

文章编号: 2095-4980(2022)08-0843-06

## 基于 PDMS 嵌入式超宽带天线设计

刘 阔, 郑宏兴\*, 刘瑞鹏, 王蒙军

(河北工业大学 电子信息工程学院, 天津 300401)

**摘 要:** 设计了一种以柔性材料聚二甲基硅氧烷(PDMS)为介质基片的超宽带(UWB)天线, 其辐射单元由矩形和半圆环金属贴片组成, 两部分结构由带状贴片连接, 采用共面波导方式馈电。上述金属贴片嵌入在 PDMS 基片中间, 用于人体通信的可穿戴系统。利用嵌入式结构, 有效提高了天线的柔韧性和耐用性。为了更好地模拟天线在人体表面的工作环境, 构建了包括皮肤、脂肪和肌肉的三层人体组织模型, 满足人体安全的国际标准的最大天线比吸收率值为 16.4 mW。最后对天线样品进行测试, 结果表明天线总体性能稳定, 阻抗带宽为 5.39–10.33 GHz, 实现了在医学机构使用的频段(5.725–5.875 GHz)要求。

**关键词:** 可穿戴天线; 超宽带; 聚二甲基硅氧烷; 嵌入式结构

**中图分类号:** TN82

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2020372

## Design of Ultra-Wideband antenna based on PDMS embedded structure

LIU Kuo, ZHENG Hongxing\*, LIU Ruipeng, WANG Mengjun

(School of Electronics and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** An Ultra-Wide-Band(UWB) antenna with flexible material Polydimethylsiloxane(PDMS) as the dielectric substrate is designed. Its radiating element is composed of rectangular and semi-circular metal patches. The two-part structure is connected by a strip patch. The coplanar waveguide feeding method is adopted for the antenna. The above-mentioned metal patch is embedded inside the middle of the PDMS substrates; and this antenna can be used in a wearable system for human body communication. The embedded structure can effectively improve the flexibility and durability of the antenna. In order to better simulate the working environment of the antenna on human body, a three-layer human body tissue model including skin, fat and muscle is constructed. The maximum antenna specific absorption rate is 16.4mW that meets the international standards for human safety. Finally, the antenna samples are tested, and the results show that the overall performance of the antenna is stable, and the impedance bandwidth is 5.39–10.33 GHz, which meets the requirements of medical band(5.725–5.875 GHz).

**Keywords:** wearable antenna; Ultra-Wide-Band(UWB); Polydimethylsiloxane(PDMS)

无线通信与物联网普及到人们日常生活的各个领域, 随着人们对无线人体局域网(Wireless Body Area Network, WBAN)技术在工业、科技与医疗方面的应用越来越重视, 技术进步与市场需求带动了 WBAN 的快速发展, 对可穿戴天线的研究也越来越深入<sup>[1-2]</sup>。可穿戴天线是 WBAN 系统的基本组成部分, 所以它的设计是无线人体局域网构建中重要一环<sup>[3]</sup>, 在工业、科技与医疗方面的应用频段包括 433~434.8 MHz, 902~928 MHz, 2.4~2.48 GHz, 5.725~5.875 GHz。在 2020 年爆发的新型冠状病毒疫情中, 由于病毒具有很强的传染性, 需要保证医护人员与感染者保持一定的安全距离, 同时能够实时监测病人的健康信息, 无线可穿戴设备在这种情况下可以发挥重要的作用, 所以设计一款可用于医疗服务的 5.725~5.875 GHz 频段的可穿戴天线非常必要。用于医疗服务设备的可穿戴天线必须满足质量轻, 柔韧性强, 安全性高等特点, 因此对介质基板的选择提出了很大的挑战<sup>[4-5]</sup>。聚二甲基硅氧烷(PDMS)是一种价格便宜, 化学稳定性高, 耐用性好的有机高分子材料<sup>[6-8]</sup>, 可以用作柔性材料集成到衣服上, 完全满足可穿戴天线的设计需求<sup>[9-11]</sup>。可穿戴天线工作在人体表面附近, 减少电磁波对人体的辐射伤害以提高天线的安全性至关重要

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61671200); 河北省自然科学基金重点资助项目(F2017202283)

\*通信作者: 郑宏兴 email:hxzheng@126.com

要。为了适应系统多个频段工作，所设计的天线满足超宽带(UWB)工作的特点。UWB是一种短程通信系统，其定义为工作带宽超过 1.5 GHz 或相对带宽不少于其工作频段的 25% 的通信系统<sup>[12]</sup>。与其他窄带系统相比，在低速或中速率数据传输中 UWB 天线的辐射功率非常低，可以降低天线对人体的辐射强度，从而提高天线的安全性能。

### 1 天线结构设计

相对于其他柔性材料，PDMS 材料具有与人体生物相容性佳和耐用性好的显著优势，其介电常数  $\epsilon_r=2.7$ ，损耗正切  $\tan\delta=0.04$ ，但材料本身与金属材料的黏合性低，不能用普通的微带天线结构进行设计，因此设计天线采用了嵌入式结构。天线由上下两层 PDMS 基板、接地面以及辐射单元构成，上层基板厚度为 1 mm，下层基板厚度为 2 mm，采用了共面波导的馈电方式，接地面与辐射贴片在同一层以便于更好地嵌入 PDMS 中，相对于文献 [13] 中所提到的 5 层嵌入式结构更简单且易于加工。

为了在实现超宽带的同时尽可能减小天线的尺寸，主体辐射贴片采用了半圆形结构，并且在天线的下方增加矩形结构以降低天线在医疗服务 5.725~5.875 GHz 频段的阻抗失配程度，两部分结构通过带状线相连，并且通过在矩形贴片上再增加两个小矩形贴片，开槽处理，以及在带状线的底部切去了两个小矩形的的设计方法，改变天线的有效电流路径，以改善天线的阻抗匹配。天线的设计过程分别为 A,B,C,D 四阶段，图 1(a) 为天线所设计各个阶段考虑的因素，灰色为天线辐射金属贴片，图 1(b) 为各设计阶段天线的反射系数  $S_{11}$ 。从图中可以看出，在 B 阶段，通过在下半部分矩形结构上增加两个小的矩形贴片，拓宽天线的工作带宽，进一步在 C 阶段采用缝隙加载技术，在矩形贴片上进行开槽处理，使天线中心频率的反射系数  $S_{11}$  达到 -34.83 dB，改善了天线的阻抗匹配，但是其工作带宽没有实现超宽带性能，为了拓宽工作频段以达到超宽带目的；在 D 阶段，采用了在天线的带状线末端外侧的对称位置切去两个矩形的的方法，天线的最终阻抗匹配带宽达到 5.25~10.54 GHz，其在工作频段 5.725~5.875 GHz 的中心频率 5.8 GHz 反射系数为 -26.20 dB，所设计的可穿戴天线实现了应用于医疗领域的超宽带的性能。

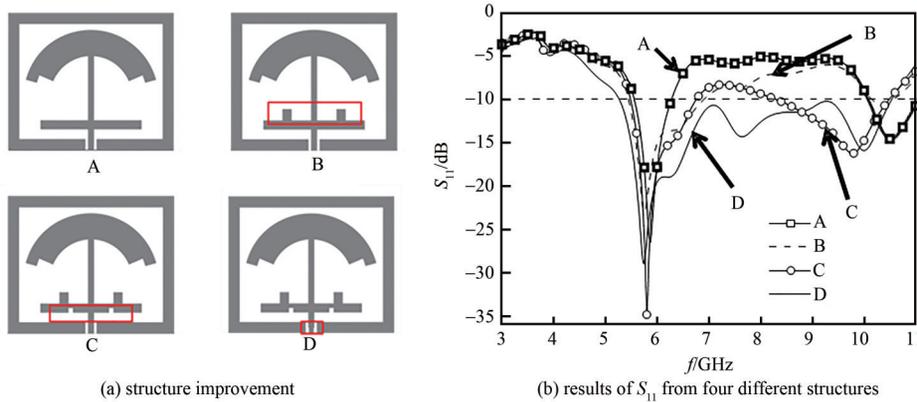


Fig.1 Effect of antenna structure on  $S_{11}$   
图 1 天线结构变化对  $S_{11}$  的影响

通过对天线结构设计以及性能的仿真验证，最终确定天线结构如图 2 所示，灰色部分为辐射铜片，白色部分为 PDMS 介质基板，天线的整体尺寸为 66 mm×80 mm，结构简单，采用了三层嵌入式结构，在实现超宽带的同时降低了天线的加工难度，天线结构具体尺寸参数如表 1 所示。

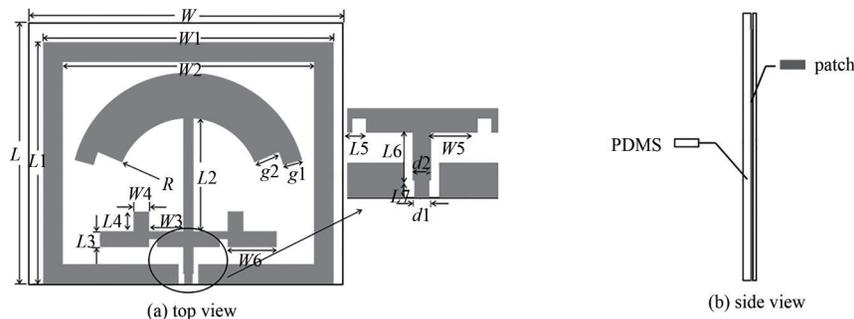


Fig.2 Structure of the antenna array  
图 2 天线结构

表 1 天线尺寸(单位:mm)

Table 1 Dimension of the proposed antenna(unit: mm)

$W$	$L$	$W1$	$L1$	$W2$	$L2$	$R$	$g1$	$g2$	$W3$	$L3$
66	80	74	61	64	28.5	18.3	5	6.7	10	4
$W4$	$L4$	$W5$	$L5$	$W6$	$L6$	$L7$	$d1$	$d2$	$h1$	$h2$
4	5	8	2	11.2	6.8	2.5	2.1	2.6	2	1

## 2 仿真与结果分析

### 2.1 弯曲对天线的性能影响

在可穿戴天线应用的过程中,弯曲是最常遇到的问题,在不同的弯曲情况下其性能是否稳定,是验证天线能否在实际中应用的重要条件。图 3 仿真了不同弯曲半径  $R_f$  下  $S_{11}$  变化情况。在弯曲半径  $R_f=150$  mm 时,工作频率 5.8 GHz 的反射系数为 -24.19 dB,天线带宽 5.29~10.64 GHz;弯曲半径  $R_f=100$  mm 时,工作频率 5.8 GHz 的反射系数为 -30.59 dB,天线带宽为 5.42~10.73 GHz;在弯曲半径  $R_f=50$  mm 时,工作频率 5.8 GHz 的反射系数为 -23.32 dB,天线带宽为 5.45~10.72 GHz。由结果可知,不同的弯曲程度会对天线造成一定影响,但是其带宽相对稳定,天线依旧可以正常工作。

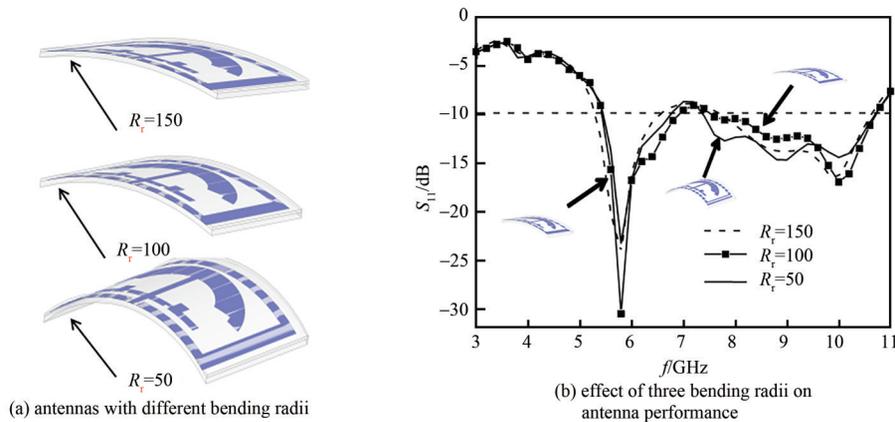


Fig.3 Effects on antenna under different bending radii

图 3 不同弯曲半径下对天线性能的影响

### 2.2 人体表面对天线性能的影响

可穿戴天线工作在人体表面附近,而人体的不同组织具有不同的电磁特性,会影响天线的工作性能<sup>[14-15]</sup>,因此有必要研究人体的电磁特性并建立相应的人体模型。为了模拟所设计的天线在人体表面的工作状态,用高频仿真软件(HFSS)建立三层人体组织模型,如图 4 所示,从上到下依次为皮肤、皮下脂肪和肌肉组织,厚度分别为 1 mm, 2 mm 和 10 mm。模型总尺寸设定为 80 mm×90 mm×13 mm。所设计的天线放在人体模型上进行仿真,人体各部分组织在 5.8 GHz 下电磁参数见表 2<sup>[10]</sup>。考虑在实际情况中天线并不是直接放在皮肤表面,而是有一定的距离,所以分别对天线与人体表面的距离  $h_s$  为 3~5 mm 的情况进行分析,仿真结果如图 5 所示。可以看出,当天线位于人体组织模型上方时,天线性能会受到一定影响,随着距离的增加,带宽有所改善,这可能是由于天线与人体耦合的影响。从图中的结果可以看出,  $h_s$  在 3~5 mm 范围,天线的宽带特性良好,这个距离范围与天线在医疗防护服上使用的真实距离相近。

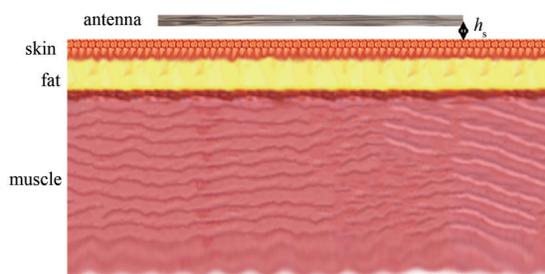


Fig.4 Diagram of antenna working on the surface of the human body

图 4 天线工作在人体表面示意图

表2 人体组织在 5.8 GHz 下电磁参数

Table2 Electromagnetic parameters of human tissue at 5.8 GHz

parameter	skin	fat	muscle
permittivity( $\epsilon_r$ )	35.114	4.954 9	48.485
conductivity/(S/m)	0.320 87	0.183 35	0.317 50
loss tangent( $\tan \delta$ )	0.31	0.23	0.29

比吸收率(Specific Absorption Rate, SAR)是描述天线辐射安全性的参数,单位为 W/kg。为了测试天线应用到人体周围是否安全,对它在人体皮肤表面的 SAR 值进行了测试,结果符合国际规定的小于 2.0 W/kg,最大输入功率为 16.4 mW,图 6 为输入功率为 16.4 mW 时的 SAR 值。

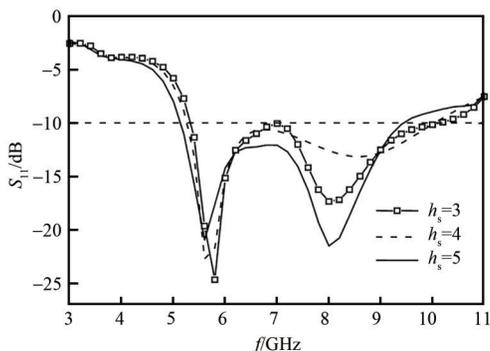


Fig.5 Effect of working on the surface of the human body on the antenna

图5 工作于人体表面对天线性能的影响

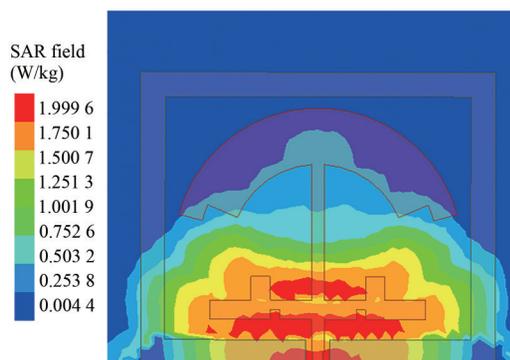


Fig.6 SAR value of antenna

图6 天线的 SAR 值

### 3 实验结果分析

为了测试所设计天线的性能,加工制作的天线实物如图 7 所示。使用安捷伦矢量网络分析仪 N5244A 以及微波暗室对天线样品进行了实验。图 8 为把天线放在志愿者的手臂上进行测试场景,图 9 为所测得的反射系数  $S_{11}$ 。结果显示所设计天线样品的实际工作带宽为 5.39~10.33 GHz,满足设计要求,并且在 5.8 GHz 附近的反射系数为 -22.15 dB,便于对比,仿真结果也在图中给出,与实测结果有很好的 consistency,中心频率、带宽均满足实用要求。为测试实际辐射性能,把天线独立放置在本校的微波暗室进行测试,图 10 为天线在 5.8 GHz, 7.5 GHz 和 10 GHz 频率处的方向图测试结果,可以看出天线具有良好的辐射特性,满足超宽带辐射性能需求。



Fig.7 Photograph of the antenna

图7 天线的实物图

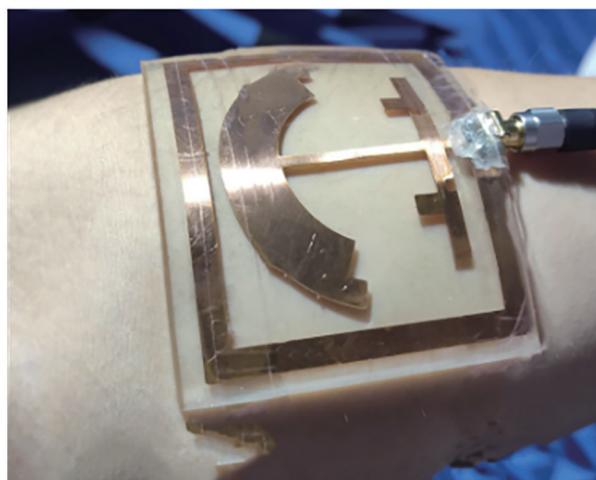


Fig.8 Antenna on the surface of human body

图8 天线工作于人体表面(小臂)

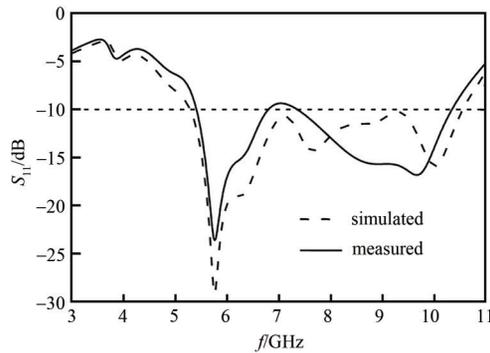
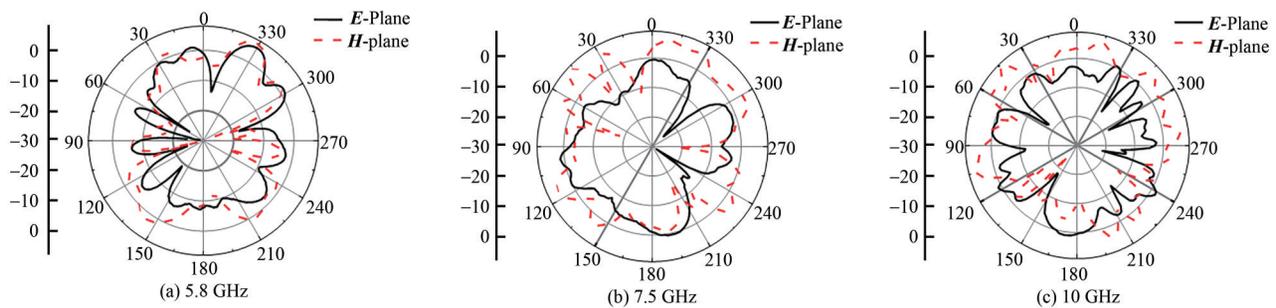
Fig.9 Simulated and measured  $S_{11}$  of antenna图 9 仿真与实测的  $S_{11}$ 

Fig.10 Measurement results of radiation patterns of the proposed antenna at different frequency points

图 10 在不同频点天线方向图测试结果

#### 4 结论

本文设计的超宽带天线可用于医疗服务领域的可穿戴系统，具备特点：1) 采用新型柔性材料 PDMS，结构简单，性能稳定；2) 天线工作在人体表面，可以保持良好的工作性能，即使天线在弯曲状态，带宽特性依然很稳定，可以达到工作要求。对于超宽带可穿戴天线，天线的小型化问题以及如何在微波暗室测量天线工作在人体表面时的方向图是未来研究重点内容。

#### 参考文献：

- [1] 吕文俊,郁剑,朱洪波. 物联网天线技术研究进展[J]. 电信科学, 2019,35(7):124–135. (LYU Wenjun,YU Jian,ZHU Hongbo. Research progress of the antenna technology for Internet of Things[J]. Telecommunications Science, 2019,35(7):124–135.)
- [2] 童宣锋. 可穿戴天线在无线体域网中的应用研究[D]. 苏州:苏州大学, 2019. (TONG Xuanfeng. Research on wearable antennas in wireless body area networks(WBAN)[D]. Suzhou, China:Soochow University, 2019.)
- [3] CUI W J,LIU R P,WANG L,et al. Design of wideband implantable antenna for wireless capsule endoscope system[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019,18(12):2706–2710.
- [4] 林雪晨,张斌珍,段俊萍,等. 基于 PDMS 的柔性可穿戴微带天线[J]. 微纳电子技术, 2018,55(7):487–492. (LIN Xuechen,ZHANG Binzhen,DUAN Junping,et al. Flexible wearable microstrip antenna based on PDMS[J]. Micronanoelectronic Technology, 2018,55(7):487–492.)
- [5] 王玲,战鹏弘,刘文勇. 互联网时代的弄潮儿——可穿戴医疗设备[J]. 科技导报, 2017,35(2):12–18. (WANG Ling, ZHAN Penghong,LIU Wenyong. The tide of the internet era—wearable medical devices[J]. Science & Technology Review, 2017,35(2): 12–18.)
- [6] 汪璐,张豪,梁博,等. 基于三维石墨烯的可拉伸太赫兹吸波材料[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(1):1–5. (WANG Lu,ZHANG Hao,LIANG Bo,et al. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2020,18(1):1–5.)
- [7] ALQADAMI A S M,MOHAMMED B,BIALKOWSKI K S,et al. Fabrication and characterization of flexible polymer iron oxide composite substrate for the imaging antennas of wearable head imaging systems[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018,17(8):1364–1368.
- [8] HE Y,LIU Y,YANG Y. Design of stretchable inverted-F antenna based on PDMS substrate[J]. Scientia Sinica Informationis, 2018,48(1):724–733.

- [9] SIMORANGKIR R B V B, YANG Y, ESSELLE K P, et al. A method to realize robust flexible electronically tunable antennas using polymer-embedded conductive fabric[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018,66(1):50-58.
- [10] SIMORANGKIR R B V B, KIOURTI Esselle A K P. UWB wearable antenna with a full ground plane based on PDMS-embedded conductive fabric[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018,17(3):493-496.
- [11] 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. (HE Yu, LIU Yi, YANG Yintang. Design of stretchable inverted-F antenna based on PDMS substrate[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2018, 48(6):724-733.)
- [12] 王兵,魏彦玉. 一种超宽带地板开槽单极子天线的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(5):832-835. (WANG Bing, WEI Yanyu. Design of a UWB monopole antenna with truncated ground plane[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2019,17(5):832-835.)
- [13] SIMORANGKIR R, KIOURTI A, ESSELLE K P. UWB wearable antenna with a full ground plane based on PDMS-embedded conductive fabric[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018,17(3):493-496.
- [14] ZHOU Leitao, FANG Shaojun, JIA Xiao. Dual-band and dual-polarised circular patch textile antenna for on-/off-body WBAN applications[J]. Iet Microwaves Antennas & Propagation, 2020,14(7):643-648.
- [15] BEHERA Santanu Kumar, KARMAKAR Nema Chandra. Wearable chipless radio-frequency identification tags for biomedical applications: a review[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2020,62(3):94-104.

#### 作者简介:

刘 阔(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为天线、微波毫米波电路、射频与微波技术、电磁兼容. email:liukuo0215@126.com.

刘瑞鹏(1994-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为天线、微波毫米波电路.

郑宏兴(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天线、微波毫米波电路和计算电磁学. email:hx-zheng@hebut.edu.cn.

王蒙军(1978-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为射频与微波技术、柔性电子器件、电磁兼容等.