

文章编号: 2095-4980(2020)03-0414-05

具有谐波抑制功能的双极化缝隙天线

张旭, 刘一麟, 黄卡玛, 杨阳*

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610021)

摘要: 针对微波能量传输领域中接收天线与发射天线发生极化失配时, 整流天线接收的能量会急剧下降的问题, 设计了一款工作在2.45 GHz具有谐波抑制功能的双极化缝隙接收天线, 该接收天线本身发生一定角度旋转时仍可通过双极化的特性接收能量。通过在贴片上开大小合适、结构对称的缝隙, 实现天线水平极化和垂直极化; 运用缺陷地结构, 实现谐波抑制功能。仿真结果显示, 在2.45 GHz处, 天线的隔离度高于17.6 dB, 增益3.9 dBi, 阻抗匹配良好, 在二次、三次谐波处天线的回波损耗为-0.38 dB和-0.96 dB, 仿真结果和实测基本吻合。

关键词: 缝隙天线; 双极化天线; 谐波抑制; 低剖面

中图分类号: TN827+.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019314

Dual polarized slot antenna with harmonic suppression

ZHANG Xu, LIU Yilin, HUANG Kama, YANG Yang*

(School of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610021, China)

Abstract: In the field of microwave power transmission, when the polarization mismatch between receiving antenna and transmitting antenna occurs, the energy received by rectifier antenna will decrease sharply. A dual polarized slot receiving antenna with harmonic suppression function at 2.45 GHz is designed. The receiving antenna can receive energy even when it rotates at a certain angle. The horizontal and vertical polarization of the antenna can be realized by opening a suitable size and symmetrical structure slot on the patch, and the harmonic suppression function can be realized by using defected ground structure. The simulation results show that at 2.45 GHz, the isolation degree of the antenna is higher than 17.6 dB, the gain is 3.9 dBi and the impedance matching is good. The echo loss of the antenna at the second and third harmonics is -0.38 dB and -0.96 dB. The simulation results are in good agreement with the measured ones.

Keywords: slot antenna; dual-polarized antenna; harmonic suppression; low profile

自微波能量传输(Microwave Power Transmission, MPT)概念提出以来, MPT已成为微波工程领域中的重要研究方向^[1-3]。MPT即将能量以微波的形式在空间中进行传递、接收并转换为直流能量, 其中作为接收端的整流天线将微波能量接收并将微波能量转换为直流^[4], 所以整流天线性能的好坏直接影响整个MPT系统。通常在S波段和C波段下, 整流天线的关键部件二极管往往选用肖特基二极管, 但由于二极管是非线性器件, 在整流的过程中会产生二次、三次谐波信号^[5], 当天线或者整流电路前端不具备谐波抑制的功能时, 这部分能量可能会通过天线辐射出去而无法转换为直流能量。为了整流天线的小型化, 通常考虑通过天线来实现对二次、三次谐波信号的抑制, 从而不必单独去设计带通滤波器。常见的谐波抑制天线主要采用光子带隙结构和缺陷地结构(Defected Ground Structure, DGS)^[6-7]。由于天线极化匹配的问题: 当发射天线为水平线极化天线, 接收天线也为水平线极化天线时, 接收天线能完全接收发射天线发射的能量, 但这种MPT系统往往需要严格的极化对准^[8], 当接收天线发生一定的角度旋转时, 接收天线接收的能量会急剧下降; 当发射天线为线极化天线, 接收天线为圆极化天线

收稿日期: 2019-08-24; 修回日期: 2019-09-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61601312)

作者简介: 张旭(1993-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波无线输能。email:m13281277667@163.com

*通信作者: 杨阳 email:yyang@scu.edu.cn

时，接收天线虽然在发生一定角度旋转时，接收天线接收的能量基本保持不变，但由于圆极化本身形成的特性，在接收线极化波时会有 3 dB 的能量衰减^[9]。而双线极化天线作为接收天线时，在发生一定角度旋转时，天线接收的能量不会急剧下降而且本身也不会存在固有的 3 dB 能量衰减^[10-11]。相比于文献[10-11]中的双极化天线，本文中的天线采用单层结构，剖面更低，加工经济。由于采用的单层结构，而且天线的背面没有添加反射板，所以天线的正面和背面都可以进行能量的采集。

基于以上两点，本文设计了一款可工作在 2.45 GHz 的具有谐波抑制功能的双线极化缝隙天线。通过引入缺陷地结构，使天线本身具有谐波抑制的功能，实现了对二次、三次谐波的抑制，节省了后端微波电路带通滤波器的设计。为了实现对线极化波、圆极化波的接收，采用对称结构，同时实现水平极化和垂直极化。天线使用有限元仿真软件进行仿真，通过实物加工测试，测试和仿真结果吻合良好。

1 天线设计

1.1 双极化缝隙天线

天线的结构见图 1，天线的基板采用介电常数 2.65 的 F4B 材料，损耗角正切为 0.002，厚度为 1 mm，贴片天线和馈线的厚度为 0.035 mm。天线结构紧凑，剖面低，正面为环形缝隙，背面为天线的馈线。其中天线环形槽长度约为 1/2 工作波长，初步计算得到环形槽的长度，通过优化分析，可以使天线工作在想要的工作频段。在环形槽的外侧通过切角，可一定程度上增加天线的带宽和减小短路环的尺寸。此外，天线采用微带传输线对天线进行馈电，馈线宽度为 w_f 。该天线贴片形状和馈线大小位置都对称，从而可以实现水平极化和垂直极化。在经过多组仿真优化后，取其中一组回波损耗较为平坦的尺寸作为本文的实例，天线尺寸见表 1。经过仿真发现，天线的工作频点主要受环形缝隙边长 w_2 的影响，而天线的回波损耗主要受 l_s 长度的影响，所以通过优化 w_2 和 l_s ，使天线的中心频点落在 2.45 GHz 并且回波损耗满足使用的要求。天线 S 参数见图 2。其中在 4.9 GHz 处， $S_{11}=-5.27$ dB，7.35 GHz 处， $S_{11}=-13.04$ dB。天线并没有在二次、三次谐波处实现良好的谐波抑制。

1.2 基于 DGS 结构的双极化谐波抑制天线

为了使天线较为简便地获得谐波抑制的功能，考虑通过 DGS 来实现。在图 1 结构的基础上，通过在馈线上方分别添加一条缝隙，形成 DGS，实现天线本身对二次、三次谐波的抑制，其结构见图 3。在引入新的槽线时，由于改变了原有天线表面的电流分布，天线的工作频率会有所改变，所以在设计缺陷地结构的天线时，同时优化影响天线回波损耗和谐波抑制与否的关键尺寸。经过仿真发现， l_s 的长度对回波损耗的大小起着很大的作用，需要通过合理调节 l_s 的长度，实现对天线的良好馈电；矩形槽的长度和短路环的大小对天线的谐振点影响较大，其中矩形槽的长度还对谐波抑制与否有关键的作用。通过整体优化天线的各参数，确定了天线的尺寸见表 2。天线仿真的 S 参数见图 4。

由图 4 可以得出：在基频 2.45 GHz 处的反射系数 $S_{11}=-24.2$ dB, $S_{21}=-18.23$ dB, 在基频 2.45 GHz 的二次谐波 4.9 GHz 处反射系数 $S_{11}=-0.38$ dB, $S_{21}=-31.64$ dB, 基频 2.45 GHz 的三次谐波 7.35 GHz 处反射系数 $S_{11}=-0.96$ dB, $S_{21}=-35.5$ dB。

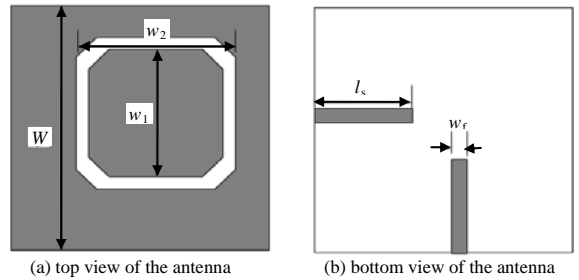


Fig.1 Diagram of antenna structure

图 1 天线结构图

表 1 天线参数(单位: mm)

W	w ₁	w ₂	l _s	w _f
50	23	28	22	2.68

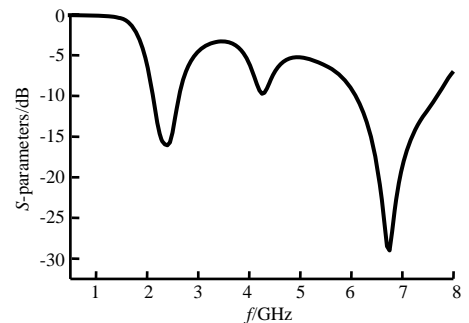


Fig.2 Simulated results of antenna reflection coefficient

图 2 天线反射系数仿真测试结果

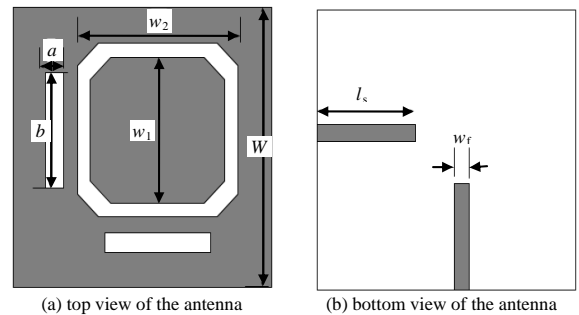


Fig.3 Diagram of antenna structure

图 3 天线结构图

表 2 天线参数(单位: mm)

W	w ₁	w ₂	a	b	l _s	w _f
50	31	26	3.5	20.5	19	2.68

在 1.9~2.83 GHz 范围内 S_{11} 小于 -10 dB。在 4.34~5.85 GHz 和 6.55~7.38 GHz 频段内 $S_{11} > -1$ dB, 实现了对天线二次谐波和三次谐波的抑制。

图 5 为该天线在 2.45 GHz, 4.9 GHz 和 7.35 GHz 下的电流密度分布。从图 5 可看出, 在 2.45 GHz 下该天线的电流密度主要分布在环形槽上, 通过环形槽进行辐射, 而在 4.9 GHz 和 7.35 GHz 处, 天线的电流密度主要集中在 DGS 结构上; 该结构被广泛应用于滤波领域^[12-14], 通常可以等效为 L-C 并联谐振器^[15], 通过调整 DGS 的尺寸, 形成特定的 L-C 并联谐振器结构, 在一定的频带内抑制电磁波的传播, 实现对二次、三次谐波的抑制。

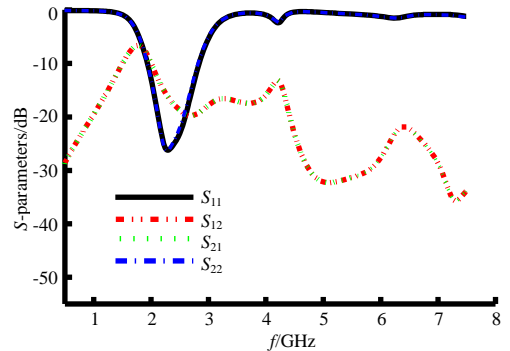
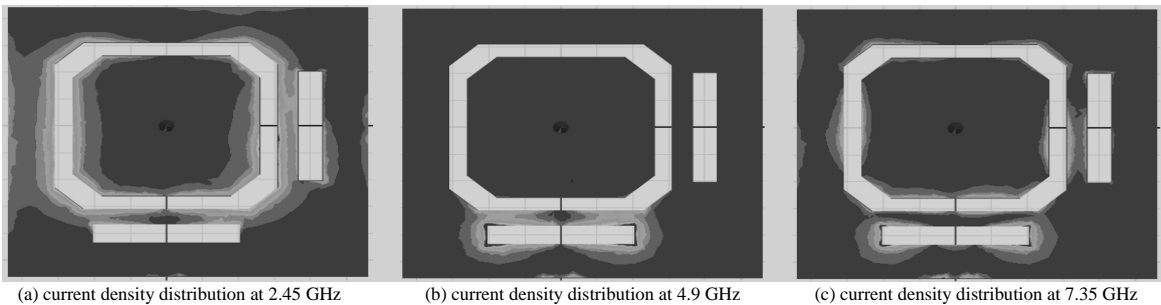


Fig.4 Simulated results of antenna reflection coefficient

图 4 天线反射系数仿真结果



(a) current density distribution at 2.45 GHz

(b) current density distribution at 4.9 GHz

(c) current density distribution at 7.35 GHz

Fig.5 Volume current density distribution at each frequency point

图 5 各频点电流密度分布图

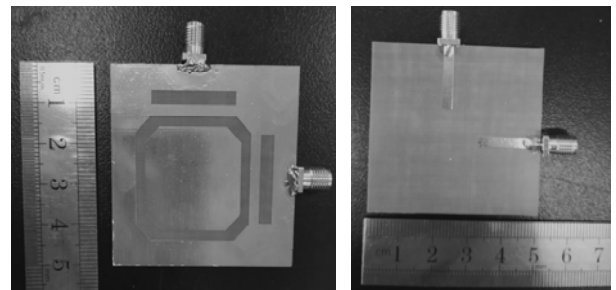
2 天线测试结果分析

加工并测试天线, 对比仿真和测试结果, 其中天线的实物见图 6。

天线的回波损耗通过 Agilent 公司的矢量网络分析仪 E8363B 进行测试, 仿真和实测数据见图 7。天线实测 1 端口和 2 端口的反射系数低于 -10 dB 的带宽范围为 1.98 GHz~2.58 GHz 和 2.06 GHz~2.58 GHz, 经过计算天线的相对带宽约 21%, 在 2.45 GHz 处 $S_{11} = -19.02$ dB, $S_{22} = -15.48$ dB。其中由 1.2 节可知: 天线仿真 1 端口和 2 端口的反射系数低于 -10 dB 的带宽范围为 1.9~2.83 GHz。实测天线通带的低频处基本和仿真吻合, 但实测天线通带的高频处相比于仿真要低。仿真和测试结果有差异的原因主要是介质基板本身的介电常数和仿真时的介电常数存在一定的偏差, 造成实测天线带宽减小而且出现了一定程度的中心频率偏移。在 2.45 GHz 处, 天线的端口隔离度实测为 -17.6 dB, 其中在 1.9~2.28 GHz 的范围内, 天线的端口隔离度均小于 -9.4 dB, 在 2.28~2.83 GHz 范围内, 天线的端口隔离度均小于 -15 dB。另外在 4.9 GHz 处, 1 端口和 2 端口回波损耗分别为 -1.84 dB 和 -0.69 dB; 在 7.35 GHz 处, 1 端口和 2 端口的回波损耗分别为 -1.54 dB 和 -1.5 dB。 S 参数测试和仿真结果存在一定误差, 这种误差主要是加工误差和 SMA 焊接误差导致的, 但仿真和实测图基本吻合。

由于天线本身对称的结构, 所以在方向图分析中仅考虑其中

一个端口, 即当一个端口激励起时, 另一个与其正交的端口应该有完全相同的方向图特性。图 8 和图 9 为天线在

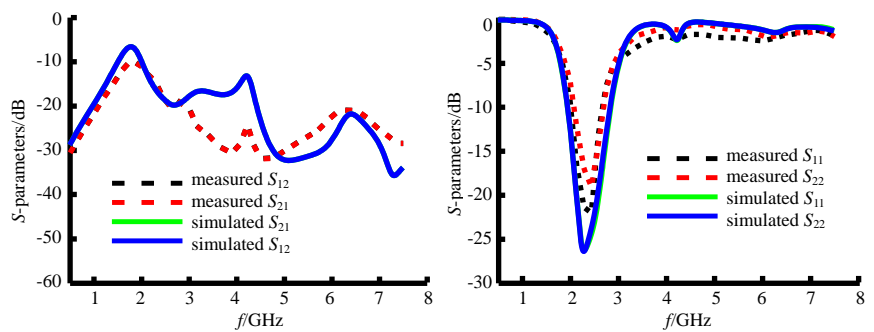


(a) top view of the antenna

(b) bottom view of the antenna

Fig.6 Photograph of the proposed antenna

图 6 天线实物加工图



(a) S_{21}, S_{12} simulation and measurement

(b) S_{11}, S_{22} simulation and measurement

Fig.7 Simulated and measured results of antenna S parameters

图 7 天线 S 参数仿真及实测结果

中心频率 2.45 GHz 处 $x-z$ 平面 ($\phi=0$) 与 $y-z$ 平面 ($\phi=90$) 的仿真和测试方向图。由图 8 和图 9 可以看出仿真和实测方向图有较小的差别, 仿真和实测基本吻合。

通过已知增益的标准喇叭天线, 利用对比法可得到待测天线的增益。在 2.45 GHz 处仿真增益 3.9 dBi, 实测增益 3.4 dBi, 其中天线的辐射效率为 89.1% (实测增益/仿真增益计算而得), 由于天线辐射效率和实测的增益有关, 而天线实测增益低于仿真值主要原因是天线自身的介

质损耗、表面金属损耗和一定的加工误差造成的, 所以在接下来的工作中会考虑采用损耗更小的基板和设计具有较高鲁棒性的天线, 来提高天线的辐射效率。

3 结论

本文设计了一款工作在中心频率为 2.45 GHz 具有谐波抑制功能的双极化天线, 该天线通过运用缺陷地结构, 在馈线上方开大小合适的槽线实现对二次和三次谐波的抑制, 实测结果与仿真结果基本吻合。该天线带宽较宽, 可以工作在复杂多变的环境中, 可避免加工误差带来的频偏。另外该天线具有双极化工作性能, 可以接收水平和垂直极化来波。当天线接整流电路时, 在面对来波时, 该天线可以在旋转一定角度的情况下, 仍然能接收电磁波, 使整流天线的整流效率保持在一定范围。因其具备双极化和谐波抑制的特点, 同时该天线剖面低, 易于加工, 所以该天线可应用于微波能量传输的领域中。

参考文献:

- [1] MCSPADDEN J O, FAN L, CHANG K. Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8 GHz rectenna[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1998, 46(12):2053–2060.
- [2] ALMONEEF T S, ERKMEN F, ALOTAIBI M A, et al. A new approach to microwave rectennas using tightly coupled antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(4):1714–1724.
- [3] OKBA A, TAKACS A, AUBERT H. Compact rectennas for ultra-low-power wireless transmission applications[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(5):1697–1707.
- [4] SUH Y H, CHANG K. A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(7):1784–1789.
- [5] 张全琪, 邓华超, 谭洪舟. 一种高效 2.45 GHz 低输入功率微带整流电路[J]. 电子技术应用, 2015, 41(5):60–62. (ZHANG Quanqi, DENG Huachao, TAN Hongzhou. Design of a high-efficiency 2.45 GHz rectifier for low-input-power energy harvesting[J]. Application of Electronic Technique, 2015, 41(5):60–62.)
- [6] AMIR N A, HAMZAH S A, RAMLI K N, et al. 2×1 microstrip patch array antenna with harmonic suppression capability[C]// 2016 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE). Langkawi, Malaysia: IEEE, 2016:272–276.
- [7] RAHIM P A I N, SAPUAN S Z, JENU M Z M. Harmonic suppression using rectangular defected ground structure[C]// 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEEES). Langkawi, Malaysia: IEEE, 2016:322–327.
- [8] 李君, 刘一麟, 李路, 等. 具有谐波抑制功能的宽带圆极化宽缝天线[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(1):101–104. (LI Jun, LIU Yilin, LI Lu, et al. Wideband circularly polarized slot antenna with harmonic suppression[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(1):101–104.)

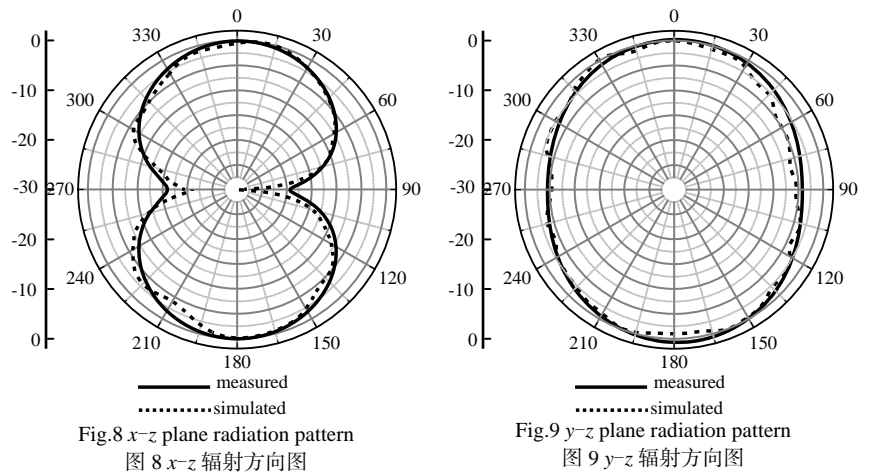


Fig.8 $x-z$ plane radiation pattern

图 8 $x-z$ 辐射方向图

Fig.9 $y-z$ plane radiation pattern

图 9 $y-z$ 辐射方向图