

文章编号: 2095-4980(2018)01-0101-05

具有谐波抑制功能的宽带圆极化宽缝天线

李 君, 刘一麟, 李 路, 黄卡玛, 杨 阳*

(四川大学 电子信息工程学院, 四川 成都 610021)

摘 要: 针对微波无线输能系统中接收天线质量轻、体积小、剖面低、易与微波电路集成的特点, 设计了一款新型的具有谐波抑制功能的宽带圆极化宽缝接收天线。通过在长方形缝隙中添加末端具有圆形贴片的交叉结构实现圆极化性能, 添加切角结构展宽圆极化带宽。在馈线上添加具有一定长度的开路支节, 配合使用缺陷地结构共同实现谐波抑制功能。研究并测试了天线的反射系数、轴比、增益以及远场辐射方向图, 仿真与实测基本吻合。仿真结果显示, 该天线很好地抑制了基频 5.8 GHz 的二次谐波和三次谐波, 在 4.5~6.2 GHz 的范围内 $S_{11} < -10$ dB, 相对阻抗带宽 31.8%; 基频 5.8 GHz 处的轴比 $AR=1.3$ dB, 在频率范围 4.2~6.15 GHz 内轴比 $AR < 3$ dB, 相对轴比带宽 37.7%; 基频 5.8 GHz 仿真增益 6.7 dB。

关键词: 缝隙天线; 圆极化; 谐波抑制; 宽带; 低剖面

中图分类号: TN823.24

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201801.0101

Wideband circularly polarized slot antenna with harmonic suppression

LI Jun, LIU Yilin, LI Lu, HUANG Kama, YANG Yang*

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

Abstract: In the microwave power transmission system, the receiving antenna has preferred to meet the requirements of light weight, small size, low profile, and easy integration with microwave circuits. A new type of wideband circularly polarized wide slot antenna with harmonic suppression is designed that can meet these requirements. The circular polarization performance is achieved by adding a cross structure having a circular patch at the end in the rectangular slot, and the chamfering structure broadens the circular polarization bandwidth. Adding an open section with a certain length on the feed-line and DGS(Defected Ground Structure) structure supports to achieve the harmonic suppression function. Considerable efforts have been devoted to study and test the reflection coefficient, axial ratio, gain and far field radiation pattern. The simulation results are in a good agreement with the measured results. The simulation results show that the antenna works well to suppress the second and third harmonics of the fundamental frequency at 5.8 GHz. The measured bandwidths for the relative impedance($S_{11} < -10$ dB) are 31.8%(from 4.5 to 6.2 GHz) and axial ratio ($AR < 3$ dB) 37.7%(from 4.2 to 6.15 GHz), respectively, and the antenna has a stable radiation pattern and a gain of 6.7 dB at a center frequency of 5.8 GHz.

Keywords: slot antenna; circularly polarized; harmonic suppression; wide-band; low profile

微波无线能量传输(Microwave Power Transmission, MPT)是利用微波波束将能量从发射端传送到接收端, 无需传输介质的一种能量传输方式, 作为新型能量传输方式, 具有传输损耗低、传输效率高、微波波束强和方向易于控制等优点。在提供移动目标动力领域, 以及太阳能卫星等领域应用广泛。利用微波无线能量传输系统为移动目标输能时, 通常情况下由于移动目标的体积小, 载重轻, 从而要求目标物体上作为能量转换装置的接收天线具有质量轻、体积小、易于与微波电路集成的特点。MPT 设备通常工作在 2.45 GHz 或 5.8 GHz, 为了减小系统的尺寸, 减小接收天线的体积和质量, 本文为工作在中心频率为 5.8 GHz 的 MPT 系统设计了接收天线。

收稿日期: 2017-09-06; 修回日期: 2017-10-19

基金项目: 装备预研教部联合基金(青年人才)资助项目(6141A02033506)

*通信作者: 杨 阳 email:yyang@scu.edu.cn

线极化发射天线与接收天线之间进行能量传输时,需要严格的极化对准,若接收天线移动或者旋转,由于极化损失,接收到的信号非常微弱。圆极化接收天线可以接收任意线极化电磁波,当天线移动或者旋转后对接收到的信号强度影响不大,基于此接收天线需要设计为圆极化天线^[1]。此外圆极化微带天线相比于线极化天线可以提供更好的抗干扰能力和防雨雾能力,可以接收不同极化方向的线极化波^[2]。天线轴线方向上的轴比是圆极化天线的基本电参数,轴比小于 3 dB 的带宽定义为天线的圆极化带宽。从本质上来说,圆极化特性是由激励起的 2 个相互正交的等幅简并模式产生的。圆极化天线的实现形式大致分为 3 种:单点馈电法、多点馈电法、多元法。单点馈电法有且仅有 1 个输入端口,结构简单,无需外加功分网络或移相网络,缺点为带宽较窄^[3-4];多点馈电方式是天线通过 2 个端口同时向辐射贴片馈电,激励起 2 个相位相差 90°,幅度相等的激励源实现的^[5-6],多点馈电法相比于单点馈电,具有宽带可以抑制交叉极化的优点,但是引入的功分网络、移相网络则使天线设计变得复杂;多元法则是利用多个线极化辐射单元,通过设计馈电网络实现圆极化性能,较之于多点馈电法具有馈电网络简单、增益较高的优点^[7]。本文设计的接收天线在为移动目标供能的应用背景下,要满足接收天线质量轻、体积小要求,因而选择使用单馈电端口实现圆极化特性。

传统单层板微带天线得到的圆极化带宽较窄,限制了其应用范围。常用增加带宽的方法主要有:a)使用阻抗匹配网络,如四分之一波长变换器、短接线和 Tchebyshev 多节匹配变换器等;b)采用寄生贴片,引入寄生谐振^[8];c)多样式的馈线结构以及宽缝结构,如 L 型馈电结构, E 型馈电结构^[9];d)超表面材料加载^[10]等。但使用匹配网络,超表面加载会增加天线尺寸和质量,不利于天线的小型化设计,也不利于与微带电路的集成。为了加宽接收天线的带宽,更加适用于复杂的空间环境,避免加工误差带来的频偏,本文利用宽缝天线作为天线设计原型,从而实现了宽带的性能。

在许多射频接收前端系统中,需要添加带通滤波器来抑制杂波。但是带通滤波器的体积庞大,成本较高,不但增大了设备的体积、质量,还引入了插入损耗,增加了能量的耗散。为解决这一问题,将滤波器功能与天线功能合二为一,具有谐波抑制功能的天线应运而生。滤波器功能与天线结合起来设计,在一定程度上增加了天线的设计难度,但减小了接收系统的体积,利于小型化设备的设计,降低了微带线损耗。通常实现谐波抑制功能的天线可以使用缺陷地结构、光子带隙结构^[11-12],文献[13-14]提出馈线上添加具有一定长度开路支节也可以实现谐波抑制的功能。

针对为移动目标供能的应用背景,设计了一种微带单馈电宽缝天线,在保证足够增益的同时,拥有较宽的阻抗带宽和 3 dB 轴比带宽,带宽覆盖 C 波段频率范围。同时通过在馈线添加开路支节,配合缺陷地结构实现了对基频 5.8 GHz 二次及三次谐波的抑制。该具有谐波抑制功能的圆极化宽带天线可以作为整流天线的接收天线部分,配合相应的整流电路可以作为高空移动目标的能量转换器件,从而将微波能转换为直流能量供移动目标的其他设备正常运行。

1 宽缝天线结构及参数

宽缝天线具有各种缝隙结构,如长方形、正方形、圆形以及三角形,宽缝天线具有缝隙天线宽带的优点;同时宽缝天线具有灵活、多形式的馈电结构,常见馈电结构有:L 型馈电结构、E 型馈电结构、蝴蝶型馈电结构。本文选择长方形缝隙结构以及 T 型馈电结构,通过仿真发现这种结构可以获得宽带特性。T 型馈电结构添加一段开路支节用来实现谐波抑制的功能,在 4.5~6.2 GHz 的范围内可以有效抑制二次三次谐波。同时使用末端具有圆形贴片的不等宽 L 型交叉支节实现圆极化性质^[15],并添加切角结构进一步加宽天线的轴比带宽。天线结构如图 1 所示,设计中采用介电常数为 2.65,损耗角正切为 0.001 的聚四氟乙烯介质板。介质板尺寸为 41 mm × 40 mm,介质板厚度 0.8 mm。经 HFSS 软件优化后,重要的参数值如表 1 所示。

仿真优化过程中发现,缝隙的周长即 $2 \times (L_2 + L_3)$ 的长度影响谐振频率以及频带宽度;圆形贴片及准 L 型交叉结构是形成圆极化性能的重要结构,调整圆形贴片的半径 R 以及不等宽交叉结构的宽度 L_4, L_7 ,可

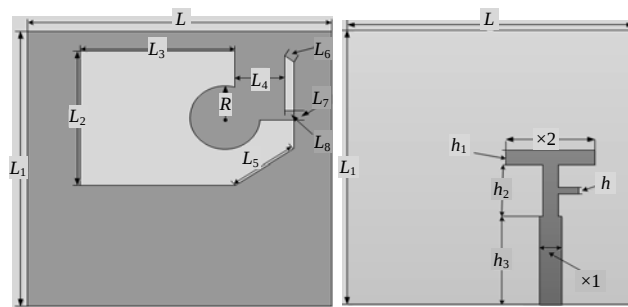


Fig.1 Antenna structure diagram
图 1 天线结构图

表 1 天线参数(单位: mm)

parameter	value	parameter	value
L	41.0	L_8	0.8
L_1	40.0	R	4.9
L_2	20.6	h	1
L_3	18.5	h_1	2
L_4	7.2	h_2	10.3
L_5	9.6	h_3	9.5
L_6	1.13	$\times 1$	2.2
L_7	0.6	$\times 2$	7.6

以实现轴比的偏移；添加切角结构并调节其长度 L_5 和 L_6 可以增加轴比带宽；谐波抑制功能主要是通过馈线上的开路支节实现，调节开路支节的宽度 h 和位置实现了对基频 5.8 GHz 二次谐波、三次谐波的抑制。注意 T 型馈电支节在圆形贴片下方。

2 结果及分析

加工天线，对比并分析仿真与实测结果，实物天线如图 2 所示。

利用 HFSS15.0 对设计的天线进行电磁仿真，实物天线回波损耗利用矢量网络分析仪进行测试。仿真及实测天线的回波损耗 S_{11} 见图 3。

由图 3 可以得出：在基频 5.8 GHz 处的反射系数 $S_{11} = -18.4$ dB，在基频 5.8 GHz 的二次谐波 11.6 GHz 处反射系数 $S_{11} = -1.42$ dB，基频 5.8 GHz 的三次谐波 17.4 GHz 处反射系数 $S_{11} = -1.96$ dB。在 4.5~6.2 GHz 范围内 $S_{11} < -10$ dB。在 6.8~18 GHz 频段内 $S_{11} > -2$ dB，实现了在频段 4.5~6.2 GHz 内，对该频段内频率的二次谐波和三次谐波的抑制。在对回波损耗的仿真过程中发现宽缝结构的缝宽是影响谐振频率偏移的最主要因素，在缝宽较小时，谐振频率出现在低频；增大缝宽，谐振频率向高频偏移。宽缝结构更容易实现宽带的特性。

天线轴比使用标准线极化喇叭辅助进行测试，这种测试方法基于椭圆极化波的分解理论，通过使用标准线极化喇叭辅助测试 3 个或多个不同极化角度的电平值，得到天线的总辐射方向图和天线的轴比值。仿真以及实测天线的轴比(AR)如图 4 所示。

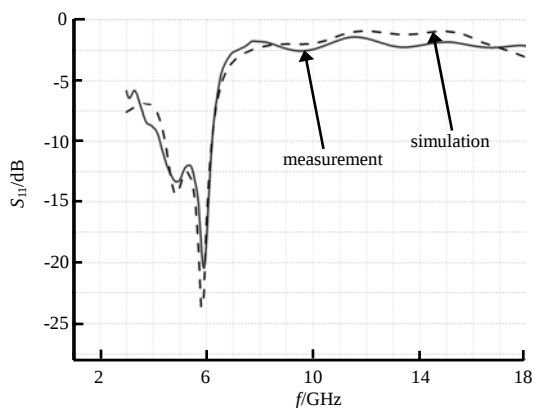


Fig.3 Simulated and measured results of antenna reflection coefficient
图 3 天线反射系数仿真及实测结果

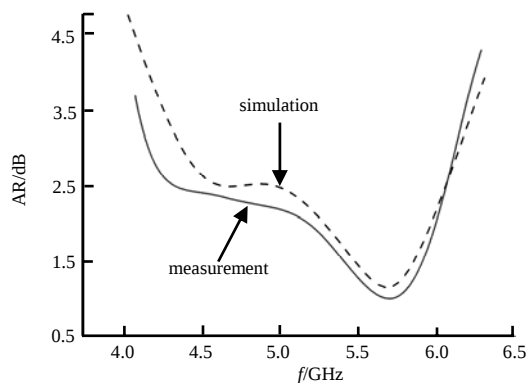
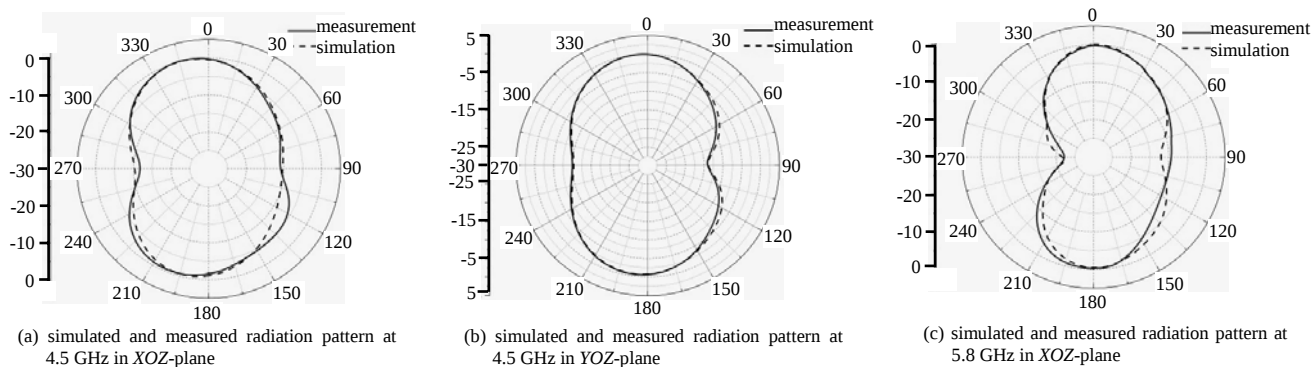


Fig.4 Simulated and measured results of axial-ratio for the antenna
图 4 天线轴比仿真及实测结果

由图 4 可以得出，在 4.2~6.15 GHz 频带范围内，轴比都小于 3 dB，经计算相对轴比带宽为 37.7%。仿真过程中发现在末端具有圆形贴片的准 L 型交叉结构是产生圆极化性能的主要原因，改变 L 型交叉结构以及圆形贴片的半径可以实现轴比的频率偏移。添加 2 个切角结构增加了轴比带宽。

图 5 为阻抗带宽和轴比带宽重叠部分，即 4.5~6.15 GHz 的频带范围内的仿真以及实测方向图。



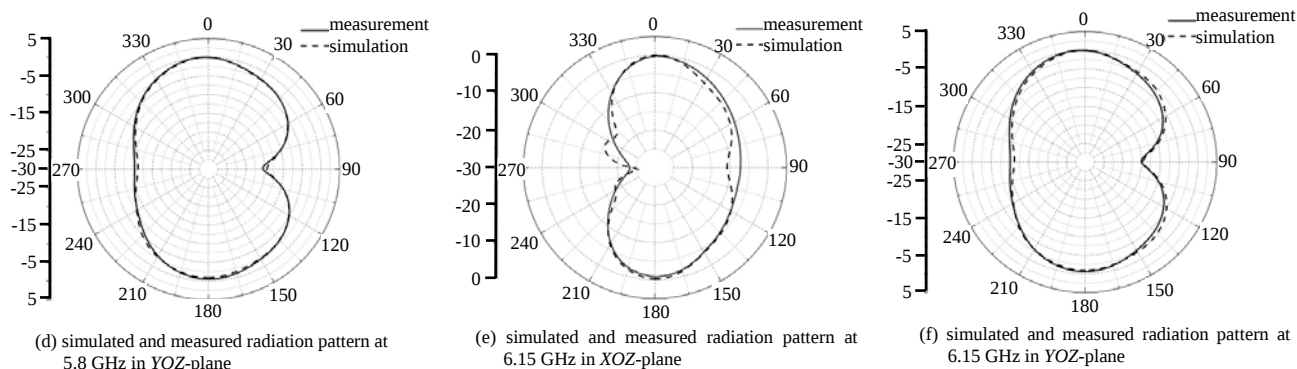


Fig.5 Frequency radiation patterns
图 5 各频点方向图

由图 5 的方向图可以看出仿真和实测方向图有细微差别,造成这一现象的原因是由于天线加工误差,以及实物天线介质基板介电常数与仿真使用的基板介电常数不一致引起的。

图 6 给出了实测增益随频率变化的曲线。天线增益的测试是通过标准喇叭利用对比法测量得到的。在基频 5.8 GHz 处仿真增益 6.7 dB,实测增益 6.4 dB,实测低于仿真的原因是由于电磁波在空间传输过程中的损耗,天线介质损耗和导体损耗都将使实测增益低于仿真增益。

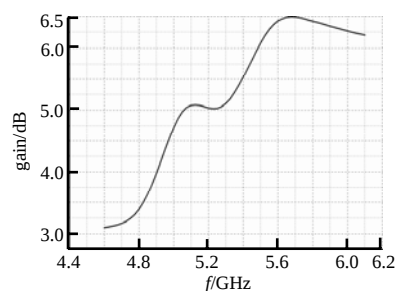


Fig.6 Gain of antenna versus frequency
图 6 天线增益随频率变化曲线

3 结论

本文设计了一款工作在中心频率为 5.8 GHz,具有谐波抑制功能的宽带圆极化宽缝天线,实测结果与仿真结果基本吻合。该天线具有宽带特性,在 4.5~6.2 GHz 范围内 $S_{11} < -10$ dB;在 4.2~6.15 GHz 频带范围内, $AR < 3$ dB;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。另外该天线具有圆极化工作性能,可以接收不同极化方向的线极化来波,不会产生由于发射端与接收端没有极化对准而引起能量损失问题。此外该天线具有剖面小,单层结构,易于与电路结合的特点,之后可设计与之相匹配的整流电路,两者结合起来,构成整流天线,从而作为移动目标功能器件。相比于传统为移动目标提供能量的太阳能电池板、燃料电池等,具有持续工作时间长、质量轻、体积小的优点,具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] CHEN Z F, XU B, HU J, et al. A CP-fed broadband circularly polarized wide slot antenna with modified shape of slot and modified feeding structure[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2016, 58(6):1453-1457.
- [2] SIM C Y D, WENG W C, CHANG M H, et al. Annular-ring slot antenna designs with circular polarization radiation[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2015, 25(4):337-345.
- [3] GAUTAM A K, BENJWAL P, KANAUIA B K. A compact square microstrip antenna for circular polarization[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2012, 54(4):897-900.
- [4] KU C, CHEN H D, HAN T Y, et al. Compact size annular-ring slot antenna with broad circularly polarized bandwidth[C]// 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2015:578-579.
- [5] LAU K L, LUK K M. A novel wide-band circularly polarized patch antenna based on L-probe and aperture-coupling techniques[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(1):577-582.
- [6] LO W K, CHAN C H, LUK K M. Bandwidth enhancement of circularly polarized microstrip patch antenna using multiple L-shaped probe feeds[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2004, 42(4):263-265.
- [7] LU Y, FANG D G, WANG H. A wideband circularly polarized 2×2 sequentially rotated patch antenna array[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(6):1405-1407.
- [8] ELLIS M S, ZHAO Z, WU J, et al. A novel simple and compact microstrip-fed circularly polarized wide slot antenna with wide axial ratio bandwidth for C-band applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(4):1552-1555.

(下转第 109 页)