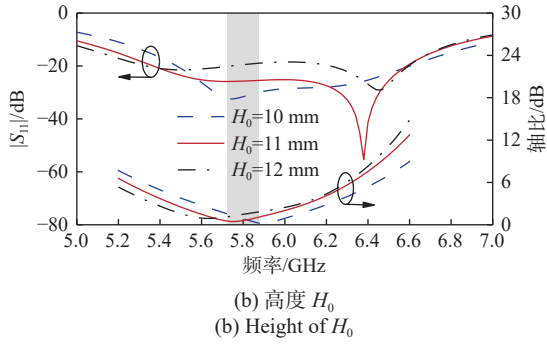
表 2 组织电特性和厚度

Tab. 2 Electrical characteristics and thickness of tissues

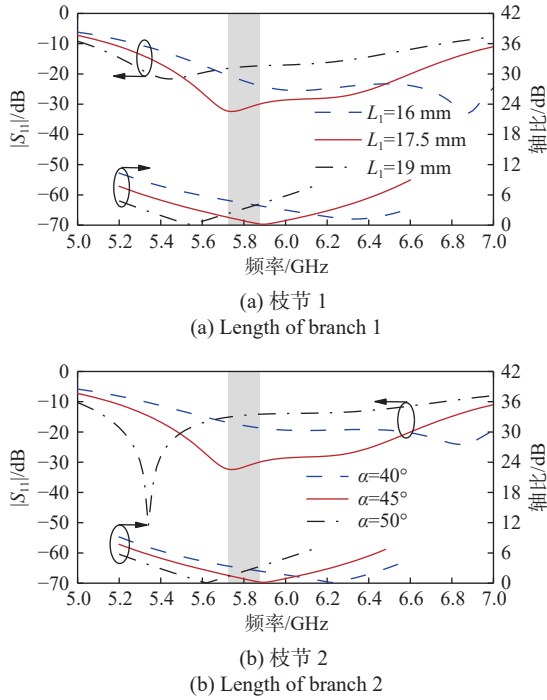
组织	相对介电常数 ε_r	电导率 $\sigma/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	厚度/mm
皮肤	35.11	3.72	1.3
脂肪	4.95	0.29	10
肌肉	48.49	4.96	20

由于两状态的天线结构相反, 以状态 I 的结构在三层组织模型上的仿真结果为例进行参数分析, 进一步阐述天线的设计原理。如图 5 所示, 天线的宽阻抗带宽是由两个谐振点组合而成, 低频为介质谐振器的 TM_{016} 模式谐振, 高频为等效电流环谐振。因此, 随着介质谐振器半径 R_0 和高度 H_0 的增加, 低频谐振点和轴比最低点向低频偏移, 较高的谐振点基本不变。



图 5 $|S_{11}|$ 和轴比随介质谐振器结构参数的变化Fig. 5 $|S_{11}|$ and AR vs. structural parameters of DR

枝节 1 和枝节 2 长度的增加均会增长等效电流环的电长度, 延长环电流路径, 因此随着枝节 1 的长度 L_1 和枝节 2 扫过的角度 α 的增大, 高频谐振点和轴比最低点均会明显向低频偏移, 如图 6 所示。

图 6 $|S_{11}|$ 和轴比随枝节结构参数的变化Fig. 6 $|S_{11}|$ and AR vs. structural parameters of branches

综上, 可以通过改变枝节 1 和 2 的尺寸来调整轴比最低点位置, 再通过介质谐振器的尺寸调整对轴比进行微调。

1.3 可重构机制

根据此天线的工作原理和中心对称的圆形结构, 利用图 7 所示的分层设计和机械旋转实现极化重构。天线由内外两部分组成, 为了描述方便, 拆分后分别命名为结构一和结构二, 枝节 1 和枝节 2 分别配置在结构一的下表面和结构二的内表面。同时, 结构一的下表面均匀分布有六个扇环形凹槽, 结构二的内表面均匀分布有六个扇环形的凸起, 凹槽

的深度和凸起的高度相等, 但凹槽的弧长略大于凸起的弧长, 弧长的差值确保了两结构嵌套后可以在一定范围内旋转。

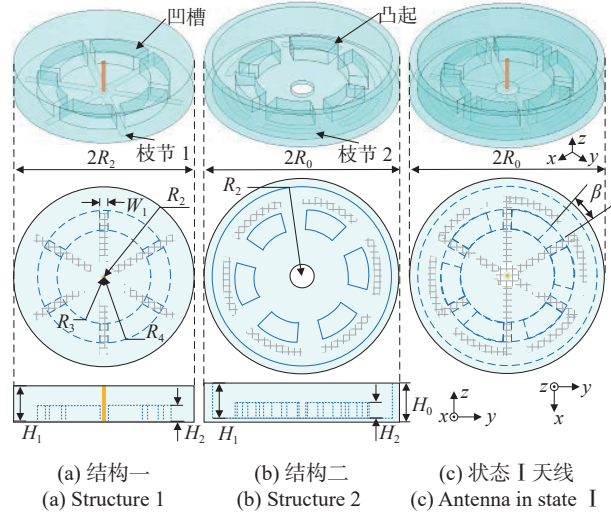


图 7 天线的可重构机制

Fig. 7 Reconfiguration mechanisms of the antenna

顺时针旋转结构一至最大范围或逆时针旋转结构二至最大范围, 枝节呈顺时针旋向, 如图 7(c) 所示, 理论上为左旋圆极化 (状态 I), 相反操作下, 枝节呈逆时针旋向, 理论上为右旋圆极化 (状态 II)。可重构结构的参数值为: $R_2 = 23$ mm, $R_3 = 12$ mm, $R_4 = 17$ mm, $H_2 = 4$ mm, $\beta = 15^\circ$ 。

2 天线性能评估

将图 7(c) 所示的带有六个空气槽的天线模型置于图 4(a) 的三层人体组织模型上评估天线在实际工作环境下的性能。天线的各项性能具体数据如表 3 所示。

表 3 天线在两种状态下的性能

Tab. 3 Characteristics of antenna in two states

性能指标	取值	
	状态 I	状态 II
-10 dB 阻抗带宽范围/GHz	5.20~7.08	5.19~7.08
相对阻抗带宽/%	30.6	30.8
3 dB 轴比覆盖范围/GHz	5.64~6.29	5.63~6.27
相对轴比带宽/%	10.9	10.8
极化方式	左旋圆极化	右旋圆极化
垂直面(xOz面)波束宽度/(°)	27.0	28.2
$\theta = 50^\circ$ 面波束宽度/(°)	360	360
增益/dBic	2.58	2.60
辐射效率/%	59	59

注: 波束宽度*指 3 dB 轴比波束和半功率波束同时覆盖的宽度。3 dB 轴比为 $\varphi = 0^\circ$ 、 $\theta = 50^\circ$ 处的轴比数据, 波束宽度、增益和效率都为 5.8 GHz 时的数据。

根据图8的仿真结果,天线在两状态下的性能基本一致, -10 dB 阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽都覆盖 5.8 GHz ISM 频段。图9对比了用传统金属铜和导电网格布作为枝节两种情况下的天线增益和辐射效率, 由于导电网格布的表面电阻较大, 用透明导电网格布构成枝节的天线增益和辐射效率也较低, 工作频段内的增益达到 2 dBic 以上, 辐射效率为 60% 左右。

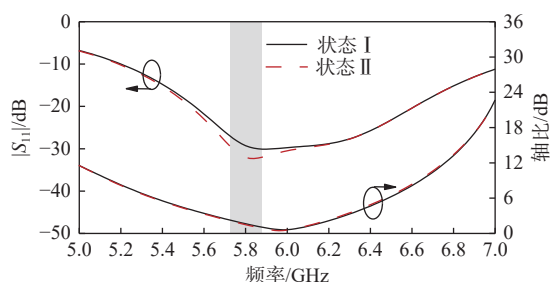


图8 天线的 $|S_{11}|$ 和轴比仿真结果

Fig. 8 Simulated $|S_{11}|$ and AR of the proposed antenna

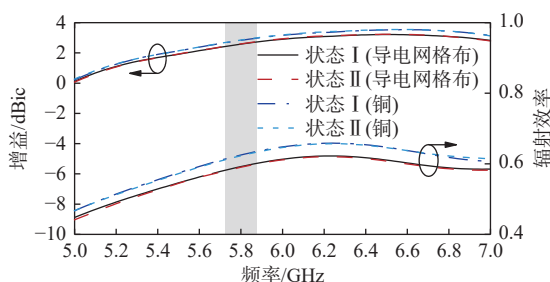


图9 天线的增益和辐射效率仿真结果

Fig. 9 Simulated gain and efficiency of the proposed antenna

可重构天线的增益辐射方向图展示在图10和图11中。两种状态下,垂直面方向图的主极化呈蝴蝶状,最大辐射方向为 $\theta = 50^\circ$,该方向上交叉极化较小。在 $\theta = 50^\circ$ 面可以观察到很好的全向圆极化辐射特性,整个面的交叉极化始终较小,主极化不存在辐射零点。具体地,天线在状态I下为全向左旋圆极化辐射,在状态II下为全向右旋圆极化辐射。

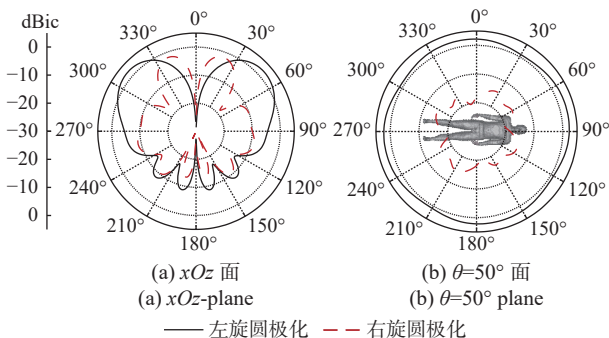


图10 状态I天线的增益辐射方向图仿真结果

Fig. 10 Simulated gain radiation patterns of the antenna in state I

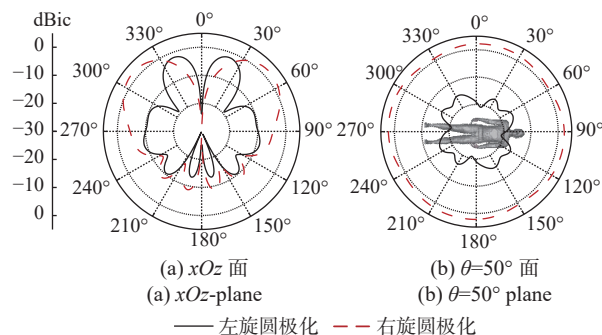


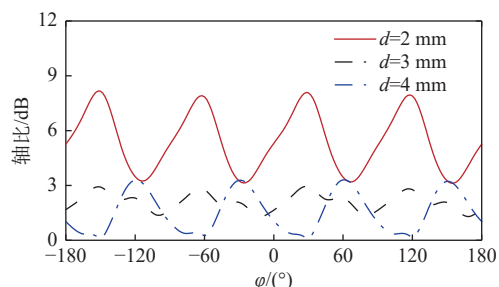
图11 状态II天线的增益辐射方向图仿真结果

Fig. 11 Simulated gain radiation patterns of the antenna in state II

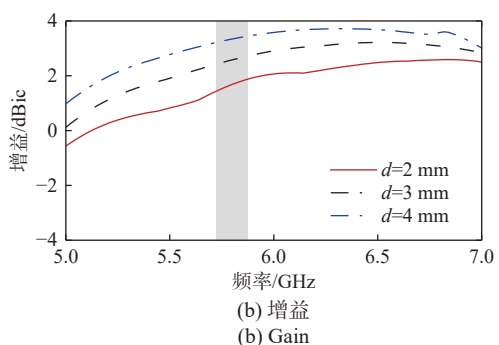
2.1 鲁棒性评估

人体运动等原因可能造成天线与人体距离变化。利用图4(a)所示模型,以状态I的天线为例,将距离 d 设置为2 mm、3 mm和4 mm来评估天线的鲁棒性。

从图12可以看出当天线和人体靠近时, $\theta = 50^\circ$ 面的轴比发生了恶化,天线增益降低,这主要是因为人体组织对电磁波存在一定的吸收和反射,且对垂直极化波和平行极化波的影响程度不同,但由于天线全向辐射,人体组织并不在天线的主辐射方向上,因此距离靠近时天线增益下降的幅度并不大。



(a) $\theta = 50^\circ$ 面的轴比
(a) Variation of AR in $\theta = 50^\circ$ plane



(b) 增益
(b) Gain

图12 天线对距离 d 的鲁棒性

Fig. 12 Robustness of the antenna against distance d

由于人的体表并非平面,柔性天线佩戴在人体表面可能会产生形变。采用图4(b)所示的模型,设置弯曲半径 R_b 为100 mm、75 mm和50 mm,分别模拟天线共形于前胸、大腿和手臂的情况。

根据图 13(a), 在弯曲状态下, 枝节的电长度基本不变, 介质谐振器的形状相对于其尺寸也只是发生了微小变化, 因此天线的谐振频率基本不变。从图 13(b) 可以看出天线弯曲时水平面的轴比在一些角度发生了严重恶化, 这是因为在弯曲状态下, 枝节 2 不再是平面, 其电流也同时具有了水平分量和竖直分量, 即在产生 E_θ 分量的同时也会产生 E_ϕ 分量, 且枝节各个部分的倾斜程度不同, 造成不同角度的轴比恶化程度也不同。

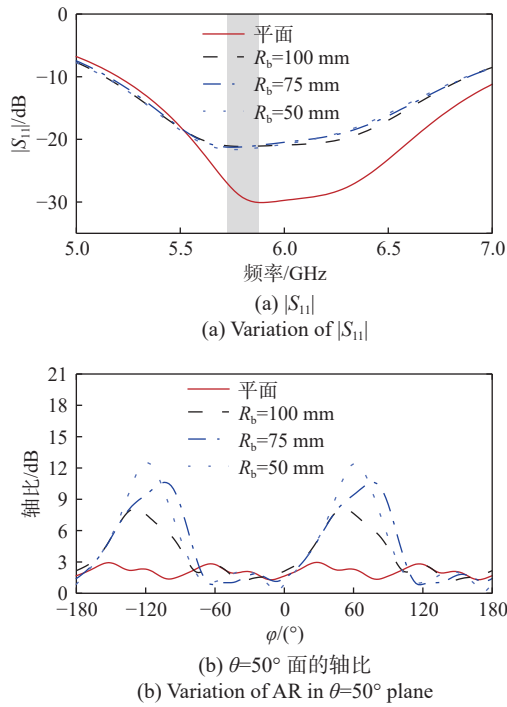


图 13 天线应对弯曲的鲁棒性

Fig. 13 Robustness of the antenna against bending

2.2 辐射安全性评估

输入功率设置为 20 mW, 天线和人体组织的距离为 3 mm, 通过比吸收率 (specific absorption rate, SAR) 评估天线的辐射安全性。图 14 以状态 I 为例展示了天线在 5.8 GHz 的平均组织 SAR 分布。天线在两状态下, 在 5.8 GHz 的 10 g SAR 和 1 g SAR 如表 4 所示。最大输入功率分别为 586.5 mW 和 29.3 mW, 不超过相应的国际通用 SAR 标准。

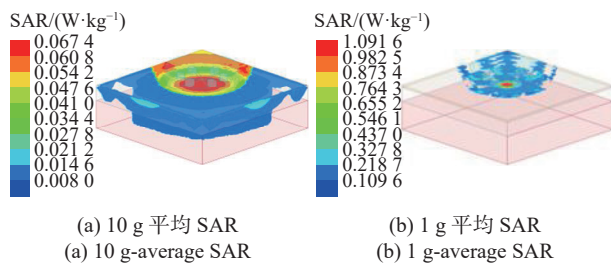


图 14 状态 I 天线的 SAR 分布

Fig. 14 SAR distributions of the antenna in state I

表 4 天线在两种状态下的 SAR

Tab. 4 SAR of antenna in two states

SAR	状态 I	状态 II
10 g 平均 SAR	0.067 4 W/kg	0.068 2 W/kg
1 g 平均 SAR	1.091 6 W/kg	1.087 4 W/kg

3 天线加工和测试

3.1 天线加工

天线设计为嵌套结构, 加工流程主要包含 3D 打印模具、PDMS 制备以及天线组装等。具体步骤为: 1) 使用 Prusa i3 MK3S 型号 3D 打印机和环保耗材聚乳酸打印模具, 对模具表面进行后处理以方便 PDMS 脱模; 2) 以 10:1 的质量比混合 PDMS 基料和固化剂, 充分搅拌并除气后将混合物分次倒入模具中并加热固化, 固化完成后将 PDMS 从模具中剥离; 3) 采用半固化的 PDMS 将导电网格布粘合在相应结构的 PDMS 表面并加热固化, SMA 接头的外导体与枝节 1 用环氧导电胶相连, 内导体焊接有铜柱并被置于结构一的 PDMS 中心。

各步骤成品如图 15 所示。组装两结构可得图 16(a) 的状态 I 天线结构, 通过机械旋转可切换至图 16(b) 的状态 II。实际应用中, 机械旋转可用舵机驱动实现, 由于 PDMS 表面存在一定粘性, 需在两结构接触的表面涂覆润滑剂实现切换。

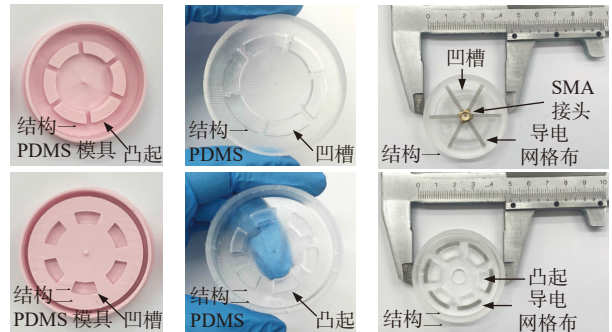


图 15 天线的加工过程

Fig. 15 Process of antenna fabrication

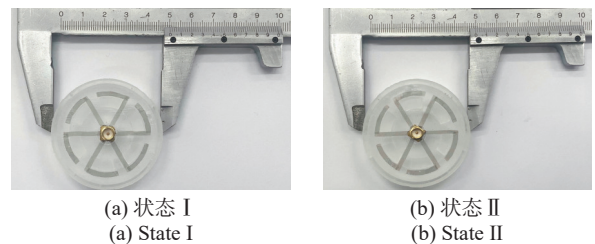


图 16 可重构天线样本

Fig. 16 Prototypes of the reconfigurable antenna

3.2 天线测试

3.2.1 反射系数测试

如图 17 所示,通过 Agilent N5230A 矢量网络分析仪测试了天线佩戴在志愿者前胸、手臂及大腿三个部位的反射系数。

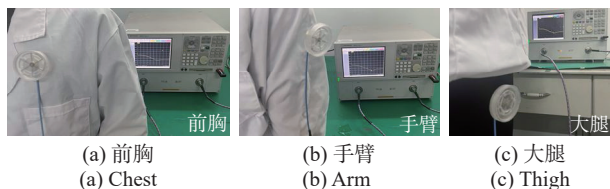


图 17 反射系数测试环境

Fig. 17 Measurement setup of reflection coefficient test

根据图 18 的测试结果,天线样本的实测 $|S_{11}|$ 覆盖 5.8 GHz ISM 频段,阻抗匹配出现恶化,但是在人体各个部位的测试结果较为吻合。实测与仿真的差异主要来源于加工误差,一方面,根据图 6 的参数分析,枝节长度的变化会对天线匹配产生显著影响;另一方面,用于连接电网格布和 SMA 的环氧导电胶体积电阻较大,可能会影响阻抗匹配。

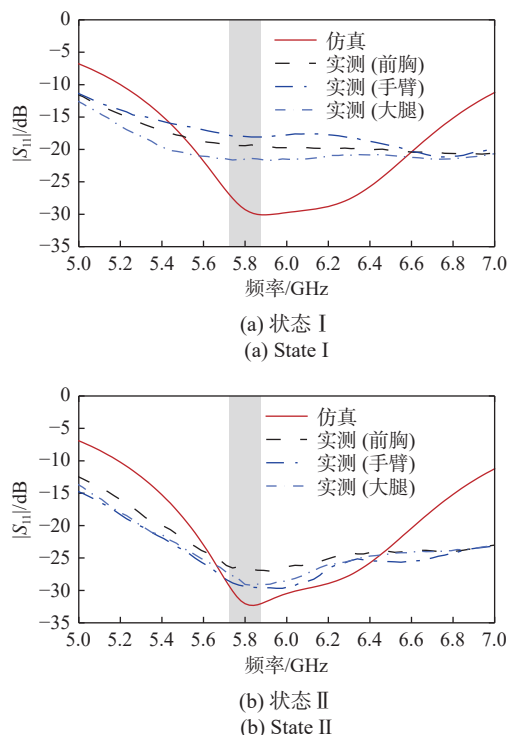


图 18 天线样本的实测 $|S_{11}|$

Fig. 18 Measured $|S_{11}|$ of the antenna sample

3.2.2 远场性能测试

通过 Satimo StarLab 系统测试并计算得到天线的远场性能。设置了图 19 所示的两种测试环境以模拟实际应用场景,新鲜猪肉盒子尺寸为 100 mm×100 mm×40 mm,用以模拟平面情况,圆柱形容器半径为 50 mm,用以模拟天线弯曲的情况。

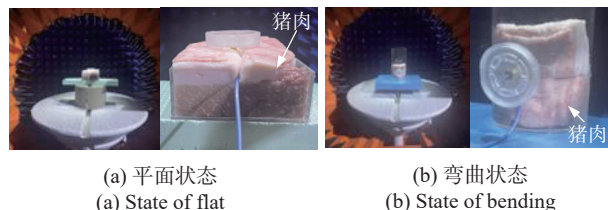


图 19 远场性能测试环境

Fig. 19 Environment of far-field performance test

如图 20 所示,天线样本的实测效率和增益都较为平稳,但相比仿真都有所下降,原因在于仿真环境为理想真空,而实测存在来自各方面的损耗。

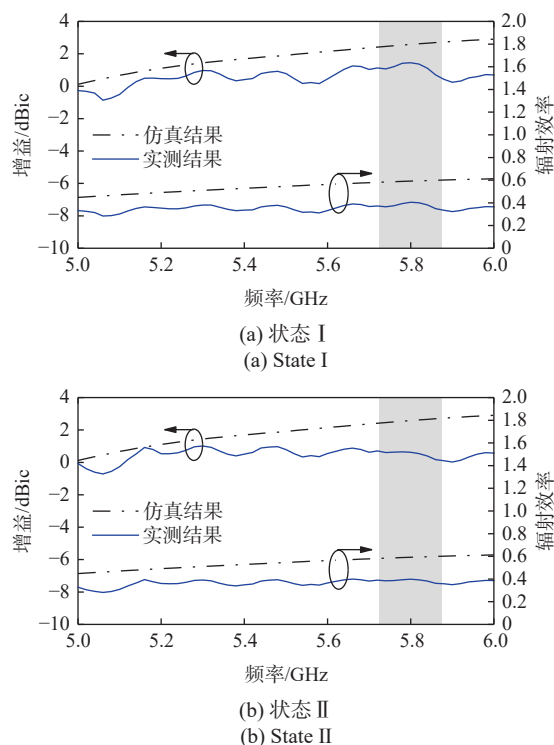


图 20 天线样本的实测增益和辐射效率

Fig. 20 Measured gain and radiation efficiency of the antenna sample

从图 21 和图 22 的 5.8 GHz 方向图测试结果也可以看出,实测结果与仿真趋势一致,辐射增益略有下降且交叉极化略有增大。增益下降和交叉极化增大的原因主要归于天线测试环境与仿真环境的差异和手工制作的天线样本存在的误差。由于垂直面方向图在原本最大辐射方向上出现了凹陷,选择了更靠近人体表面的 $\theta = 70^\circ$ 面进行观测,见图 22。根据测试结果,天线在状态 I 和状态 II 下分别表现出了全向左旋圆极化辐射和全向右旋圆极化辐射。

为了更全面地衡量天线的全向圆极化性能,图 23 给出了两状态下天线的垂直面和水平面轴比波束的实测结果。仿真的垂直面轴比波束宽度较窄,由于受到各方面干扰和加工、测试误差的影响,实测的垂直面轴比波束呈现为多个窄波束,但根据

图 23(b) 所示的水平面轴比波束图, 天线在两种状态下, 尤其是状态 I 下, 整个水平面内的轴比均低于 6 dB, 有良好的全向圆极化性能。

天线在弯曲情况下的实测垂直面辐射方向图见图 24, 趋势与仿真大体一致, 但增益明显降低且方向图表现出不对称性, 可以预测天线的全向性和圆极化也存在一定恶化。这主要是因为天线的剖面较高, 在较大的外力作用下才能弯曲, 采用的馈电接头使得天线无法很好地共形在圆柱面上, 因此天线在弯曲的情况下还存在一些不对称的形变, 而全向圆极化的实现要求天线结构有良好的对称性, 但是弯曲情况下的仿真和测试结果仍可以为所提天线后续的共形设计提供参考。

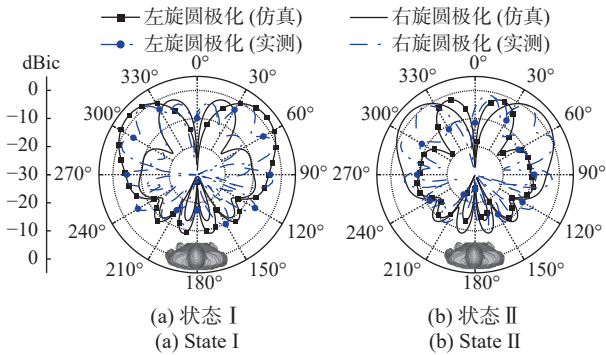


图 21 天线样本的实测 xOz 面增益辐射方向图

Fig. 21 Measured gain radiation patterns in xOz -plane of the antenna sample

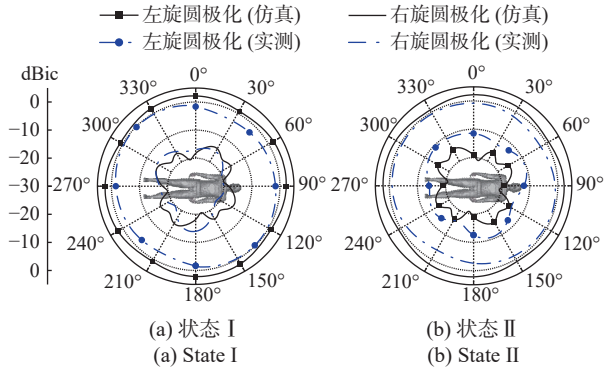


图 22 天线样本的实测 $\theta=70^\circ$ 面增益辐射方向图

Fig. 22 Measured gain radiation patterns in $\theta=70^\circ$ plane of the antenna sample

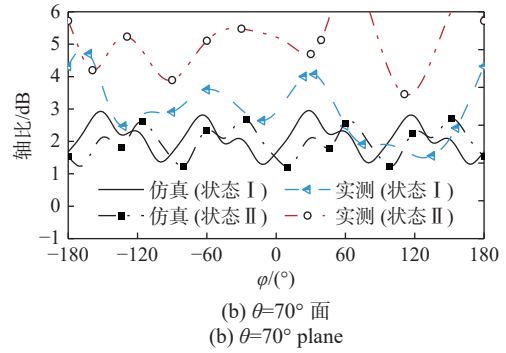
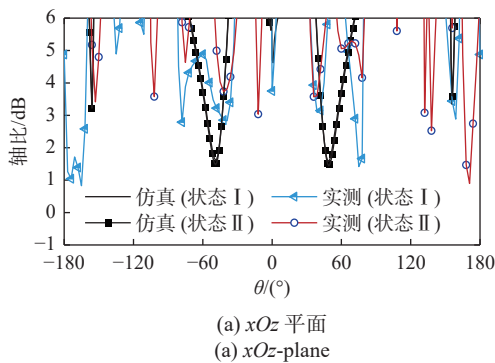


图 23 天线样本的实测轴比波束

Fig. 23 Measured AR beams of the antenna prototype

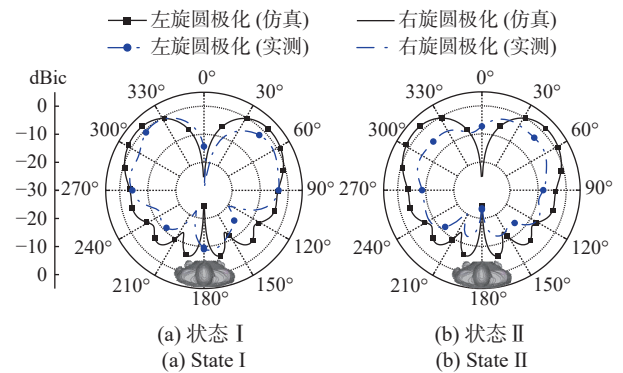


图 24 弯曲天线的实测增益辐射方向图

Fig. 24 Measured gain radiation patterns of the bent antenna

4 结 论

本文通过组合介质谐振器的全向垂直极化辐射和等效电流环的全向平行极化辐射实现全向圆极化的辐射特性, 并在此基础上将天线结构设计为嵌套的两部分, 利用机械旋转切换圆极化旋向。借助 3D 打印技术, 利用透明材料制作了天线样本并成功验证了天线的全向圆极化特性和可重构设计的可行性。测试结果表明天线能够在全向左旋圆极化和全向右旋圆极化间切换, 且两状态的工作频率都覆盖 5.8 GHz ISM 频段。

由于本工作是透明柔性可穿戴天线中唯一的全向圆极化天线, 因此表 5 将本工作与现有的体表通信可穿戴天线进行比较。其中, 仅有文献 [11] 和 [12] 实现了全向圆极化, 本文所提天线具有较宽的阻抗带宽, 更能应对复杂人体表面应用中可能产生的频偏问题, 且仅有此工作考虑了圆极化可重构, 结合现有方向图可重构天线研究, 能更好地适应未来无线体域网的多功能和智能化需求。

表 5 体表通信天线对比

Tab. 5 Comparison with previously reported on-body antennas

文献	工作频点/GHz	-10 dB阻抗带宽/%	辐射模式	极化方式	峰值增益/dBi	可重构	柔性	透明性
[8]	2.45, 5.8	7, 52	全向, 定向	线极化, 圆极化	2.2, 8.6	-	纽扣天线	-
[9]	2.45/2.45	1.02/1.02	定向/全向	线极化/线极化	-2.6/3.5	方向图	柔性	-
	2.45/2.45	1.47/1.39	定向/全向	线极化/线极化	-2.5/6.0	方向图	柔性	-
[10]	2.4	3.8	定向/全向	线极化/线极化	-4.25/3.86	方向图	半柔性	-
[11]	2.45, 5.8	10, 9	全向, 全向	线极化, 圆极化	-5.1, 3.3	-	柔性	-
[12]	5	3.97	全向	圆极化	2.1	-	纽扣天线	-
本文	5.8/5.8	30.6/30.8	全向/全向	左/右旋圆极化	3.1/2.1	极化	柔性	透明

参考文献

- [1] HONG S, KANG S H, KIM Y, et al. Transparent and flexible antenna for wearable glasses applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2016, 64(7): 2797-2804.
- [2] QIU H, LIU H, JIA X, et al. Compact, flexible, and transparent antennas based on embedded metallic mesh for wearable devices in 5G wireless network[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2020, 69(4): 1864-1873.
- [3] 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.
- [4] SAYEM A S M, SIMORANGKIR R B V B, ESSELLE K P, et al. A method to develop flexible robust optically transparent unidirectional antennas utilizing pure water, PDMS, and transparent conductive mesh[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2020, 68(10): 6943-6952.
- [5] SAYEM A S M, SIMORANGKIR R B V B, ESSELLE K P, et al. Flexible and transparent circularly polarized patch antenna for reliable unobtrusive wearable wireless communications[J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 1276.
- [6] SIMORANGKIR R B V B, GAWADE D R, HANNON T, et al. Transparent epidermal antenna for unobtrusive human-centric internet of things applications[J]. *IEEE Internet of Things journal*, 2024, 11(1): 1164-1174.
- [7] RAHMAN M O, HONG C S, LEE S, et al. ATLAS: A traffic load aware sensor MAC design for collaborative body area sensor networks[J]. *Sensors*, 2011, 11(12): 11560-11580.
- [8] YIN X, CHEN S J, FUMEAUX C. Wearable dual-band dual-polarization button antenna for WBAN applications[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2020, 19(12): 2240-2244.
- [9] SUN H, HU Y, REN R, et al. Design of pattern-reconfigurable wearable antennas for body-centric communications[J]. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 2020, 19(8): 1385-1389.
- [10] 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.
- [11] BHATTACHARJEE S, MAITY S, CHAUDHURI S R B, et al. A compact dual-band dual-polarized omnidirectional antenna for on-body applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2019, 67(8): 5044-5053.
- [12] HU X, YAN S, ZHANG J, et al. Omni-directional circularly polarized button antenna for 5 GHz WBAN applications[J]. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 2021, 69(8): 5054-5059.
- [13] 吴凡, 陆贵文. 磁电偶极子天线的极化可重构研究[J]. *电波科学学报*, 2018, 33(3): 287-292.
- WU F, LUK K M. Developments on polarization reconfigurable magneto-electric dipole antennas[J]. *Chinese journal of radio science*, 2018, 33(3): 287-292. (in Chinese)
- [14] MONGIA R K, BHARTIA P. Dielectric resonator antennas: a review and general design relations for resonant frequency and bandwidth[J]. *International journal of microwave and millimeter-wave computer-aided engineering*, 1994, 4(3): 230-247.

作者简介

朱文进 (1998—), 女, 浙江人, 华南理工大学电子与信息学院硕士研究生, 研究方向为可重构可穿戴天线。E-mail: eezhuwenjin@mail.scut.edu.cn

刘雄英 (1975—), 男, 内蒙古人, 华南理工大学电子与信息学院教授, 博士生导师, 研究方向为可穿戴人体天线、植入式天线等。E-mail: liuxy@scut.edu.cn

范艺 (1976—), 女, 广西人, 广东技术师范大学电子与信息学院教师, 博士, 研究方向为可穿戴天线和可重构天线。E-mail: fanyi@gpnu.edu.cn