

一种新颖的宽带圆极化单极天线

李振亚* 竺小松 张建华

(国防科技大学电子对抗学院 合肥 230037)

摘 要: 该文设计了一种新颖的宽带圆极化单极子天线, 该天线采用微带馈电模式。天线由C型贴片和改进的地板组成, 整个天线尺寸仅为 $25 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$ 。通过在C型贴片上切角和在地板上增加三角形微扰结构, 可以有效增加天线的阻抗带宽和轴比带宽。该文给出了天线的设计流程, 从表面电流分布分析了圆极化天线的工作机理。加工了天线实物, 并对其进行了测量。仿真和实测结果表明天线具有超宽的阻抗带宽和轴比带宽。天线的工作频带为 $4.35 \sim 12 \text{ GHz}$ (相对带宽为93.6%), 3 dB轴比带宽为 $4.15 \sim 11.8 \text{ GHz}$ (相对带宽为95.9%)。测量了天线的辐射性能和增益特性, 实测结果与仿真结果吻合较好, 证明了该天线的有效性。该天线可以应用于超宽带无线通信系统和卫星通信系统中。

关键词: 单极子天线; 轴比; 超宽带; 圆极化

中图分类号: TN821

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)11-2705-07

DOI: 10.11999/JEIT180094

A Novel Broadband Circularly Polarized Monopole Antenna

LI Zhenya ZHU Xiaosong ZHANG Jianhua

(Institute of Electronic Countermeasure, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: A novel broadband circularly polarized monopole antenna is proposed by microstrip feed line. The antenna is composed of C-shaped patch and an improved ground plane with the overall size of $25 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$. The impedance bandwidth and axial ratio bandwidth of the antenna can be effectively widened by cutting the corner on the C-shaped patch and adding triangular stubs on the ground plane. The design procedure of the antenna is given, and the working mechanism of the circularly polarized antenna is analyzed from the surface current distributions. Besides, the antenna is fabricated and measured. Simulated and measured results show that the antenna has ultra wide impedance bandwidth and axial ratio bandwidth. The operating bandwidth of the antenna is $4.35 \sim 12 \text{ GHz}$ (relative bandwidth 93.6%), and the 3 dB axial ratio bandwidth is $4.15 \sim 11.8 \text{ GHz}$ (relative bandwidth 95.9%). At the same time, the radiation performance and gain characteristics of the antenna are measured and the measured results are in good agreement with the simulated results, which proves the effectiveness of the antenna. The antenna can be applied to Ultra-WideBand (UWB) wireless communication systems and satellite communication systems.

Key words: Monopole antenna; Axial ratio; Ultra WideBand (UWB); Circularly polarized

1 引言

近年来, 随着现代无线通信和卫星导航通信的迅猛发展, 圆极化天线的作用越来越凸显^[1]。圆极化天线相比线极化天线有其天然的优势, 具有多径反射能力和极化易匹配特性, 抗干扰能力强, 即使在恶劣的雨雾天气下也能较好地工作^[2]。传统的微带天线通常采用单点馈电和多点馈电法来实现圆极

化性能, 虽然能够实现圆极化特性, 但是其轴比带宽一般比较窄, 多点馈电法也较为复杂, 加之微带天线本身的带宽也比较窄, 很难应用于宽带圆极化天线系统中。为了获得更大的系统容量, 消除极化失配的影响, 实现高数据传输, 宽带圆极化天线已经成为了天线领域的热点研究方向^[3,4]。因而, 设计一款多频带、宽带圆极化天线是很有必要的。

单极子天线易于实现超宽带功能, 特别是近些年, 超宽带单极子天线的研究呈井喷态势, 各种具有小型化^[5,6]、陷波^[7,8]、共形特性^[9]的超宽带单极子天线层出不穷。但是, 对于具有圆极化特性的超宽带单极子研究相对较少, 如何在超宽带单极子天线

收稿日期: 2018-01-23; 改回日期: 2018-07-13; 网络出版: 2018-07-27

*通信作者: 李振亚 lizhenya7189@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671454)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61671454)

的基础上设计具有更宽轴比的圆极化天线引起了科研人员的广泛关注^[10-17]。文献[10]提出了一种月牙形的圆极化单极子天线,整个天线的阻抗带宽和轴比带宽都比较小。文献[11]提出了一种宽带圆极化单极子天线,通过在地板上增加一个方形贴片和开口环寄生贴片单元,实现了宽带圆极化特性,轴比带宽可以达到4.14 GHz,相对带宽为65.2%。文献[12]通过在单极子贴片周边对应的地板上增加两个对称的扰动螺旋结构,得到了轴比2.2 GHz的圆极化天线,且结构较为复杂。文献[13]设计了一款双频带圆极化天线,整个结构不仅复杂,而且两个轴比带宽均比较窄。文献[14]提出了一种树枝型结构的圆极化单极子天线,天线除了设计复杂外,轴比也只有59.1%。文献[15]提出了一种共面波导馈电的宽带圆极化天线,天线地板采用非对称结构,同时在辐射贴片单面增加一个开口环,实现了宽带圆极化特性,轴比达到了63.3%。文献[16]采用一种C型辐射贴片,并且在辐射贴片上嵌入缝隙,同时也在地板上增加两个不同大小的三角形结构,实现了宽带圆极化特性,虽然轴比带宽较宽,达到了4.5 GHz,但是结构设计较为复杂。文献[17]提出了一种双圆极化MIMO天线,天线虽然实现了圆极化特性,但是整个天线的尺寸比较大,无法满足小型化要求,轴比带宽也仅为80.7%。

本文提出了一款具有超宽轴比特性的宽带圆极化天线。天线采用微带馈电模式,天线不仅设计简单,而且结构非常紧凑,整个天线的尺寸仅为 $25 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$ 。天线由C型辐射贴片和改进后的方形金属底板组成,通过在C型贴片上切角和在地板上增加三角形扰动结构,天线的阻抗带宽和轴比带宽进一步增加,整个天线阻抗带宽达到了4.35~12 GHz,轴比带宽为4.15~11.8 GHz,相对轴比带宽达到了

95.9%。该天线具有非常宽的阻抗带宽和轴比带宽,适合应用于超宽带圆极化通信系统和X波段卫星导航系统中。

2 天线的设计与分析

2.1 天线的结构和设计流程

图1即为所设计的宽带圆极化单极天线结构示意图。天线的整个尺寸为 $25 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$,选用FR4介质板材,介电常数为4.4,损耗角正切值为0.02,介质板厚度为1 mm。天线采用微带馈电的方式,辐射贴片和金属底板分别印制于介质板正反两面。辐射贴片为C型环结构,在圆环与馈电结构的交界处开了一个小三角结构,金属底板则是在长方形贴片上增加了一块三角形的贴片结构。馈电结构的设计采用了阶梯阻抗变换的原理,可以增加阻抗带宽。采用HFSS15高频仿真软件,通过对天线的参数进行优化设计,最终得到宽带圆极化天线的具体尺寸如表1所示。

图2给出了天线的设计流程。基础的天线是一个圆环形单极子天线,如天线1所示,接着在天线的圆环形贴片上切掉1/4圆环,如天线2所示,然后在天线的地板上增加一个三角形的结构,相当于一个扰动结构,可以起到改变电流流动的作用,对圆极化的形成起到关键作用,最后在圆环辐射贴片和微带馈线的结合部位切角,可以增加阻抗带宽和轴比带宽,如天线4所示。

仿真得到的反射系数和轴比曲线如图3所示。从图中可以看到,天线1整体的阻抗带宽比较窄,在12.8 GHz附近轴比小于3 dB,轴比带宽非常窄。天线2相比天线1工作频率向高频移动,轴比在5 GHz左右低于3 dB。天线3的整个阻抗带宽大幅度增加,同时轴比也在很宽频带范围内降到3 dB以下,

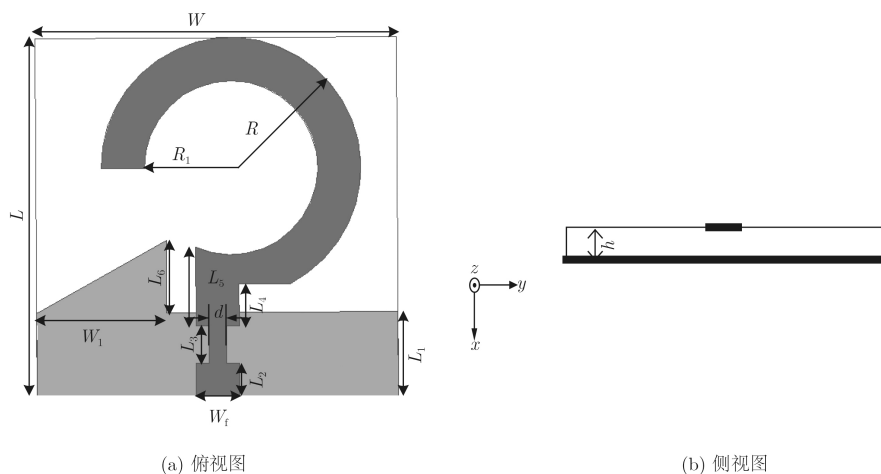


图1 天线结构图

表 1 优化后的天线单元尺寸(mm)

L	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
25.0	6.0	2.5	2.6	2.86	5.45	5.0
W	W_1	W_f	R	R_1	d	
25.0	9.0	3.0	9.0	6.0	1.2	

可以看出，三角形微扰结构对圆极化特性的形成起到了至关重要的作用。通过在辐射贴片上切角，天线的 3 dB轴比带宽进一步增加。最终仿真得到的天线工作频率为4.35~12 GHz, 3 dB轴比带宽为4.15~11.8 GHz, 具有宽带圆极化特性。

2.2 三角形结构对天线反射系数和轴比的影响

在天线其他尺寸保持不变的情况下，仿真了天线反射系数和轴比随三角形结构 L_6 和 W_1 的变化，如图4所示。本文做了大量的参数值优化，但是为了便于观察，只选取了参数优化中的3条曲线。改变 L_6 的大小，得到的反射系数和轴比结果如图4(a)和图4(b)所示。当 L_6 分别取4.5 mm, 5.0 mm和5.5 mm时，天线的反射系数变化不大，天线的轴比在低频处基本不变，在高频处变化比较大。当 $L_6 = 5.0$ mm时，天线轴比带宽取到最大。同样的，仿真了不同 W_1 条件下的天线反射系数和轴比变化曲线，如图4(c)和图4(d)所示。从图中可以看出，当 W_1 分别取8.5 mm, 9.0 mm和9.5 mm时，随着 W_1 的增加，天线高频处的匹配变好，阻抗带宽增加，但是轴比带

宽并未一直增加。当 $W_1 = 9.0$ mm时，天线轴比带宽取到最大。因而通过仿真优化分析，在综合考虑了天线阻抗带宽和轴比带宽同时达到最大的条件下，最终选取了参数 $L_6 = 5.0$ mm和 $W_1 = 9.0$ mm。

2.3 切角深度对天线反射系数和轴比的影响

图5给出了天线反射系数和轴比随天线切角深度的变化曲线。取切角深度 L_4 分别为2.5 mm, 3.0 mm和3.5 mm，由图5可以看出，随着切角深度的增加，即 L_4 的变大，天线的阻抗工作频率逐渐向低频方向移动，总的阻抗带宽在变小；天线轴比带宽随切角深度的增加有增加的趋势，但是切角深度的不断增加会引起低频处的轴比波动，如图中 $L_4=3.5$ mm所示。考虑到天线阻抗带宽和轴比带宽必须相互对应，天线才可以较好地工作在圆极化状态，在进一步细化参数值 L_4 优化分析和综合考虑天线阻抗带宽和轴比带宽后，得到了表1所示的天线最终优化参数。

通过上文可以看出，天线的反射系数和轴比特性受三角形结构、切角深度的影响较大。天线的反射系数与天线的输入阻抗息息相关，天线结构尺寸的改变必然会引起输入阻抗的变化进而影响到天线的反射系数。天线要想产生圆极化效果，前提是产生两种正交的等幅度电场。当天线地板未增加三角形结构的时候，天线地板上几乎只存在纵向电流，横向电流左右相互抵消，天线的轴比带宽非常有限。增加三角形结构，天线地板上同时存在两种正交的

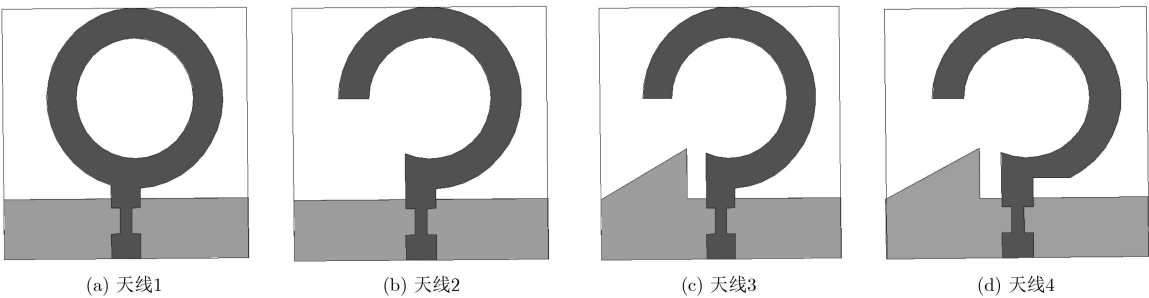


图 2 天线设计流程图

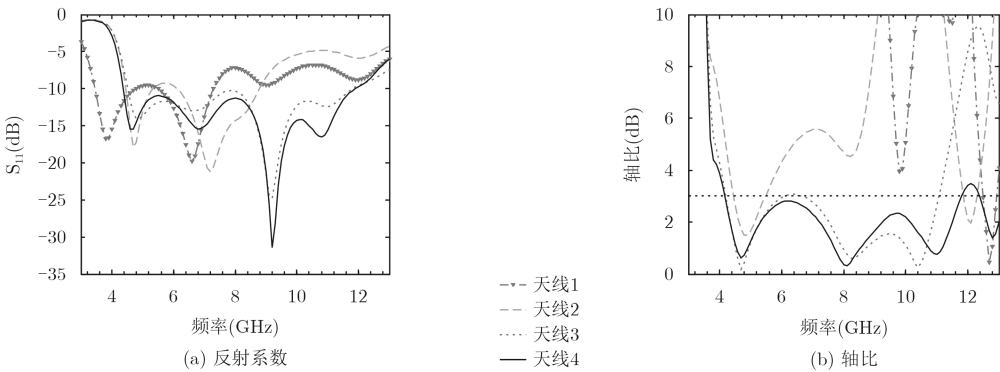


图 3 4种不同天线对应的反射系数和轴比

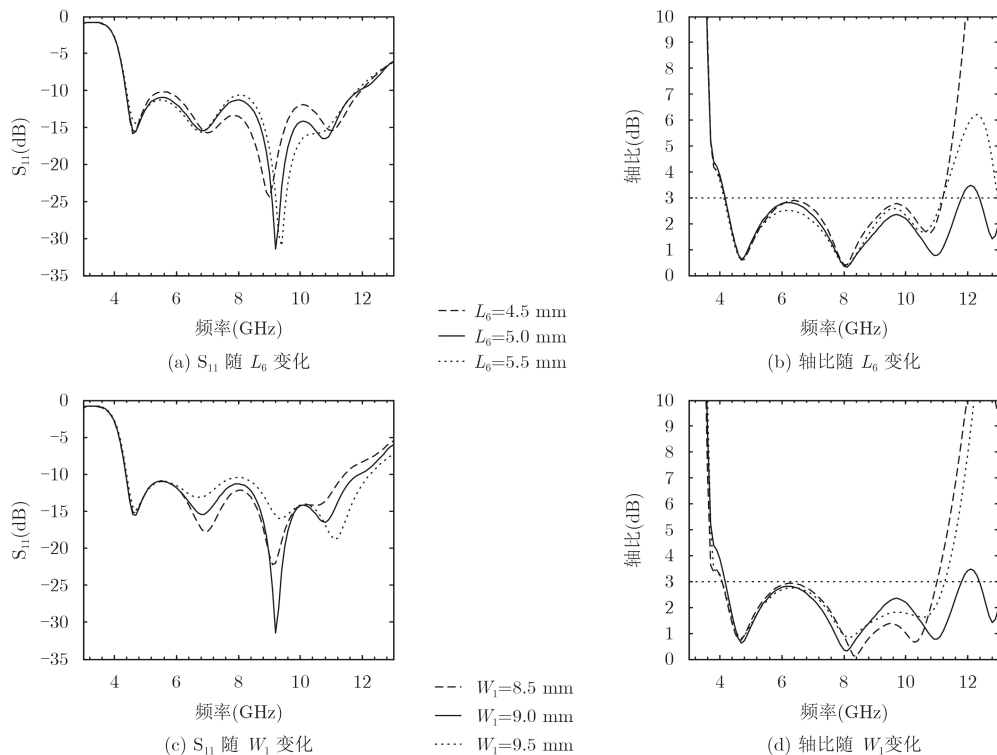


图4 反射系数和轴比随三角形边长的变化曲线

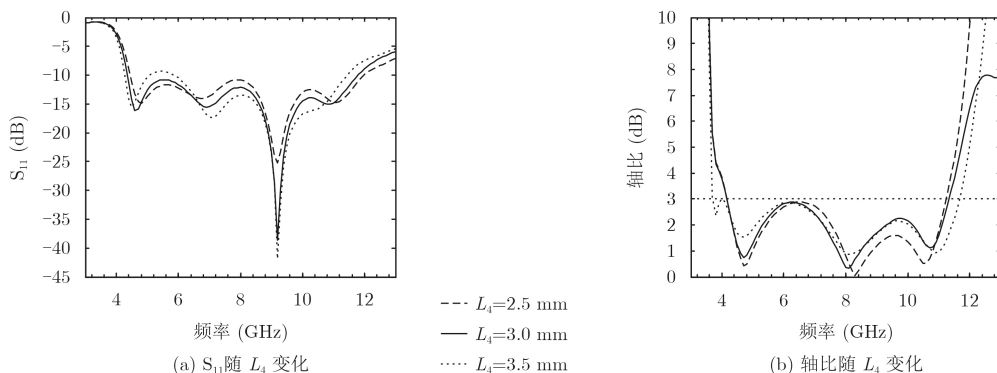


图5 反射系数和轴比随切角深度的变化曲线

横向电流和纵向电流,圆极化效果较好。三角形结构的变化主要改变了天线地板上的横向电流和纵向电流比值大小,切角深度主要改变了天线辐射贴片上的横向电流和纵向电流比值大小,都会对天线轴比产生影响。在综合考虑了天线阻抗带宽和轴比带宽尽可能均取最大的情况下,通过仿真最终选取了参数 $L_6 = 5.0$ mm $W_1 = 9.0$ mm 和 $L_4 = 2.86$ mm。

2.4 天线的圆极化工作机理

圆极化波是一等幅旋转场,对于辐射方向上给定的某点,随时间的增加,电场矢量的端点轨迹为圆,即为圆极化。为了分析天线的圆极化机理,图6给出了天线工作在7 GHz频段下,在一个馈电周期内不同馈电相位下的表面电流分布。时间的变化对应的即为馈电相位的变化,取馈电相位从 0° 每隔

90° 变化到 270° 的电流分布来观察,天线表面电流可以分解为 x 方向和 y 方向。从图6(a)可以看出,在 0° 馈电相位情况下天线表面电流垂直电流(x 方向)反向,相互抵消,总的矢量方向朝向 $+y$ 方向,在 90° 馈电相位条件下,水平电流(y 方向)分量相互抵消,总的电流矢量方向偏转为 $-x$ 方向,再过 $1/4$ 周期,当馈电相位为 180° 的时候,电流方向朝着 $-y$ 方向,改变到 270° 馈电相位时,表面电流主要集中在 $+x$ 方向。且从图6(a)和图6(c),图6(b)和图6(d)对比来看,馈电相位每隔 180° ,天线表面电流矢量方向相反,幅度相同。在整个馈电周期内,总的电流矢量幅度相等。从 $+z$ 方向来看,在整个馈电周期内,天线表面电流按着逆时针的方向旋转,对应的辐射电场矢量逆时针圆周旋转,端点轨迹为

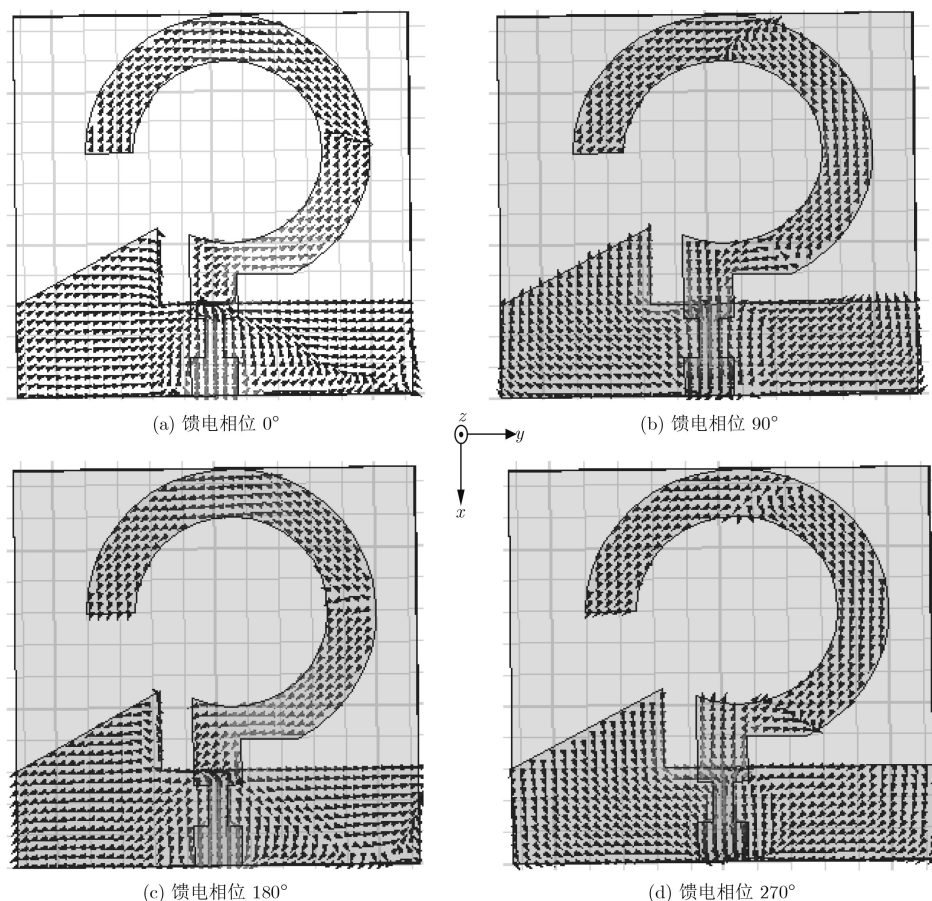


图 6 7 GHz 天线表面电流分布图

圆。因而,设计的宽带圆极化天线在 $+z$ 方向工作在右旋圆极化。

3 天线测量结果

本文采用仿真软件HFSS对宽带圆极化天线进行了仿真和优化,为了进一步验证设计宽带圆极化天线的实用价值和方法可靠性,按照上文给出的优化后的天线尺寸加工了天线实物,利用矢量网络分析仪N5230A和微波暗室对天线实物进行了测量。图7为天线加工实物图,可以看出天线整体尺寸非常小。

图8为实际测量得到的天线反射系数图,与仿

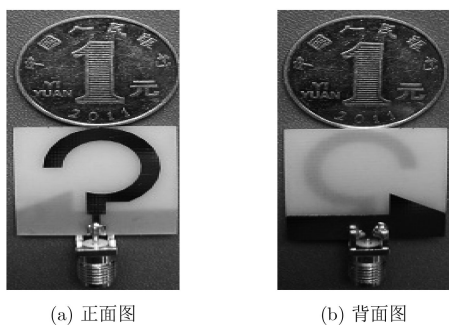


图 7 天线实物图

真结果做了对比。实测的天线阻抗带宽与仿真得到的阻抗带宽基本趋于一致。实测的3 dB轴比带宽相比于仿真结果,在低频处带宽增加,高频处基本一致,最终测量得到的轴比带宽为4~11.8 GHz。天线整体的测试结果和仿真结果基本一致,结果的差异源于天线的加工误差和测量误差导致。介质板材的不稳定性和加工中的焊接精度都会对天线的性能产生影响。

图9给出了天线在5.5 GHz和7.5 GHz工作频率下天线的归一化辐射方向图。分别测量了天线在 xoz 和 $yozy$ 两个平面下的辐射特性。从图9中可以看出,天线具有双向辐射特性,在 $+z$ 方向上半平面空间辐射右旋圆极化波,在 $-z$ 方向下半平面空间辐射左旋圆极化波。图10给出了天线的峰值增益随频率的变化曲线。可以看出,天线最大增益达到了6 dB,在工作频带4.35~12 GHz范围内,峰值增益均超过了3.3 dB。天线的整个测量结果与仿真结果基本一致。

4 结论

本文提出了一种新颖的宽带圆极化单极子天线。通过在天线C型辐射贴片上切角和在地板上增

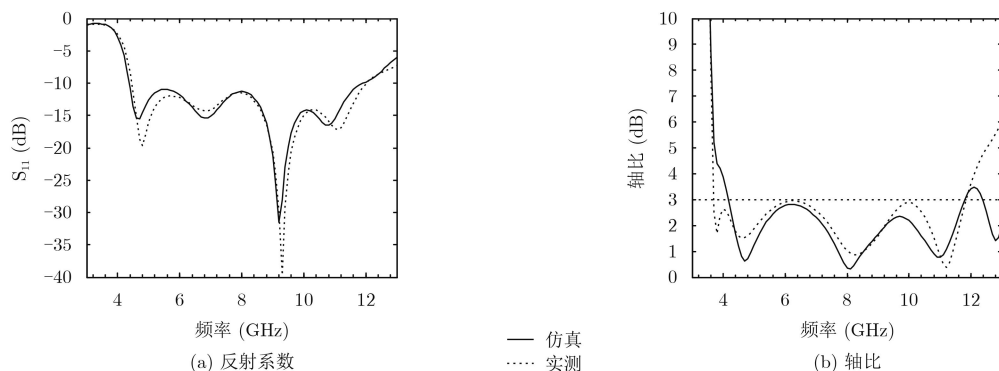


图8 天线实测和仿真对比图

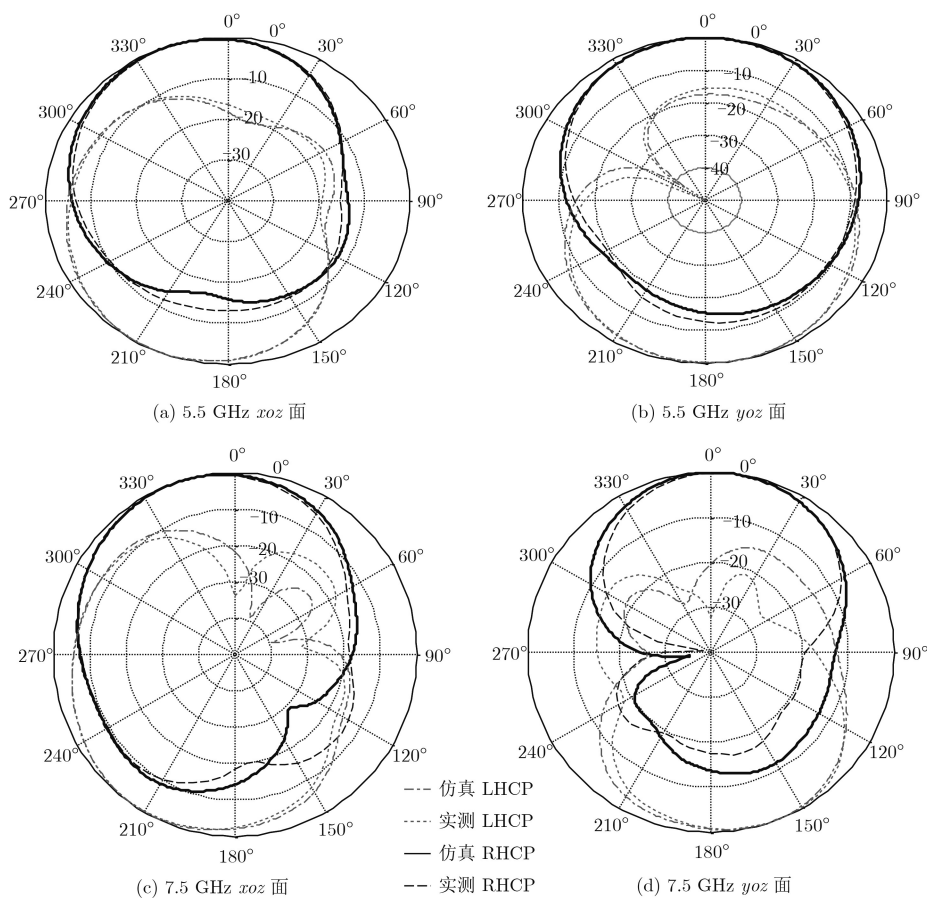


图9 天线归一化辐射方向图

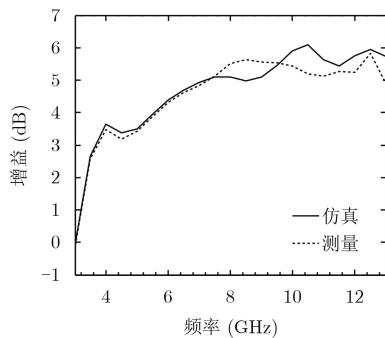


图10 天线增益曲线

加三角形扰动结构,很好地实现了宽带圆极化特性。天线设计简单,结构非常紧凑,尺寸仅为 $25 \times 25 \times 1 \text{ mm}^3$ 。研究了三角形边长对天线性能的影响,通过分析天线表面电流分布,较好地解释了天线的圆极化工作机理。天线实测结果与仿真结果吻合度高,仿真与实测结果表明,天线工作频带为 $4.35 \sim 12 \text{ GHz}$, 3 dB 轴比带宽为 $4.15 \sim 11.8 \text{ GHz}$,具有宽带圆极化特性。天线具有双向辐射特性,在 $+z$ 轴方向辐射右旋圆极化波, $-z$ 轴空间辐射左旋圆极化波。天线增益特性和辐射特性良好,该天线可以应用于超宽带无线通信系统和卫星通信系统中。

参考文献

- [1] CAO Wenquan, LIU Aijun, ZHANG Bangning, *et al.* Dual-band spiral patch-slot antenna with omnidirectional CP and unidirectional CP properties[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(4): 2286–2289. doi: [10.1109/TAP.2012.2235400](https://doi.org/10.1109/TAP.2012.2235400).
- [2] MOHAMMAD S G, GHOLAMREZA M, and PEDRAM M. Wide-band circularly polarised slot antenna by using artificial transmission line[J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2017, 11(5): 672–679. doi: [10.1049/iet-map.2016.0784](https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0784).
- [3] MUBARAK S E, ZHAO Zhiqin, WU Jiangniu, *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. doi: [10.1109/TAP.2016.2526076](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2526076).
- [4] KARAMZADEH S, RAFFI V, KARTAL M, *et al.* Compact UWB CP square slot antenna with two corners connected by a strip line[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(1): 10–12. doi: [10.1049/el.2015.2817](https://doi.org/10.1049/el.2015.2817).
- [5] 赵小莹, 减洪明, 张功磊, 等. 一种新颖的树状分形超宽带天线[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(4): 1008–1012. doi: [10.11999/JEIT140816](https://doi.org/10.11999/JEIT140816).
ZHAO Xiaoying, ZANG Hongming, ZHANG Gonglei, *et al.* A novel ultra-wideband fractal tree-shape antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 1008–1012. doi: [10.11999/JEIT140816](https://doi.org/10.11999/JEIT140816).
- [6] SRIVASTAVA G J, AKHILESH M H, and CHAKRABARTY A. Compact reconfigurable UWB slot antenna for cognitive radio applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1139–1142. doi: [10.1109/LAWP.2016.2624736](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2624736).
- [7] HOMAYOON O and SHAHMIRZADI N V. Frequency and time-domain analysis of a novel UWB reconfigurable microstrip slot antenna with switchable notched bands[J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2017, 11(8): 1127–1132. doi: [10.1049/iet-map.2016.0009](https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0009).
- [8] 胡章芳, 胡银平, 罗元, 等. 具有陷波特性的改进Sierpinski分形超宽带天线[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(6): 1520–1524. doi: [10.11999/JEIT160738](https://doi.org/10.11999/JEIT160738).
HU Zhangfang, HU Yinping, LUO Yuan, *et al.* Modified sierpinskiactal UWB antenna with band-notched characteristic[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1520–1524. doi: [10.11999/JEIT160738](https://doi.org/10.11999/JEIT160738).
- [9] RUPAM D and HYOUNGSUK Y. A wideband circularly polarized conformal endoscopic antenna system for high-speed data transfer[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 2816–2826. doi: [10.1109/TAP.2017.2694700](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2694700).
- [10] HU Benyang, NASIMUDDIN, and SHEN Zhongxiang. Broadband circularly polarized moon-shaped monopole antenna[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2015, 57(5): 1135–1139. doi: [10.1002/mop.29035](https://doi.org/10.1002/mop.29035).
- [11] DING Kang, GAO Cheng, YU Tongbin, *et al.* Broadband C-shaped circularly polarized monopole antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, 63(2): 785–790. doi: [10.1109/TAP.2014.2380437](https://doi.org/10.1109/TAP.2014.2380437).
- [12] DING Kang, GAO Cheng, WU Yanjie, *et al.* A broadband circularly polarized printed monopole antenna with parasitic strips[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2509–2512. doi: [10.1109/LAWP.2017.2728124](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2728124).
- [13] ROHIT K S, SANTANU D, and MRINAL K M. CPW-fed dual-band dual-sense circularly polarized monopole antenna[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 2497–2500. doi: [10.1109/LAWP.2017.2726545](https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2726545).
- [14] TANG Hongyan, WANG Ke, and WU Runmiao. Compact broadband CP monopole antenna with tilted branch[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(21): 1739–1740. doi: [10.1049/el.2016.2733](https://doi.org/10.1049/el.2016.2733).
- [15] DING Kang, GUO Yongxin, and GAO Cheng. CPW-fed wideband circularly polarized printed monopole antenna with open loop and asymmetric ground plane[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 833–836. doi: [10.1109/LAWP.2016.2606557](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2606557).
- [16] TANG Hongyan, WANG Ke, and WU Runmiao. A novel broadband circularly polarized monopole antenna based on C-shaped radiator[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 964–967. doi: [10.1109/LAWP.2016.2615159](https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2615159).
- [17] CHANDU D S and KARTHIKEYAN S S. A novel broadband dual circularly polarized microstrip-fed monopole antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(3): 1410–1415. doi: [10.1109/TAP.2016.2647705](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2647705).

李振亚: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为宽带微带天线、共形微带天线的理论分析与仿真计算。

竺小松: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为嵌入式智能信号处理、智能蒙皮技术。

张建华: 女, 1962年生, 教授, 研究方向为电磁场理论与天线技术。