

文章编号: 2095-4980(2021)04-0692-05

基于压电材料的双频段混合能量收集天线

白雪, 韩万阳, 徐雷钧*

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对环境混合能量收集(天线)的小型化设计目标, 设计一种基于聚偏氟乙烯(PVDF)压电材料的双频段共面波导(CPW)天线。天线的主要辐射单元为矩形铜皮贴纸, 两侧对称的 L 型铜皮贴纸形成共面波导馈电结构, 并作为微扰单元改变天线的表面电流分布, 实现双频的设计要求。天线设计并制造在 PVDF 压电薄膜上, 由于压电材料本身所具备的压电特性和高介电常数, 该天线可同时收集射频与振动 2 种能量, 天线尺寸得到有效减小。实验结果表明: 该天线可同时工作在 2.4 GHz 和 5.8 GHz 的常用工业、科学与医学(ISM)频段, 峰值增益分别为 0.77 dB 和 2.47 dB。

关键词: PVDF 压电薄膜; 共面波导; 双频段天线; 混合能量收集

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019528

Dual-band hybrid energy harvesting antenna based on piezoelectric material

BAI Xue, HAN Wanyang, XU Leijun*

(College of Electrical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: Aiming at the miniaturization design goal of environmental hybrid energy harvesting, a dual-band Coplanar Waveguide(CPW) antenna based on Polyvinylidene Fluoride(PVDF) piezoelectric material is proposed. The main radiation element of the antenna is a rectangular copper sticker. The symmetric L-shaped copper stickers on both sides form a coplanar waveguide feeding structure, which works as a perturbation unit to change the surface current distribution of the antenna, and achieve the dual-band design requirement. The antenna is designed and fabricated on the PVDF piezoelectric film. Due to the piezoelectric properties and high dielectric constant of the piezoelectric material itself, the antenna can simultaneously harvest both Radio Frequency(RF) and vibration energies and the size of the antenna can be effectively reduced. The experimental results show that the antenna can work in the common Industrial Scientific Medical(ISM) band of 2.4 GHz and 5.8 GHz at the same time, and the peak gains are 0.77 dB and 2.47 dB, respectively.

Keywords: PVDF piezoelectric film; Coplanar Waveguide; dual-band antenna; hybrid energy harvesting

随着电子通信与无线传感技术的迅猛发展, 越来越多的低功耗电子器件不断涌现, 随之而来的是这些微型器件的供电问题^[1]。传统的化学电池因其污染严重、使用寿命短等固有缺陷逐渐被淘汰, 取而代之的是新型能量收集装置, 这些装置通过收集环境中存在的各种能量并将其转换成电信号来维持电子设备的正常工作^[2]。随着 5G 时代的到来, 通信基站林立, 环境中的频谱资源也日益丰富, 作为射频能量载体的天线异军突起^[3-5]。而这其中, 以其他能量收集载体作为制作材料的天线由于可同时收集多种能量对抗环境多样性, 从而获得更高更稳定的输出效率成为研究的热点^[6-7]。

文献[8]设计了一种基于智能压电材料的偶极子天线, 谐振频率在 915 MHz, 可用于穿戴式设备中; 文献[9]设计了一种基于压电陶瓷的射频能量收集天线, 工作频段在 1.9 GHz, 输出能量达到毫瓦级, 可用于传感器节点的自主供电; 文献[10]设计了一种基于负磁导率材料的能量收集天线, 工作频率在 5.27 GHz, 相比于普通材料作为介质层的天线, 回波损耗变化不大, 但增益提高了 1 dB; 文献[11]设计了一种以太阳能电池板作介质层的分形

收稿日期: 2019-12-10; 修回日期: 2020-02-22

基金项目: 江苏省研究生创新计划基金资助项目(KYCX18_2263); 国家自然科学基金资助项目(61874050)

*通信作者: 徐雷钧 email:xlking@ujs.edu.cn

天线，工作频点为 5.8 GHz，增益高达 17.3 dBi。

本文设计了一种基于 PVDF 压电材料的双频段能量收集天线，该天线的工作频段覆盖 2.4 GHz Wi-Fi 和 5.8 GHz 通信频段。与其他双频段天线相比，本文所提出的天线采用压电材料作为介质层，在收集射频能量的同时可采集因压电材料的形变产生的振动能，且共面波导的结构制作相对简单，易于加工实现。由于压电材料介电常数较高，有利于实现天线的小型化设计。

1 混合能量收集天线的设计理论

现阶段的混合能量收集天线的设计与制作技术远未成熟，设计主体仍是结构相对简单的微带天线，其基本结构如图 1 所示。组成部分包括辐射贴片、介质层以及金属地，辐射单元与金属地或辐射源的连接方式决定了天线的馈电模式。由于压电材料自身较薄，侧馈或同轴馈电的方式难以实现，因而将金属地与辐射单元均铺在同一平面上，形成共面波导馈电结构。将其他能量收集载体用于制作天线的材料，从而实现混合能量收集。当其用作天线的辐射单元时，需要对该材料进行射频特性分析，包括复阻抗的幅值与相角，并与常用金属贴片属性对比，从而对其可行性作出判断^[12]；当其用作天线的介质层时，则需要了解其相对介电常数以及其作为能量收集载体的固有属性；当其为导体时，还需进行绝缘处理。

以压电薄膜作为天线的介质层时，由于 PVDF 本身为高分子材料，常用的腐蚀印刷制作贴片的方法不可取，因而采用刚度较低、粘附性较强的铜皮贴纸作为天线的贴片材料。当天线处于动态系统中时，除了可以接收到环境中辐射的电磁波能量，还可以采集自身形变产生的振动能量。

2 天线设计

设计的天线结构如图 2 所示。天线的辐射单元为矩形铜皮贴片，两侧对称的 L 型结构贴片作为金属地，均粘附于充当介质层的 PVDF 压电薄膜上，贴片的边缘与矩形压电薄膜边缘重合，形成共面波导馈电结构。由于 PVDF 压电薄膜成品表面为银电极，需对其进行绝缘处理，镀上一层绝缘塑料薄膜(厚 50 μm)。矩形贴片用于实现高频谐振，L 型结构贴片除了用作馈电金属地外，延伸出来的细长条部分作为微扰单元，改变天线的表面电流分布轨迹，实现双频段的设计要求。

最终设计的天线整体尺寸为 70 mm \times 50 mm \times 0.2 mm，经高频结构模拟器(High Frequency Structure Simulator, HFSS)软件优化仿真后，具体各项参数如表 1 所示。PVDF 压电薄膜的相对介电常数 $\epsilon_r=9.5$ ，损耗角正切为 $\delta=0.05$ ，厚度为 0.2 mm。

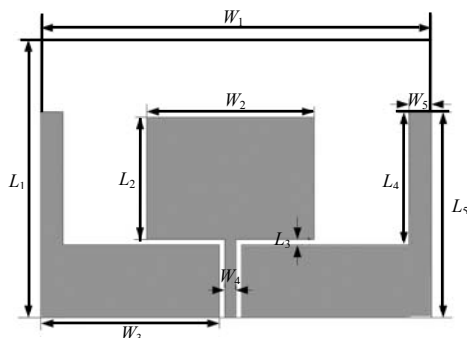


Fig.2 Diagram of antenna structure
图 2 天线结构示意图

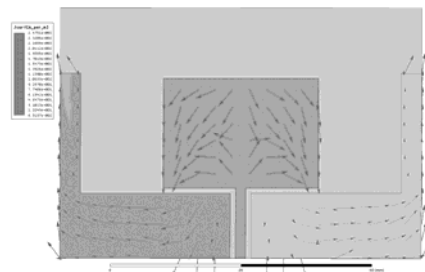


Fig.3 Current distribution on antenna surface
图 3 天线表面电流分布

3 仿真结果及分析

天线的表面电流分布轨迹如图 3 所示。在添加了 L 型寄生单元后，延伸出来的长条部分产生了与矩形贴片两侧方向相反分布的电流。为探究该电流对天线性能产生的具体影响，图 4 为添加 L 型寄生单元后的天线与原有矩形天线的 S_{11} 参数对比图。由图 4 可知，未添加 L 型寄生单元时，天线仅由矩形辐射单元产生高频谐振频率 (5.95 GHz)；在延伸出 L 型寄生单元长条部分后，增加了辐射部分的电长度，激励了相同极化方式下的其他横磁

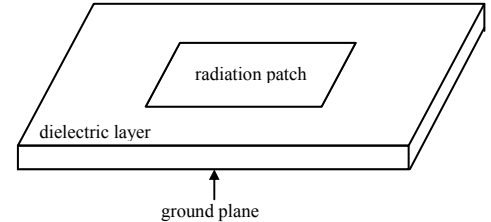


Fig.1 Diagram of microstrip antenna
图 1 微带天线基本结构图

表 1 天线各项参数表

Table1 Antenna parameters

parameter	value/mm	parameter	value/mm
W_1	70	L_1	50
W_2	30	L_2	22
W_3	33	L_3	1
W_4	2	L_4	24
W_5	4	L_5	37

波模式，在低频处(2.48 GHz)出现了辐射零点，从而产生了新的谐振频率点。同时，由于反向电流的存在，延伸出的寄生单元对原有频段产生了抑制作用，降低了高频段的辐射能力，因而 5.95 GHz 时的 S_{11} 参数略有降低。图 5 为以 FR4 板($\epsilon_r=4.4$)和 PVDF 压电材料作介质层的天线 S_{11} 参数对比曲线，由图 5 不难看出，相对介电常数较低的 FR4 天线谐振频率点相比于 PVDF 压电材料，天线往高频移动，虽然损耗更低，但并不能满足本文对于设计频段的要求。

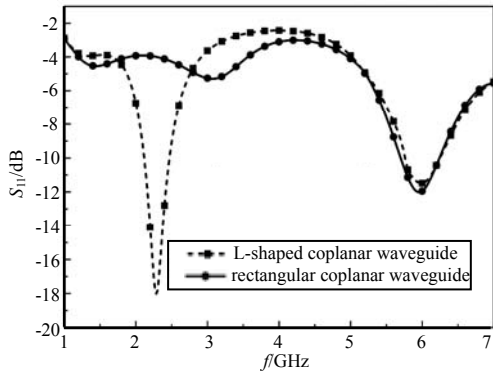


Fig.4 S_{11} of L-shaped and rectangular coplanar waveguide antennas
图 4 L 型与矩形共面波导天线 S_{11} 参数图

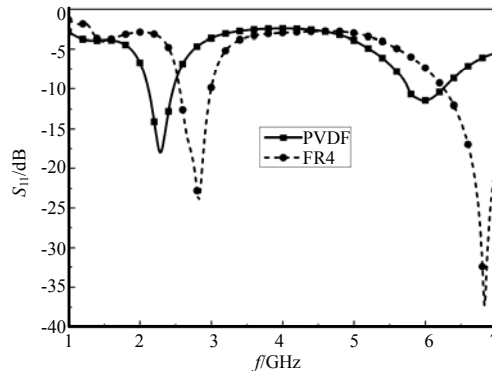


Fig.5 S_{11} of FR4 board antenna and PVDF antenna
图 5 FR4 板天线与 PVDF 天线的 S_{11} 参数图

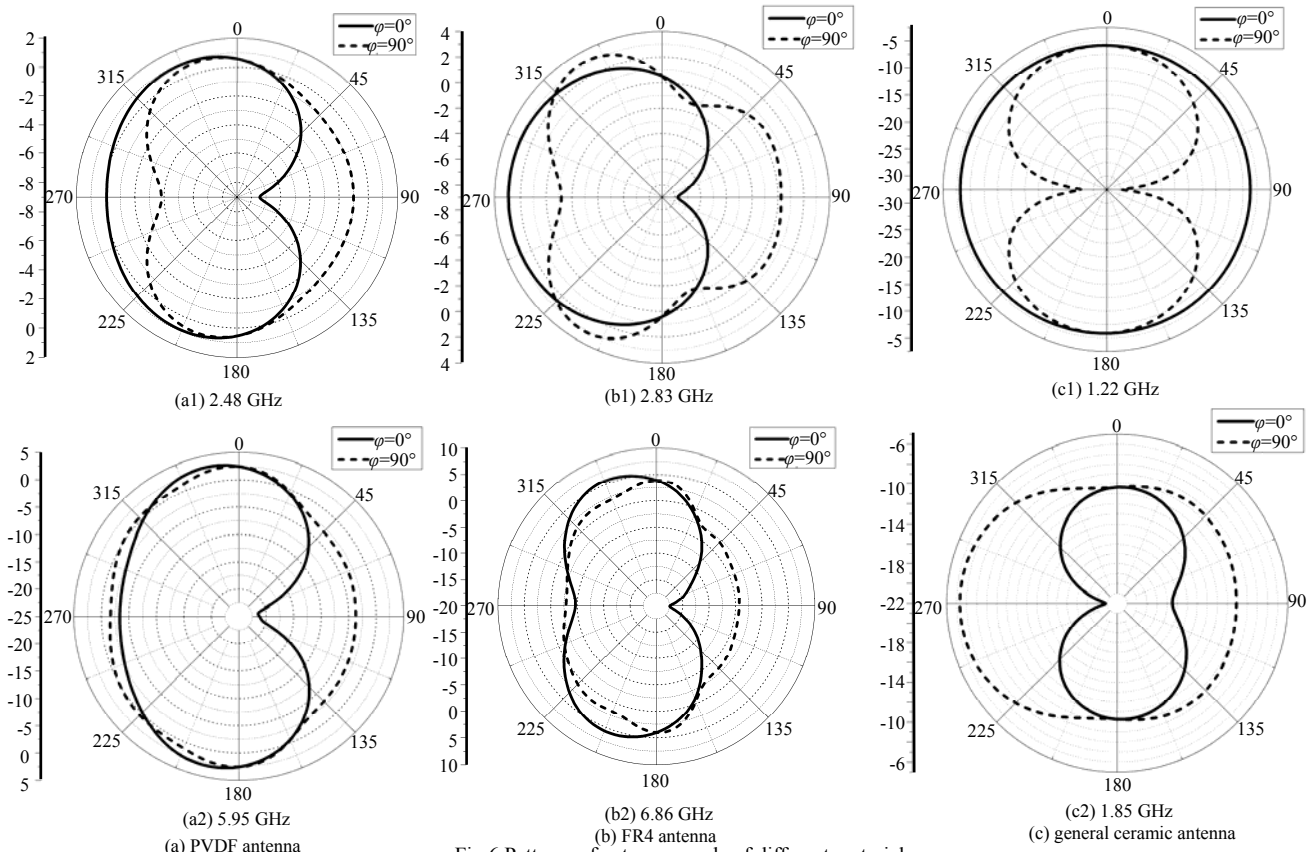


Fig.6 Patterns of antennas made of different material
图 6 不同材料天线方向图

压电材料在压电性能上的表现并不会影响其辐射特性，后者的主要影响因子为材料的相对介电常数以及损耗角正切。一般陶瓷材料虽然损耗角正切较低，但却有超高的相对介电常数，这将会恶化天线的增益。图 6 分别给出了不同介质材料天线在其谐振频率点的方向图。其中增益最高的为 FR4 天线，最低的为一般陶瓷天线，在最大辐射方向上的增益仅为 -7 dB；PVDF 天线在低频(2.48 GHz)时的峰值增益为 0.77 dB；高频(5.95 GHz)时辐射强度较高，峰值增益为 2.47 dB。该天线在低频时增益表现不佳的主要原因在于该频段是在微扰单元的作用下激励

而出，横磁波模旁瓣较多，因此辐射效率较低，但在 xoy 平面上 ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$) 表现出良好的全向性，有利于对抗环境能量分布多样性，满足实际应用需求。

4 天线实物测试

根据 HFSS 优化仿真后的各项参数，对天线进行了实物制作与测试，实物如图 7 所示。通过矢量网络分析仪对天线进行性能测试，实测与仿真的 S_{11} 参数对比如图 8 所示。由图可见，天线的实际谐振频率点为 2.32 GHz, 5.95 GHz, -10 dB 带宽为 560 MHz 和 1.01 GHz，工作带宽较宽。实测结果与仿真结果略有出入，主要误差来源于天线的加工制作。

5 结论

本文提出了一种基于压电材料的双频段能量收集天线，通过以 PVDF 压电薄膜作为天线的介质基板实现小型化设计；通过在介质层上添加寄生单元改变表面电流分布，实现双频段的设计。天线性能的实测与仿真结果基本吻合，工作频段覆盖 2.4 GHz 与 5.8 GHz 常用 ISM 通信频段， -10 dB 工作带宽分别为 560 MHz 与 1.01 GHz。该天线结构相对简单，易于集成，适用于对抗环境多样性的能量收集领域，实现低功耗电子器件自主供电。

参考文献：

- [1] CONTI S, FARACI G, NICOLOSI R, et al. Battery management in a green fog-computing node: a reinforcement-learning approach[J]. IEEE Access, 2017(5):21126–21138.
- [2] ANDERSSON M A, OZCELIKALE A, JOHANSSON M, et al. Feasibility of ambient RF energy harvesting for self-sustainable M2M communications using transparent and flexible graphene antennas[J]. IEEE Access, 2016,4(1):5850–5857.
- [3] 万菁晶, 陆怡琪, 田梦倩, 等. 面向 5G 无线通信系统中若干物理层技术探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6):962–969. (WAN Jingjing, LU Yiqi, TIAN Mengqian, et al. On some physical layer technology in 5G wireless communication system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(6):962–969.)
- [4] 刘志伟, 结顺利, 吴喜亮, 等. 一种具有双缝隙结构的双频宽带 MIMO 天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6):1048–1053. (LIU Zhiwei, JIE Shunli, WU Xiliang, et al. A dual-band broadband MIMO antenna with double gap[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(6):1048–1053.)
- [5] LIU Duxian, HONG Wonbin, RAPPAPORT T S, et al. What will 5G antennas and propagation be?[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12):6205–6212.
- [6] SHYNU S V, ONS M J R, MCEVOY P, et al. Integration of microstrip patch antenna with polycrystalline silicon solar cell[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(12):3969–3972.
- [7] RANJKESH N, TAEB A, GIGOYAN S, et al. Millimeter-wave silicon on glass integrated tapered antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014(13):1425–1428.
- [8] NGUYEN Son, AMIRTHARAJAH Rajeevan. A hybrid RF and vibration energy harvester for wearable devices[C]// IEEE Applied Power Electronics Conference & Expos. San Antonio, TX, USA: IEEE, 2018:1060–1064.
- [9] 徐雷钧, 白雪, 潘祎雯, 等. 传感器节点自主供电的环境混合能量收集系统设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):147–152. (XU Leijun, BAI Xue, PAN Yiwen, et al. Design of ambient hybrid energy harvesting system for self-powered sensor node[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8):147–152.)
- [10] 汤杭飞, 王虎, 郭晓静, 等. 利用负磁导率材料提高宽带微带天线增益[J]. 现代雷达, 2011, 33(4):58–61. (TANG Hangfei, WANG Hu, GUO Xiaojing, et al. Enhancement of the gain for broadband microstrip antennas using negative magnetic permeability[J]. Modern Radar, 2011, 33(4):58–61.)
- [11] 张丞皓, 陈星. 集成于太阳能电池板的高增益分形天线设计[J]. 无线电工程, 2017, 47(6):48–51. (ZHANG Chenghao, CHEN Xing. High-gain fractal antenna integrated with a solar cell[J]. Radio Engineering, 2017, 47(6):48–51.)

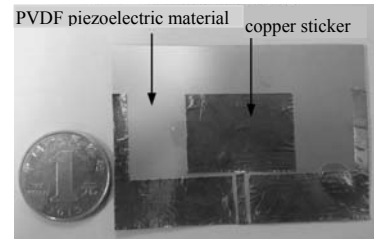


Fig.7 Physical picture of antenna
图 7 天线实物图

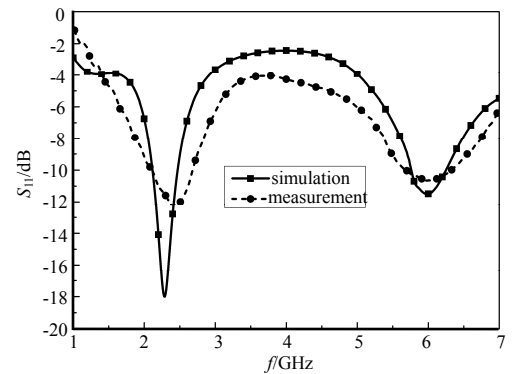


Fig.8 S_{11} parameter comparison of measured and simulated antenna
图 8 天线实测与仿真 S_{11} 参数对比图

- [12] 马建欢,李建雄,肖康,等. 太阳能电池作为天线辐射体的 RFID 标签天线的设计[J]. 天津工业大学学报, 2013(1):57-60.
MA Jianhuan,LI Jianxiong,XIAO Kang,et al. Design of RFID tag antenna with integrated solar cell as antenna radiator[J].
Journal of Tianjin Polytechnic University, 2013(1):57-60.)

作者简介:

白雪(1975-),女,辽宁省北票市人,副教授,主要研究方向为太赫兹无损探测技术、农业物联网、射频与振动复合能量收集器设计. email:baixue@uj.s.edu.cn.

韩万阳(1995-),男,江苏省泰州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为天线理论与设计.

徐雷钧(1976-),男,江苏省海门市人,教授,主要研究方向为太赫兹集成电路、射频电磁波能量收集电路设计.

(上接第 691 页)

- [5] 位宇,陈潇杰,刘臻龙,等. 两路 15 kW 连续波微波磁控管相干功率合成技术[J]. 应用科技, 2018,45(2):34-37. (WEI Yu,CHEN Xiaojie,LIU Zhenlong,et al. Synthesis of coherent power of microwave magnetrons based on two-way 15 kW continuous wave[J]. Applied Science and Technology, 2018,45(2):34-37.)
- [6] YE Wenjun,ZHANG Yi,YUAN Ping,et al. Modeling and experimental studies of a side band power re-injection locked magnetron[J]. Chinese Physics B, 2016,25(12):496-502.
- [7] GYERGYEK T,ČERČEK M,STANOJEVIĆ M. Experimental evidence of periodic pulling in a weakly magnetized discharge plasma column[J]. Contributions to Plasma Physics, 2010,37(5):399-416.
- [8] DEWAN E M,DEVITO P A. The almost phase-locked magnetron and the Lashinsky spectrum[J]. Proceedings of the IEEE, 1970,58(1):161-162.
- [9] BUICK R I,REDDISH A,ZUCKER I J. Frequency pushing in crossed-field oscillators. A comparison between the c.w. magnetron and the magnetron-type backward-wave oscillator[J]. Proceedings of the IEE-Part B:Radio and Electronic Engineering, 1958,105(10):525-528.
- [10] ZHANG X,ZHOU X,DARYOUSH A S. A theoretical and experimental study of the noise behavior of subharmonically injection locked local oscillators[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1992,40(5):895-902.

作者简介:

廖崇蔚(1995-),男,在读博士研究生,主要研究方向为电磁场与微波技术. email:18408251520@163.com.

陈潇杰(1991-),男,博士,主要研究方向为微波技术.

陈倩(1975-),女,副教授,主要研究方向为微波测量.

余泽(1994-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为无线电物理.

刘长军(1973-),男,教授,主要研究方向为微波技术.