

应用于智能交通系统的小型化圆极化微带天线^{*}

李 波 李荣强 刘俐君

(成都信息工程大学 电子工程学院 成都 610225)

摘 要: 提出了一种应用于智能交通系统的小型化圆极化微带天线。该天线由一个开缝的方形贴片及围绕方形贴片的两级寄生贴片组成,通过模式解调实现圆极化,并利用寄生贴片增加带宽和提高天线增益。测试结果表明,天线的-10 dB 阻抗带宽为 10.9%,3 dB 轴比带宽为 2.7%,在中心频率 5.8 GHz 处的增益为 5.4 dBi,交叉极化不低于 21 dB。天线尺寸为 25 mm×25 mm×1.6 mm,与其它应用于智能交通系统的天线相比,该天线具有更小的平面尺寸。

关键词: 智能交通系统 模式解调 小型化 圆极化 寄生贴片

Miniaturized Circularly Polarized Microstrip Antenna for Intelligent Transportation System

LI Bo, LI Rong-qiang, LIU Li-jun

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: A miniaturized circularly polarized microstrip antenna suitable for intelligent transportation system (ITS) is presented. The antenna consists of a slotted square patch and two-stage parasitic patches surrounding the square patch. Circular polarization is achieved by mode demodulation, and parasitic patches are used to increase bandwidth and improve antenna gain. The measurement results show that the proposed antenna has a good performance with -10 dB impedance bandwidth of 10.9%, 3 dB axial ratio bandwidth of 2.7%, 5.4 dBi gain at the center frequency of 5.8 GHz, and the cross-polarization is not less than 21 dB. The size of antenna is 25 mm×25 mm×1.6 mm, which is smaller than other antennas applied in ITS.

Key words: intelligent transportation system, mode demodulation, miniaturization, circular polarization, parasitic patch

引 言

智能交通系统结合了多种先进科学技术,实现了高效运输和管理。随着智慧城市的发展,智能交通成为当前研究热点,尤其是智能交通系统通信设备的小型化研究。天线作为通信设备最前端的部件,其小型化研究也势在必行。根据欧洲的 EN12253 标准,应用于智能交通系统中的天线需满足以下条件:工作频率为 5.8 GHz,极化方式为左旋圆极化,具有较宽的波瓣宽度,交叉极化不低于 15 dB^[1]。

在智能交通系统的专用短程通信环境中,天线工作在圆极化状态时,能有效避免天线间的极化失配。这是由于圆极化天线可以接收任意极化方式的电磁波,并且发射的电磁波也可被任意极化方式的天线所接收。微带天线具有剖面低、易集成和加工成本低廉的特点,在智能交通系统和无线通信系统中得以广泛使用。微带天线实现圆极化的方式可分为单馈电法^[2]、双馈电法^[3]和四馈电法^[4]。单馈电可通过切角、开槽、曲流、增加调谐枝节等形式产生两个在空间上正交、相位上相差 90°的简并模来实现圆极化,而双馈电与四馈电则是利用正交馈电的

* 收稿日期: 2019-02-18; 修回日期: 2019-04-06

基金项目: 国家教育部产学研合作协同育人项目(201801238027); 四川省科技厅重点研发项目(2019YFG0087); 成都信息工程大学科研基金(J201602); 成都信息工程大学创新创业项目“兼容 GPS 与北斗卫星导航系统的阵列天线设计”

方式来实现圆极化。当前学者们已经运用此类技术设计了多种应用于智能交通系统领域的天线^[5-9], 这些天线都满足智能交通系统的通信指标要求, 但是尺寸普遍偏大, 不利于设备的小型化。

本文提出了一种用于 5.8 GHz 智能交通系统的小型化圆极化微带天线, 该天线利用间隙耦合技术增加阻抗带宽和提高天线增益, 实现的天线尺寸为 25 mm×25 mm×1.6 mm。与前述相同应用领域的圆极化天线相比, 该天线具有更小的尺寸。

1 天线结构和设计原理

天线结构如图 1 所示, 天线采用厚度为 1.6 mm 的 FR4 介质基板, 其介电常数为 4.4, 损耗角正切为 0.02。天线利用 50Ω 同轴探针馈电, 馈电点位于边长为 L 的方形贴片的对角线上, 方形贴片的大小可从式 (1) 得出:

$$L = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_e}f} \quad (1)$$

其中 c 为真空中的光速; f 为谐振频率; ε_e 为有效介电常数; L 是方形贴片的大小。

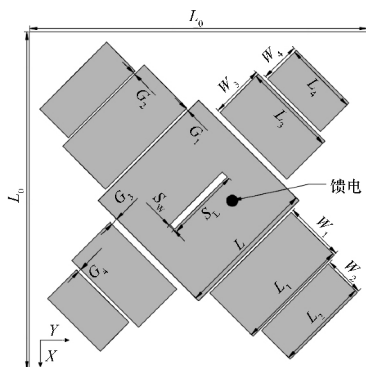


图 1 天线结构

方形贴片中心开一个长为 S_L 、宽为 S_W 的矩形缝隙, 调节缝隙的尺寸可改善轴比带宽。沿着平行于缝隙的方向放置一块距离方形贴片为 G_1 的一级寄生矩形贴片, 其长为 L_1 、宽为 W_1 。此外, 在垂直于缝隙的方向, 以 G_3 的距离放置长为 L_3 、宽为 W_3 的另外一级寄生矩形贴片, 通过改变 G_1 和 G_3 的大小, 可调节天线的阻抗带宽与匹配。以相似的方式增加二级寄生矩形贴片, 其尺寸分别为 $W_2 \times L_2$ 、 $W_4 \times L_4$, 而且耦合缝隙的间距为 G_2 、 G_4 , 通过调节缝隙的距离, 不仅能够改善天线的阻抗匹配, 还可以增加阻抗带宽和轴比带宽。分析表明, 寄生贴片除了可以增加天线的带宽和提高增益, 还可以提升辐射效率和极化纯度。

运用腔体模型理论对方形贴片进行分析, 在方形贴片对角线馈电可将基本的 TM_{11} 模式解调为两个正交的简并模式, 这两种模式主要为 TM_{10} 模和 TM_{01} 模。各模式对应的谐振频率为:

$$f_{mn} = \frac{c}{2\sqrt{\varepsilon_e}} \sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{L}\right)^2} \quad (2)$$

式中: c 为光速; f_{mn} 为谐振频率; ε_e 为有效介电常数, L 是方形贴片的边长。这两种模式的电流幅度相等, 而缝隙的引入使得两个相互正交的模式在相位上相差 90° , 从而形成产生圆极化的条件。缝隙的大小可改变不同频率的轴比情况, 由此在 $+Z$ 方向产生圆极化辐射。

另外, 各个贴片之间的耦合相当于电容加载, 间隙的大小可以影响天线的阻抗带宽, 随着耦合能量值由内向外呈递减趋势, 寄生贴片的尺寸也在逐渐减小, 并且间隙大小根据耦合能量来确定。

为了进一步说明圆极化的工作原理, 图 2 给出了天线在 5.8 GHz 时相位为 0° 和 90° 的贴片表面电流分布。由图可知, 在相位为 0° 、 90° 时, 辐射贴片上的电流幅度相等且在空间上正交, 并且电流随时间按顺时针方向旋转, 由此形成左旋圆极化 (Left-Hand Circular Polarization, LHCP) 辐射。

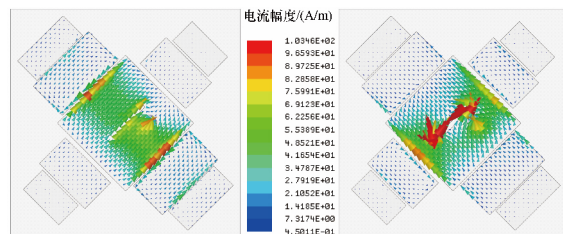


图 2 在 5.8 GHz 频率上仿真的天线表面电流分布

(彩色图片参见本刊电子版)

2 天线优化设计分析

图 3 为天线两级贴片耦合过程结构图, #1 为无寄生贴片耦合, #2 为一级寄生贴片耦合, #3 为两级寄生贴片耦合。寄生贴片围绕中心方形贴片放置, 由于中心方形贴片谐振时对应的工作模式主要为 TM_{10} 模和 TM_{01} 模, 故沿着基板的对角线方向, 每对相对的寄生矩形贴片与中心贴片的其中一个工作模式相关联, 确保了极化的纯度。

加载寄生贴片的作用除了体现在带宽和增益上, 对圆极化的覆盖角度范围也有改善, 其具体结果如图 4、5、6 和 7 所示。

由图 4 可知, 在方形贴片四周引入第一级矩形

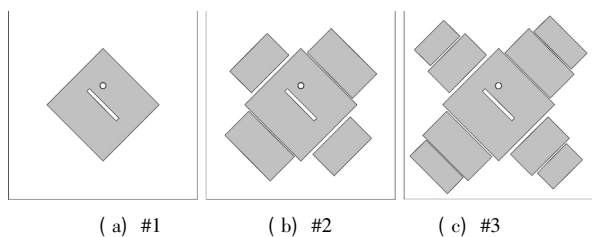


图3 贴片耦合设计结构图

寄生贴片后,通过弱耦合的方式形成能量的过渡,分别在高频和低频产生两个谐振频点,展现了天线高频和低频部分的带宽。第二级寄生贴片的作用主要体现在低频段带宽的扩展。

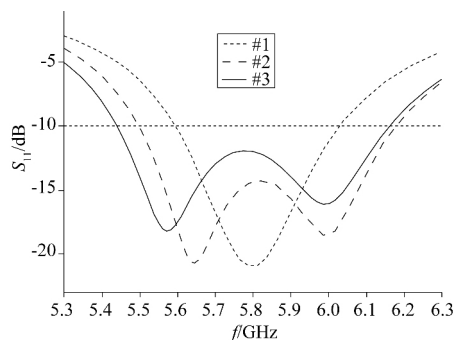


图4 天线的S参数

同时,引入寄生贴片对天线的轴比也有改善,由图5加入两级寄生贴片可拓宽轴比带宽70 MHz,并提高天线极化纯度。由图6中E面的轴比曲线可知,加入两级寄生贴片的天线,其3 dB轴比可覆盖整个上半空域,能在宽的俯仰角范围内实现圆极化辐射。

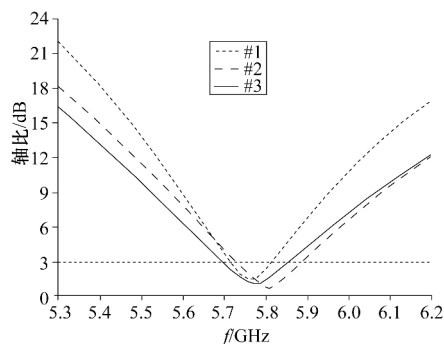


图5 寄生贴片对天线轴比带宽的影响

图7为5.8 GHz时天线增益方向图曲线,由于寄生贴片的引入,提高了天线的孔径利用效率,增加了天线的增益,三种情形下天线的增益分别为5.04 dBi、5.44 dBi和5.59 dBi。

通过上述分析,并使用电磁仿真软件继续对天线参数优化,优化后的天线尺寸如表1所示。

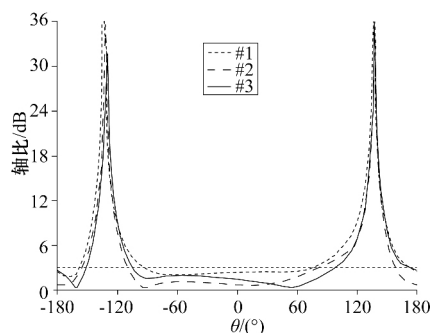


图6 天线在E面的轴比

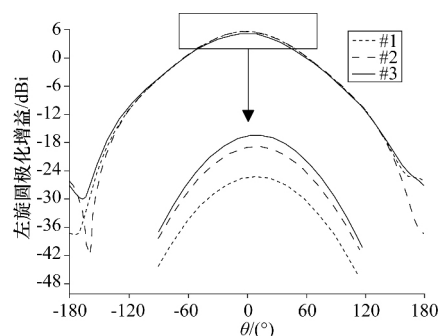


图7 天线的增益

表1 天线结构尺寸 mm

L	L_1	L_2	L_3	L_4	S_L	W_1	W_2
10.5	8.5	7	7	5.5	5.5	4.5	3
W_3	W_4	G_1	G_2	G_3	G_4	S_W	L_0
4	3	0.2	0.15	0.5	0.25	0.5	25

3 仿真与结果测试分析

基于上述设计,对天线进行了实物加工,如图8所示。用型号为Rohde&Schwarz ZVB 20的矢量网络分析仪测试了天线的S参数,结果见图9。

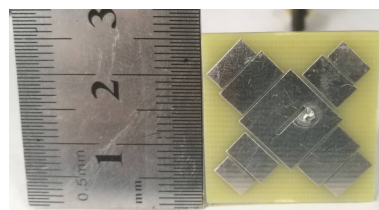


图8 天线实物图

图9表明,仿真的-10 dB阻抗带宽为5.44~6.16 GHz,相对带宽达到了12.4%。而测试的-10 dB阻抗带宽为5.57~6.21 GHz,相对带宽为10.9%。从图中还可以看出,天线的实测S参数与仿真结果基本一致。与仿真曲线相比,实测曲线略向高频偏移,实测带宽缩减了约90 MHz,其差异可能是因为天线的构造误差以及焊接点的影响。

图10给出了天线轴比仿真和测试结果。由图

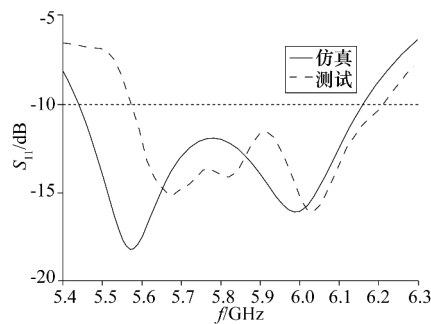


图 9 天线 S 参数仿真和测试结果

可知,天线仿真中法向上轴比低于 3 dB 的频率范围为 5.69~5.86 GHz,测试轴比低于 3 dB 的频率范围为 5.71~5.87 GHz,完全位于阻抗带宽(5.57~6.21 GHz)内。

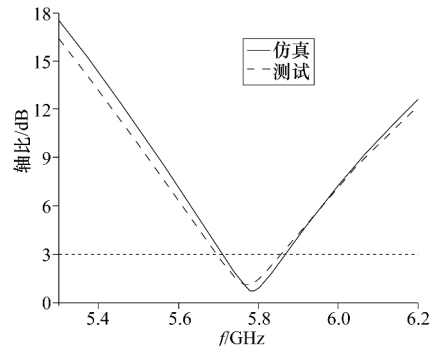


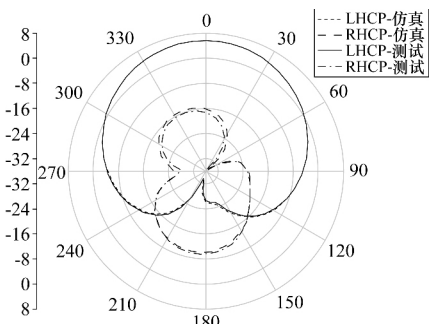
图 10 天线轴比仿真和测试结果图

图 11 为天线在中心频率 5.8 GHz 的仿真与测试的增益方向图,天线的主极化为左旋圆极化,交叉极化为右旋圆极化(Right-Hand Circular Polarization, RHCP)。从图中可以看出,E 面和 H 面的仿真与测试结果基本一致,具有良好的单向辐射特性,辐射方向图对称,E 面和 H 面 3 dB 波瓣宽度约为 90°,其交叉极化大于 21 dB,测试增益为 5.4 dBi。

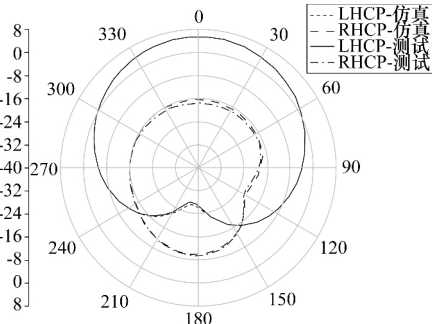
为了进一步说明本文所设计天线的优点,表 2 比较了本设计与参考文献中用于智能交通系统的微带天线的一些主要性能参数。由表 2 可知,本文所设计的天线在满足智能交通系统通信质量要求的情况下,具有更小的平面尺寸,实现了天线的小型化。

表 2 应用于 ITS 的小型化圆极化天线的比较

参考文献	介电常数	尺寸/(mm ²)	增益/dBi	-10dB 阻抗/GHz	3dB 轴比/GHz
[5]	4.6	32×30	—	5.35~6	5.6~6
[6]	4.6	40×40	4.68	5.6~6.05	5.75~5.85
[7]	4.6	45×45	8.25	4.92~6.58	5.3~6.2
[8]	4.6	60×60	6.9	5.33~6.27	5.74~5.86
[9]	4.5	40×60	5.52	5.6~6	—
本文	4.4	25×25	5.4	5.57~6.21	5.71~5.87



(a) E 面



(b) H 面

图 11 5.8 GHz 频率上天线仿真与测试的增益方向图

4 结论

设计了一款用于智能交通系统的小型化单层圆极化微带天线,为了满足宽波束、左旋圆极化和交叉极化的要求,开发了基于二级寄生负载的设计,实现天线的平面尺寸为 25 mm×25 mm(0.48λ₀×0.48λ₀,λ₀为中心频率 5.8 GHz 对应的波长),比同类天线更小。该天线满足系统指标要求,适用于小型化的智能交通系统。

参 考 文 献

(1) European Telecommunications Standards Institute. Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM), Road Transport and Traffic Telematics (RTTT), ETSI EN 300674-2-2 V1.1.1 (2004-08) [S], July 1, 2016

(2) Maddio S, Cidronali A, Magrini I, et al. A design method for single-feed wideband microstrip patch antenna for switchable circular polarization [A]. IEEE European Microwave Conference [C], 2007. 262-265

(3) Bao X L, Ammann M J. Dual-frequency circularly-polarized patch antenna with compact size and small frequency ratio [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(7): 2104-2107

(4) Nasimuddin N, Qing X M, Chen Z N. A compact dual-

- band circularly polarized antenna for satellite systems [A]. Proceeding of 2017 IEEE Region 10 Conference (TENCON) [C], 2017. 2374-2377
- (5) Megnet D, Mathis H. Circular polarized patch antenna for 5.8 GHz dedicated short-range communication [A]. IEEE 2009 European Microwave Conference [C], 2009. 638-641
- (6) Leonardi O, Pavone M G, Sorbello G, et al. Compact single-layer circularly polarized antenna for short-range communication systems [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2014, 56(8): 1843-1846
- (7) Maddio S. A compact wideband circularly polarized antenna array for C-band applications [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1081-1084
- (8) Aissat H, Cirio L, Grzeskowiak M, et al. Reconfigurable circularly polarized antenna for short-range communication systems [J]. IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(6): 2856-2863
- (9) Isernia T, Sorbello G, Leonardi O, et al. Monolithic patch antenna for dedicated short-range communications [J]. Electronics Letters, 2013, 49(2): 85-86

李波 男, 1993年生, 硕士生。主要研究方向: 微波毫米波电路与系统。

E-mail: throbb@163.com

李荣强 男, 1977年生, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向: 天线理论与技术, 微波毫米波电路与系统。

E-mail: liyq2011@cuit.cn

刘俐君 男, 1981年生, 工程师。主要研究方向: 高压线路绝缘。

E-mail: 65111833@qq.com

(上接第65页)

- (7) Yang Z, Huang J J, Wu W W, et al. An antipodal Vivaldi antenna with band-notched characteristics for ultra-wideband applications [J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2017, 76: 152-157
- (8) 刘洪喜, 高军, 曹祥玉. 一种基于开口谐振环的高增益端射天线设计 [J]. 物理学报, 2015, 64(23): 234101
- Liu H X, Gao J, Cao X Y. A design of high-gain end-fire antenna based on split-ring resonator structures [J]. Acta Phys. Sin., 2015, 64(23): 234101
- (9) 唐海波, 刘涌, 孙厚军. 一种电阻加载的侧馈对拓 Vivaldi 天线 [J]. 微波学报, 2012, 28(S3): 153-156
- Tang H B, Liu Y, Sun H J. A resistance-loaded side-feeding antipodal Vivaldi antenna [J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(S3): 153-156
- (10) Kumar Pandey G, Kumar Meshram M. A printed high gain UWB Vivaldi antenna design using tapered corrugation and grating elements [J]. Int J RF Microw Comput Aided Eng., 2015, 25: 610-618
- (11) Huang D, Yang H, Wu Y, et al. A high-gain antipodal Vivaldi antenna with multi-layer planar dielectric lens [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2018, 32(4): 403-412
- (12) Isbell D E. Log periodic dipole arrays [J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1960, 8(3): 260-267
- (13) Chan K, Silvester P. Analysis of the log-periodic V-dipole antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 23(3): 397-401
- (14) Wolter J. Solution of Maxwell's equations for log-periodic dipole antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1970, 18(6): 734-741
- (15) 叶国华. 机载宽带 Vivaldi 天线及组阵技术的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014
- Ye G H. Research on airborne broadband Vivaldi antenna and array technology [D]. Chengdu: University of Electronic and Technology of China, 2014

唐尧 男, 1986年生, 硕士生。主要研究方向: 端射天线、高增益 Vivaldi 天线等。

E-mail: lucifier863@163.com

曹祥玉 女, 1964年生, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 天线与电磁兼容、电磁超材料、计算电磁学等。

高军 男, 1962年生, 教授, 硕士生导师。主要研究方向: 电磁散射理论、电磁超材料、天线设计等。