

基于3D打印的柔性三频微带天线的设计与加工

钟智东^{1,2},舒霞云^{1,2,3},常雪峰⁴,唐毅泉^{1,2},诸世敏¹

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;

2. 精密驱动与传动福建省高校重点实验室(厦门理工学院), 福建 厦门 361024;

3. 福建省绿色智能清洗技术与装备重点实验室, 福建 厦门 361024;

4. 集美大学 海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要:为解决可穿戴设备在复杂应用场景中无线信号响应范围较窄的问题,该文提出了一种柔性三频微带天线,在2.5 GHz、3.5 GHz、5.4 GHz微波频段采用双“T”型+双“L”型表面结构实现天线的谐振,采用聚酰亚胺为基底材料,纳米银为辐射贴片及接地面的导电材料以实现柔性化。使用ANSYS HFSS对天线进行建模并进行仿真分析,使用微滴喷射3D打印工艺对其加工,有效地解决了传统微机电系统(MEMS)加工在柔性电子领域上成本高及步骤复杂等问题。最后使用场发射扫描电镜分析打印面形貌,并使用矢量网络分析仪分别测试天线成品的回波损耗、可弯折性及弯折抗疲劳性,测试结果与仿真结果基本一致,且天线具有较好的弯折性能。

关键词:柔性微带天线;聚酰亚胺;微滴喷射;多频段;纳米银

中图分类号:TN82 文献标识码:A

Design and Processing of Flexible Tri-Band Microstrip Antenna Using 3D Printing

ZHONG Zhidong^{1,2}, SHU Xiayun^{1,2,3}, CHANG Xuefeng⁴, TANG Yiquan^{1,2}, ZHU Shimin¹

(1. School of Mechanical & Automation Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Key Lab. of Precision Actuation & Transmission, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

3. Fujian Province Key Lab. of Green Intelligent Cleaning Technology and Equipment, Xiamen 361024, China;

4. College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: A flexible tri-band microstrip antenna is proposed to address the issue of narrow wireless signal response ranges in wearable devices within complex application scenarios. This antenna employs a double “T”-shaped + double “L”-shaped surface structure to achieve resonance in the microwave frequency bands of 2.5 GHz, 3.5 GHz, and 5.4 GHz. Polyimide serves as the substrate material, while nano-silver is utilized for the radiating patch, and a conductive material is applied on the ground plane to ensure flexibility. The antenna was analyzed using ANSYS HFSS to construct a model and conduct simulations. Fabrication utilized the microdroplet jet 3D printing process, effectively resolving the high cost and complexity associated with traditional MEMS processing in flexible electronics. Finally, field emission scanning electron microscopy was employed to analyze the printed surface morphology, and a vector network analyzer was utilized to test return loss, bendability, and fatigue resistance of the completed antenna. The test results were consistent with the simulation outcomes, demonstrating excellent bending performance of the antenna.

Key words: flexible microstrip antenna; polyimide; micro-droplet; multi-frequency band; nano-silver

0 引言

天线作为无线通信系统的重要组成部分,具有收发电磁波信号的重要功能。随着物联网、体域网等技术的发展,无线通信也逐渐应用于可穿戴设备

中,使具有轻便、高弯折性等特点的柔性天线越来越受青睐^[1]。目前常用的无线微波频段主要集中在IEEE 802.11(即WIFI频段)范围,其主要为2.4~2.48 GHz和5.15~5.8 GHz两个频段,然而随着

收稿日期:2023-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51975501)

作者简介:钟智东(1999-),男,四川省成都市人,硕士生。

IEEE 802.16 频段(即 WIMAX 频段)的应用场景逐渐增加, 2.5~2.69 GHz、3.3~3.69 GHz 和 5.25~5.825 GHz 的三频微波天线需求也日渐增长^[2], 这使扩展天线在微波频段的响应范围日趋重要。

在各类微波天线中, 微带天线具有易加工、结构简单及易实现圆极化等优点。同时微带天线的辐射贴片部分可塑性较强, 易实现多频特性。此外, 辐射贴片平面式的结构适合于 3D 打印等工艺加工, 因此, 其成为了柔性天线的首选结构之一。Xu 等^[3]提出一种新型风车型多频微带天线, 通过增加“风车”的叶片个数从而增加天线的工作频带数, 以达到多频特性。Yang 等^[4]基于复合左右手传输线理论(CRLH)设计了一种小型化三频长期演进(LTE)微带天线, 利用 CRLH 的零阶谐振特性实现小型化, 天线频段覆盖频分双工 LTE 规则的 Band3、Band4 和 Band7。Wan 等^[5]提出了一种基于超材料的多频微带天线, 通过在基板的不同位置加载电偶极子、超材料互补开口谐振环(CSSR)、交指电容加载环形谐振器(IDCLLR)等实现天线多频特性。

在天线的加工领域, 传统的微机电系统(MEMS)加工(如光刻、真空镀膜、磁控溅射等)在柔性电子领域局限性较大, 通常这些加工方式表现出刚性、高成本、步骤复杂及尺寸限制等问题。微滴喷射(微喷)3D 打印作为一种应用广泛的加工类型。与传统加工方式相比, 微喷 3D 打印具有效率高, 成本低及精度高等特点, 且可很好地契合柔性导电材料(如纳米银等)的加工。在压电式微喷领域上, Liu 等^[6]设计了一种基于同轴气流的压电式微滴喷头, 增大了液滴喷射通量。Li 等^[7]针对压电式微滴喷头无法打印高黏度材料及易堵塞等问题, 对压电式膜片喷头流道进行优化设计。结果表明, 在 10~86 μs 内, 出口速度和微滴体积随着脉宽增加而增加。通过优化后喷头可喷射中等黏度的海藻酸钠溶液。Zhou 等^[8]设计并制造了一种设有同轴气流喷射槽的压电式微滴喷头, 并通过实验分析发现, 随着同轴气流的增大, 主液滴体积随之减小, 但卫星液滴体积增大, 该设计为同轴气流辅助压电式微滴喷头的设计提供了基础思路。

为扩展柔性天线在微波频段的响应范围, 本文设计了一种柔性三频微带天线, 使其覆盖 3 种常用微波频段(2.5 GHz、3.5 GHz、5.4 GHz)。使用 ANSYS HFSS 对天线进行建模仿真, 分析其回波

损耗、方向图、多频特性等性能指标。最后使用微喷 3D 打印加工天线成品, 并通过场发射扫描电镜及矢量网络分析仪分析其形貌和辐射性能。

1 天线设计与仿真分析

1.1 天线结构

设计了一种以聚酰亚胺(PI)为介质基板的微带天线, 基板整体尺寸为 40 mm×40 mm×0.5 mm, 作为柔性电子加工的首选材料之一, 该材料的相对介电常数 $\epsilon_r = 3.5$, 介质损耗角正切值 $\tan \delta = 0.008$, 符合微带天线基板所需电性能指标。天线整体结构如图 1 所示。馈电部分采用微带线边缘馈电, 该馈电方式制造工艺简单, 且不会破坏介质基板的内部结构。

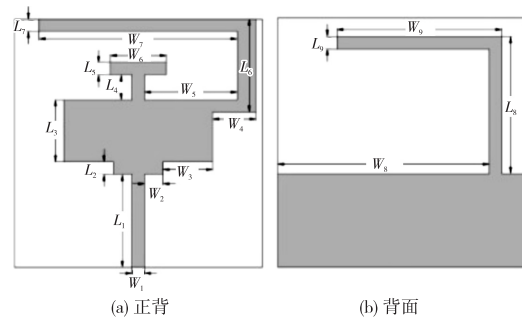


图 1 天线结构示意图

根据微带线原理, 辐射贴片部分长度^[9]为

$$L = L_{\text{eff}} - 2\Delta L = \frac{c}{2f_0} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad (1)$$

式中: c 为光速; f_0 为目标工作频率; ϵ_{eff} 为等效介电常数; ΔL 为等效缝隙宽度, 且:

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2)$$

宽度 W 为

$$W = \frac{c}{2f_0} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

在式(2)基础上对辐射贴片进行改进设计, 采用双“T”型结构并附加“L”型枝节, 以实现多频特性, 同时在背部接地面附加“L”型枝节, 以加强正反面耦合度, 调整各个频段谐振范围。天线正反面具体参数如表 1 所示。

表 1 微带天线结构参数表 mm

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
15	2	10	4	2	15

续表

L_7	L_8	L_9	W_1	W_2	W_3
2	22	2	2	3	8
W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9
7	15	9	32	34	26.5

1.2 天线性能仿真分析

使用 ANSYS HFSS 电磁仿真软件对天线进行性能分析,得出回波损耗 S_{11} 如图 2 所示。由图可知,在 $S_{11} \leq -10$ dB 为工作频段的条件下,3 条谐振频段范围分别为 2.52~3.04 GHz、3.37~3.57 GHz、4.72~5.92 GHz,可以覆盖常用的 IEEE 802.16 标准频段的大多数范围,满足家庭短距离微波通信使用场景。相对带宽为

$$f_{\text{foc}} = 2 \times \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (4)$$

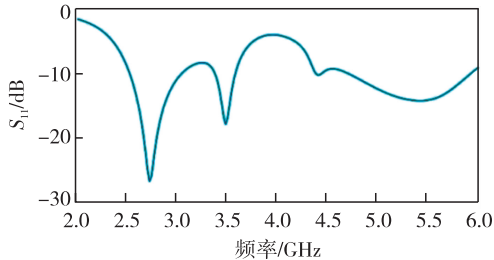


图 2 天线回波损耗 S_{11} 图

由式(4)可计算出 3 条谐振频段的相对带宽分别为 18.7%、6.2%、22.5%,按窄带(0~1%)、宽带(1%~25%)、超宽带(25%~100%)的标准,可认为天线各频段皆具有宽频特性,该天线具有较好的微波频段响应能力。

图 3 为天线在 2.5 GHz 下的增益方向图。由图 3(a)可看出,天线在 xOz 平面上表现出全向辐射

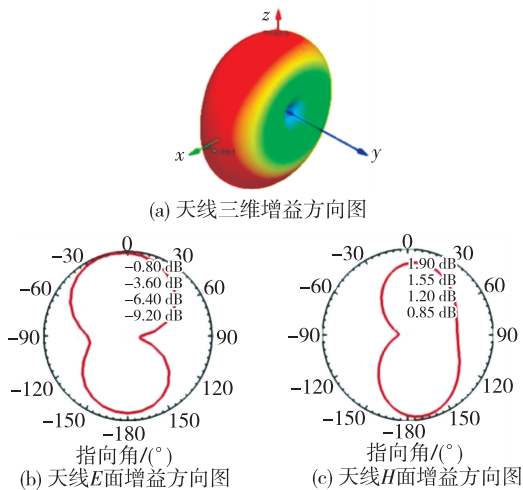


图 3 天线在 2.5 GHz 下的增益方向图

性。由图 3(b)、(c)可看出,在各自平面上辐射面基本由两个圆弧形组成,无多余副瓣产生,表明天线具有较好的全向辐射性能。

为准确实现天线的三频特性,在正反两面加载了“L”型枝节,其在多频特性上可起关键作用,图 4 为添加枝节前后的天线谐振频段对比。由图可知,与未加载状态相比,加载“L”型枝节的谐振频点更多。同时通过调整正反枝节的长宽及相对位置,能较精确地调整所需频段范围。

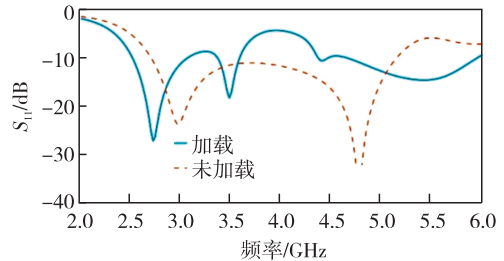


图 4 加载“L”型枝节前后天线谐振频段对比

2 微喷工艺实物加工及测试

2.1 微喷实物加工

使用微喷 3D 打印工艺对三频微带天线进行加工,装置采用压电式喷头,当内部电极和外部电极间产生电场时,喷头内部的压电元件在轴向方向上发生膨胀和压缩,导致玻璃管内表面向外运动,产生负压。负压随之在玻璃管中扩散,并通过扩展声波的方式到孔口和供液端。膨胀波作用在供液端经反射后形成压缩波,并朝孔口返回。该压缩波致使喷头处溶液突破表面张力产生细小而快速的液滴。

图 5 为整体加工装置。该装置分为基底运动模块及喷头打印模块两部分,其中喷头打印模块又分别被电控制模块和气控制模块共同控制,电控制模块负责控制打印时压电陶瓷的电压波形和振动频率,

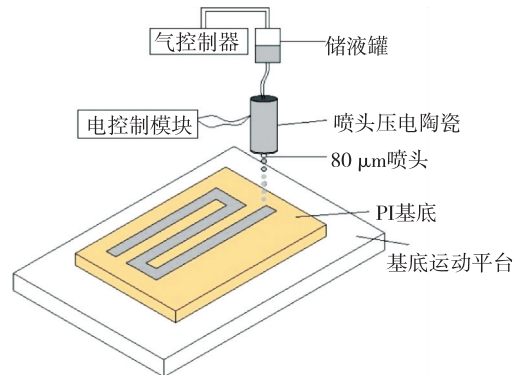


图 5 微喷装置示意图

气控制模块控制材料的进给。通过对基底运动模块进行设置,使其按照“S”型轨迹移动,液滴在基底铺展并与其他液滴聚合,形成一条直线。经过测试,在打印速率 15 mm/s 下 80 μm 的喷头形成的线条宽度约为 100 μm ,满足天线加工精度的要求。

使用以上装置对天线进行加工,采用质量分数为 25% 的纳米银导电油墨作为打印材料,其在经过烧结后可保持极佳的导电性和可弯折性,设置打印模块参数(压电陶瓷频率为 80 Hz,电压为 65 V,气控制器背压为 -12 kPa,打印速率为 15 mm/s),最终得出天线实物图如图 6 所示。

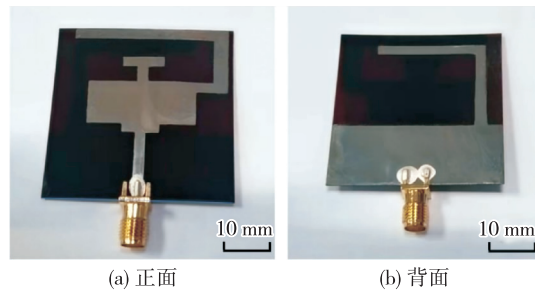


图 6 天线实物图

为验证打印面是否符合性能要求,使用场发射扫描电镜观察纳米银表面微观结构,分别观察其在烧结温度 150 $^{\circ}\text{C}$ 、175 $^{\circ}\text{C}$ 、200 $^{\circ}\text{C}$ 、225 $^{\circ}\text{C}$ 下的颗粒分布情况,扫描结果如图 7 所示。

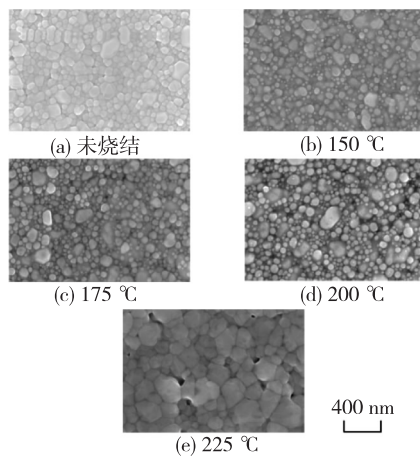


图 7 纳米银烧结后表面结构(放大 60 000 倍)

由图 7 可看出,未烧结情况下,纳米银表面残存了大量活性剂、保护剂等添加物,导致颗粒间空隙较小,但由于添加物无导电性,因此,未烧结纳米银表现出高电阻率。150~200 $^{\circ}\text{C}$ 烧结后,纳米银残留的添加物被高温蒸发,纳米银表面的颗粒呈现出清晰的边界,同时间隙扩大,且在 200 $^{\circ}\text{C}$ 内间隙大小与

温度成正比,此时纳米银表面虽具有一定的导电性,但仍未达到最佳烧结状态。当温度达 225 $^{\circ}\text{C}$ 时,纳米银颗粒发生融合现象,表面空隙减少,此时纳米银可达到最佳导电性。由此可确定经过微喷 3D 打印的纳米银能满足微带天线辐射面性能要求,证明了该工艺的可靠性。

2.2 天线性能测试

为验证加工成品的性能是否符合要求,使用矢量网络分析仪测量天线的 S_{11} ,结果如图 8 所示。由图可看出,在 2.5 GHz 频段上,实物谐振频段相对于仿真偏移,在 5.4 GHz 频段上谐振范围缩小,推测是由于测试环境导致偏差。但天线仍能满足 2.5 GHz、3.5 GHz 及 5.4 GHz 三频工作需求,表明天线在常用微波频段上具有较好的实用价值。

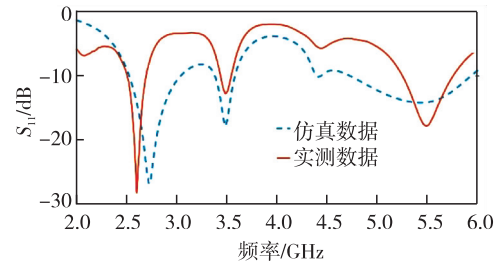


图 8 天线成品的回波损耗 S_{11}

为验证柔性导电材料、基底的弯折性,设计使天线沿 Y 轴弯折,并分别记录在弯折角度为 0 $^{\circ}$ 、15 $^{\circ}$ 、30 $^{\circ}$ 、45 $^{\circ}$ 、60 $^{\circ}$ 下 S_{11} 的变化,其结果如图 9 所示。由图可知,天线在各弯折条件下,辐射性能无明显变化,这表明了柔性天线在各种复杂使用条件下的稳定性。

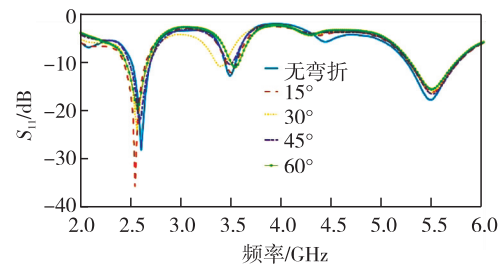
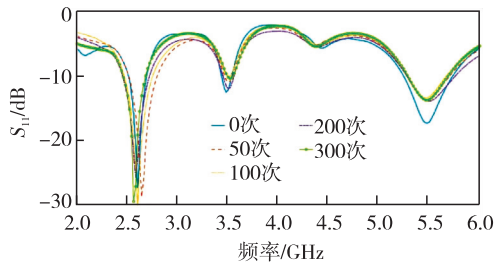


图 9 不同弯折角度下天线的 S_{11}

对于柔性材料,不但需要有较好的可弯折性,还需要有一定的材料抗疲劳性,为测试天线对于多次弯折情况下的抗疲劳性,分别对其进行 50、100、200、300 次、角度约 60 $^{\circ}$ 的弯折,记录回波损耗变化情况,测试结果如图 10 所示,随着弯折次数的增加,天线辐射性能变化不明显,由此可见该柔性天线具有较好的弯折抗疲劳性。

图 10 不同弯折次数下天线的 S_{11}

3 结论

设计了一种以聚酰亚胺作为基底的柔性微带天线,该天线采用微带线进行馈电,设计的双“T”型和正反“L”型辐射贴片模块能够使其具备三频工作条件。该天线具有以下优点:

1) 天线的 3 个谐振频段分别位于 2.5 GHz、3.5 GHz、5.4 GHz,符合目前主流微波通信频段范围,具有较高的泛用性。

2) 天线结构简单,易加工,整体尺寸在 40 mm×40 mm 内,通过调节“L”型枝条长短和相对位置可改变谐振范围。

3) 天线辐射方向性较好,基本能全向辐射,辐射面无多余副瓣产生。

针对传统 MEMS 加工在柔性电子领域加工成本高、加工工序复杂等情况,本文采用一种微喷 3D 打印的加工方式,对上述天线进行加工,成品良好的形貌证明了该加工工艺在柔性电子领域良好的应用前景。

对天线成品进行性能测试表明,天线辐射性能与仿真结果基本一致,达到常用微波频段的三频使用需求。且天线可弯折性及抗疲劳性测试结果表明,其可在复杂使用场景下保持良好的稳定性。结果表明,经过 3D 打印加工的柔性微带天线在可穿戴设备信号传输领域有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 董雅儒,李书芳,洪卫军. 可穿戴天线研究综述[J]. 通信技术,2018,12(4):26-32.
DONG Yaru, LI Shufang, HONG Weijun. Review on wearable antenna design[J]. Information and Communications Technologies,2018,12(4):26-32.

[2] 魏东来,南雪莉,夏鹏. 一种 L 型多频带 WLAN、WiMAX 的微型天线[J]. 电子设计工程,2023,31(4):7-10.
WEI Donglai, NAN Xueli, XIA Peng. The utility model relates to an L-type multi-band WLAN and WiMAX micro antenna[J]. Electronic Design Engi-

neering,2023,31(4):7-10.

- [3] 徐琼,王豫,周洪澄,等. 一种风车型多频贴片天线[J]. 微波学报,2018,34(6):48-52.
XU Qiong, WANG Yu, ZHOU Hongcheng, et al. A windmill type multi-frequency patch antenna[J]. Journal of Microwaves,2018,34(6):48-52.
- [4] 杨波,孟庆东. 基于 CRLH 的小型化三频 LTE 微带天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2021,19(6):1037-1040
YANG Bo, MENG Qingdong. Miniaturized tri-band LTE microstrip antenna based on CRLH[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology,2021,19(6):1037-1040.
- [5] 万盛亚,王代强,罗双. 基于超材料的多频微带天线的设计[J]. 光通信研究,2021(4):72-78.
WAN Shengya, WANG Daiqiang, LUO Shuang. Design of multi-frequency microstrip antenna based on metamaterial[J]. Study on Optical Communications, 2021(4):72-78.
- [6] 刘作平,周健,裴泽光,等. 同轴气流作用下压电式微滴喷射过程的数值模拟[J]. 东华大学学报(自然科学版),2021,47(4):75-83.
LIU Zuoping, ZHOU Jian, PEI Zeguang, et al. Numerical simulation of piezoelectric micro-droplet ejection process in a coaxial airflow[J]. Journal of Donghua University,2021,47(4):75-83.
- [7] 李润,梁文峰,朱慧轩,等. 高黏度压电式膜片喷头仿真分析与实验研究[J]. 微纳电子技术,2023,60(6):948-956.
LI Run, LIANG Wenfeng, ZHU Huixuan, et al. Simulation analysis and experimental study of piezoelectric diaphragm nozzle with high viscosity[J]. Micro-nanoelectronic Technology,2023,60(06):948-956.
- [8] 周健,裴泽光. 同轴气流作用下压电驱动式微滴喷射行为的实验研究[J]. 上海交通大学学报,2020,54(2):200-210.
ZHOU Jian, PEI Zeguang. Experimental study on the behavior of piezoelectric micro-droplet ejection in a coaxial airflow[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2020,54(2):200-210.
- [9] 丁大业,范婷,宫卓宏. 一种应用可穿戴电子设备的 5G 柔性天线的设计[J]. 电子元器件与信息技术,2021,5(10):221-223.
DING Daye, FAN Ting, GONG Zuohong. Design of a 5G flexible antenna for applications in wearable electronic devices[J]. Communication Technology and Artificial Intelligence,2021,5(10):221-223.