

小型圆极化天线的交叉极化抑制方法研究

罗 艺¹, 柳志荣²

(1. 中国电子科技集团公司第十研究所, 四川成都 610036;
2. 陕西蓝鹰航空电器有限公司, 陕西西安 710000)

摘 要: 本文研究了一种小型圆极化微带天线在低仰角下抑制交叉极化的方法. 文中提出了在辐射贴片上设置一个交叉槽来缩小天线尺寸, 其高度和直径的仅为 0.123 倍波长和 0.777 倍波长. 进一步针对该天线, 分析了天线在不同底板类型下的低仰角交叉极化特性, 提出了一种紧凑的弯折线环腔底板结构. 采用紧凑的 MLRC (Meander-Line Ring Cavity) 结构可以显著降低天线在低仰角下的交叉极化, 并且在整个上半空间的轴比 (AR, Axial Ratio) 也得到改善. 所获得的腔体高度和直径仅为 0.064 倍波长和 0.448 倍波长. 天线电压驻波比 (VSWR, Voltage Standing Wave Ratio) 小于 2 的阻抗带宽达到 20.8%, 轴比小于 3dB 的圆极化带宽为 8.5%. 从天顶到水平面, 交叉极化电平不大于 23.2dB. 轴比小于 3dB 时, 波束宽度可达 190° 以上.

关键词: 圆极化; 天线; 交叉极化; 弯折线环腔; 低仰角; 圆极化带宽

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)12-2490-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20201293

Methods of Suppressing Cross Polarisation for a Miniaturised Circularly Polarised Antenna

LUO Yi¹, LIU Zhi-rong²

(1. The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610036, China;
2. Shaanxi Lanying Aviation Electric Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: A method of suppressing the cross polarisation of a miniaturised circularly polarised (CP) microstrip antenna at low elevation angle is studied. A crossed slot on the radiation patch is utilised to miniaturise the proposed antenna, the antenna height is 0.777 times the wavelength, and the antenna diameter is 0.123 times the wavelength. Furthermore, the cross polarisation of the antenna at low elevation angle is analysed with different ground types, and a compact meander-line ring cavity (MLRC) ground is proposed. The cross polarisation at low elevation angle can be reduced significantly for the antenna with a compact MLRC, and the axial ratio (AR) is also improved in the whole upper-half space. The achieved height and diameter of the cavity are just 0.064 times the wavelength and 0.448 times the wavelength. The impedance bandwidth for voltage standing wave ratio (VSWR) less than 2 is 20.8%, and the CP bandwidth for AR less than 3dB is 8.5%. From the zenith to the horizontal, the cross-polarised levels are not greater than 23.2dB. The beamwidth for AR less than 3dB reaches more than 190°.

Key words: circularly polarised; antenna; cross polarisation; meander-line ring cavity; low elevation angle; the CP bandwidth

1 概述

小型圆极化微带天线以其低轮廓的优点被广泛应用于卫星通信和导航中^[1-6]. 目前有关圆极化微带天线小型化的研究很多, 主要涉及两种方法. 一是利用高介电常数衬底来减小天线尺寸, 这通常会带来一个简单的天线结构, 但其带宽窄并且辐射效率低. 另一种是采用

用短路耦合结构将辐射片小型化, 其设计灵活但结构复杂^[7,8]. 在这些灵活的设计中, 损耗较大的馈电网络通常被用来激励圆极化并拓宽带宽, 但是整个天线的辐射效率和增益会明显下降^[9,10]. 因此, 对高效、宽带的小型圆极化天线的研究一直是研究的热点.

在卫星导航的应用中, 圆极化天线要求对上半空间

辐射,并具有足够的带宽,以及具有抗多径干扰的能力,也是必需的,这意味着圆极化天线的交叉极化应该被抑制^[11]. 对于大多数的圆极化天线来说,控制交叉极化并不容易,特别是在低仰角方向. 近年来,关于圆极化天线在低仰角下的交叉极化抑制方法有很多研究报道,其中大部分研究主要涉及圆极化天线底板的重建. 这些结构包括扼流圈底板^[12]、非截止波纹底板^[13]、介质填充扼流圈腔和电磁带隙(Electromagnetic Band Gap, EBG)底板^[14,15]. 这些方法都是有效的,但这些底板尺寸和质量都较大. 有学者总结了上述结构的细节,提出了一种更紧凑、更轻的底板结构,称为交叉板反射面底板^[16]. 该底板的外部电尺寸为 0.777λ (直径) $\times 0.123\lambda$ (高度),在抑制交叉极化的紧凑结构方面取得了很大进展.

本文提出并设计了一种新型的小型化弯折线环腔(Meander-Line Ring Cavity, MLRC)来抑制圆极化天线在低仰角下的交叉极化. 圆极化辐射单元在辐射贴片上利用交叉缝隙来减小尺寸,并采用三角形馈电贴片来有效增加带宽. 另外,设计了一个低损耗无电阻加载的馈电线来提供圆极化激励,在工作频带内可以达到95%以上的高效率. 此外,进一步分析了天线在不同底板结构下的低仰角交叉极化. 该结构能有效地抑制低仰角下的交叉极化,改善圆极化性能,且其尺寸也比其他交叉极化抑制结构明显减小.

2 小型圆极化天线

文章中的小型圆极化天线由三部分组成:辐射片、馈电圆筒和馈电网络片. 这三个部件组成了一个完整的闭合体,没有额外的支撑结构,所以天线非常坚固轻质. 图1为圆极化微带天线组成图. 辐射片和馈电筒构成基本辐射如图1(a)所示. 图1(b)为辐射片,在辐射片的上表面蚀刻一个带交叉槽的圆形辐射贴片. 印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)采用FR4衬底,厚度为1mm,相对介电常数 ϵ_r 为4.4,损耗正切0.02. 交叉的缝隙将圆形贴片分割成四个独立的辐射区,可使天线实现小型化. 四个辐射区分别与四个三角形馈电片连接. 同时,为了解决小型化天线的阻抗匹配问题,馈电贴片上存在短路枝节. 因此,在0.15mm厚的FR4片上蚀刻四个馈电片. 由于辐射片具有良好的弹性,可卷成圆筒,称为馈电筒(图1(c)). 四个馈电片的底部由四个振幅相等、相位相差90°的激励激励时,在馈电片的法向上可得到单向圆极化(Circularly Polarised, CP)辐射.

馈电网络采用串联馈电网络,结构紧凑,损耗小. 通常情况下,并联馈电网络,如功率分配器、耦合器等,可以为天线提供较宽的带宽,但会占用较大的空间,使用隔离电阻或吸收负载会导致明显的损耗^[8-10]. 虽然串联馈电网络提供较窄的带宽,但其不引入额外的损耗

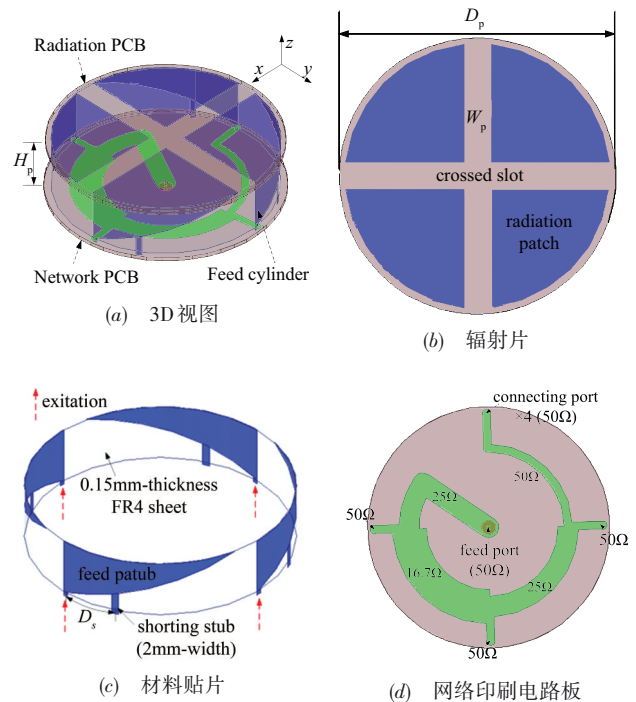


图1 圆极化微带天线组成图

并且结构紧凑.

3 在低仰角下抑制交叉极化的方法

对于单向圆极化微带天线,在此角度范围内,贴片的横向尺寸很小,圆极化性能良好. 当接近端射方向(低仰角)时,交叉极化迅速升高. 为了减小低仰角时的交叉极化,通常需要对圆极化天线的底板进行重构. 在本节中,我们将研究上述不同地面结构的天线,并分析和讨论交叉极化和轴比的变化. 在此基础上,提出了一种新型的紧凑地板,即小型化弯折环腔结构MLRC,并给出了其工作原理和性能.

3.1 平面底板-FGP

平面底板是圆极化天线常用的结构. 图2显示了采用小平面底板的 antennas 的方向图和轴比. 天线的3dB波束宽度为113°,最小的交叉极化出现在天顶. 当接近水平时,交叉极化迅速增加. 在 $\pm 90^\circ$ 时,交叉极化电平为-10.6dB,对应轴比为14.1dB. 因此,3dB轴比波束宽度($AR \leq 3\text{dB}$ 时波束宽度)仅为 $106^\circ (\pm 53^\circ)$. 当地面直径增加到96mm时,上半空间的交叉极化略有减小. 3dB波束宽度基本不变,为112°. 在 $\pm 90^\circ$ 时的交叉极化为-13.7dB,对应的AR为9dB. 3dB轴比波束宽度增加到 $128^\circ (\pm 64^\circ)$. 在 $65^\circ \sim 95^\circ$ 范围内,圆极化性能仍不理想. 这些数据都列在表1中.

3.2 圆柱体反射腔-CRC

圆柱反射腔(Cylinder Reflection Cavity, CRC)是小

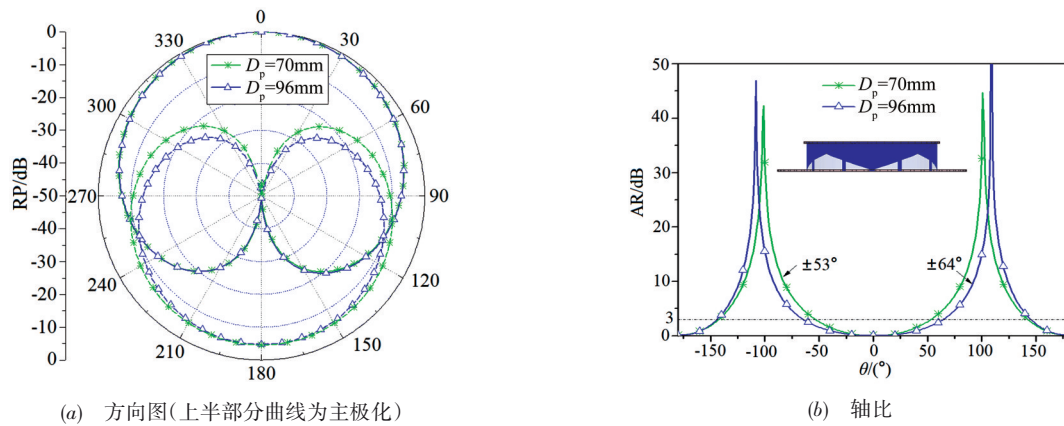


图2 平面接地板的 antennas 的方向图和轴比曲线

表1 圆极化天线在不同底板结构和参数下的辐射特性

参数		3dB 波束宽度/ (°)	交叉极化/dB @ $\theta=90^\circ$	轴比/dB @ $\theta=90^\circ$	3 dB 轴比波束宽度/ (°)	直径 @1.2GHz
FGP	$D_p=70\text{mm}$	113	-10.6	14.1	106.0	0.280λ
	$D_p=96\text{mm}$	112	-13.7	9.0	128.0	0.348λ
CRC		111	-18.2	5.1	158.0	0.348λ
MLRC	$D_c=15\text{mm}$ $S_c=2.5\text{mm}$ $N=2$	113	-26.1	2.0	192.0	0.448λ
	$D_c=3\text{mm}$ $S_c=2.5\text{mm}$ $N=2$	113	-28.5	1.5	216.6	0.512λ
	$D_c=5\text{mm}$ $S_c=2.5\text{mm}$ $N=3$	113	-26.1	2.0	225.0	0.476λ
	$D_c=5\text{mm}$ $S_c=8.5\text{mm}$ $N=2$	113	-24.7	2.4	229.6	0.544λ

注:所有条件高度为 0.064λ 。

天线的另一种常用地板,它能在一定程度上减小沿水平方向的表面波。图3显示了本例中的方向图和轴比。其中,图3(a)为方向图,图3(b)包含带有圆柱形反射腔的天线截面视图。空腔可以看作是在底板四周增加了金属墙壁。墙的高度与天线的高度相同,即 16mm 。3dB波束宽度为 111° 。在 $\pm 90^\circ$ 时的交叉极化为 -18.2dB ,对应的轴比为 5.1dB 。3dB轴比波束宽度为 158° ($\pm 79^\circ$)。数据也列在表1中。圆柱体反射腔的引入,使近水平方向的圆极化CP性能略有改善。

3.3 弯折线环腔-MLRC

基于上述结果,增大底板的有效尺寸可以改善低仰角下的交叉极化。图4展示了本文所提出的MLRC结构。其中,图4(a)显示了采用MLRC结构的圆极化天线3D视图,腔的高度等于圆极化天线的高度。图4(b)显示了ML-

RC的截面视图,所述与天线接地板的腔体连接处,以及截面形状为向外延伸的弯曲线。弯折线厚度固定为 1mm 。弯折线之间的间隙宽度标记为 S_c ,弯折线折叠数为 N ,图中为弯折线折叠数 $N=2$ 时的情况。本文对这些参数进行了分析,并将讨论它们对交叉极化和轴比的影响。

3.3.1 距离- D_c

D_c 为辐射体到环腔内壁的距离,图5为 D_c 分别为 7mm 、 15mm 和 23mm 时的天线方向图和轴比。 D_c 增加时,主极化方向图几乎没有变化。3dB波束宽度约为 113° ,当 D_c 从 7mm 变为 15mm ,整个空间的交叉极化都得到改善。在 $\pm 90^\circ$ 时的交叉极化达到 -26.1dB 。3dB轴比波束宽度为 192° ($\pm 96^\circ$)。当 D_c 增大到 23mm 时,上半部空间的交叉极化水平增大,而在 $\theta=90^\circ\sim 120^\circ$ 时交叉极化水平进一步减小。此处3dB轴比波束宽度为

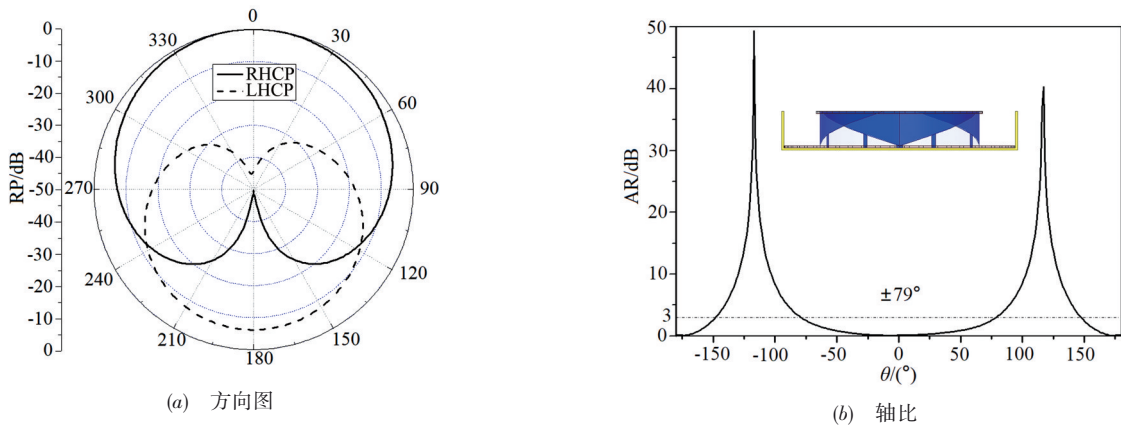


图3 圆柱形反射腔设计天线的方向图和轴比曲线

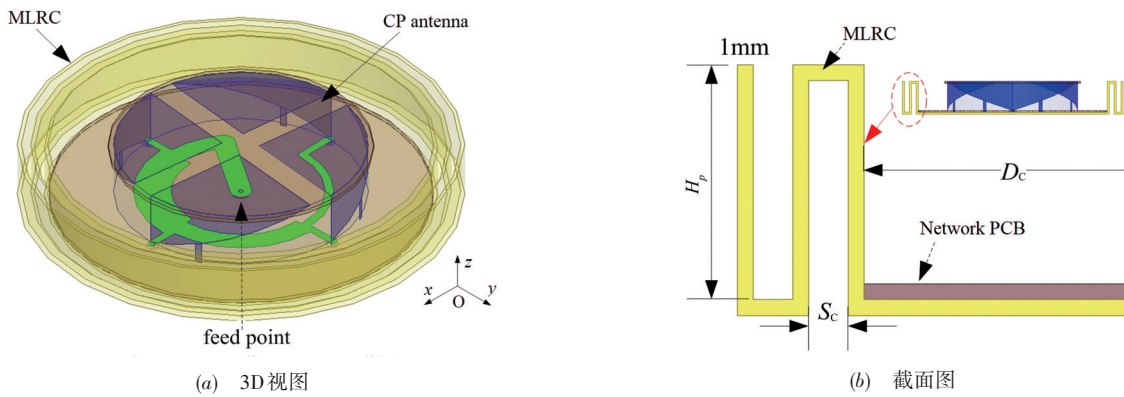


图4 天线弯折线环腔示意图

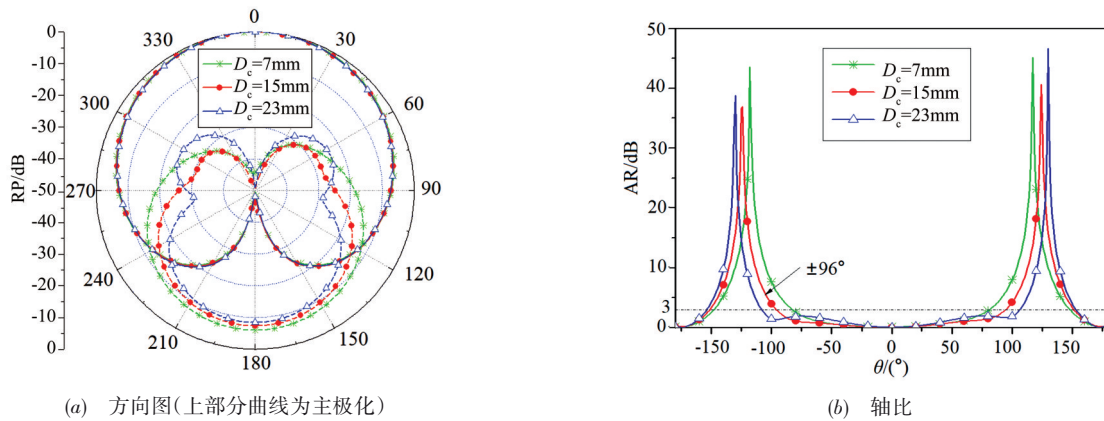


图5 圆极化天线的方向图和轴比曲线

216.6° ($\pm 108.3^\circ$). 相应 MLRC 的直径是 0.512λ (在 1.2GHz).

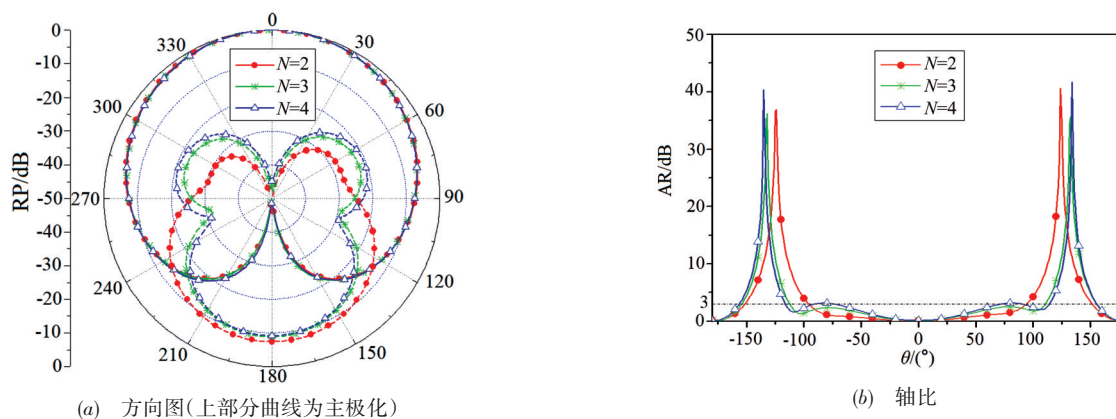
3.3.2 弯折线折叠数-N

当间隙宽度 S_c 、距离 D_c 不变,弯折线折叠数 N 从 2 增加到 4 时,天线的方向图和轴比如图 6 所示. 通过图 6 可以发现,主极化方向图几乎没变. 随着折叠数的增

加,上半部空间的交叉极化上升,下半部空间的交叉极化下降. 当 $N=3$ 时,3dB 轴比波束宽度达到 225° ($\pm 112.5^\circ$). 这里,腔的直径是 0.476λ , 仍然是紧凑的. 当 N 增加到 4 时,在 $\theta=83^\circ$ 附近轴比超过 3dB.

3.3.3 间隙宽度- S_c

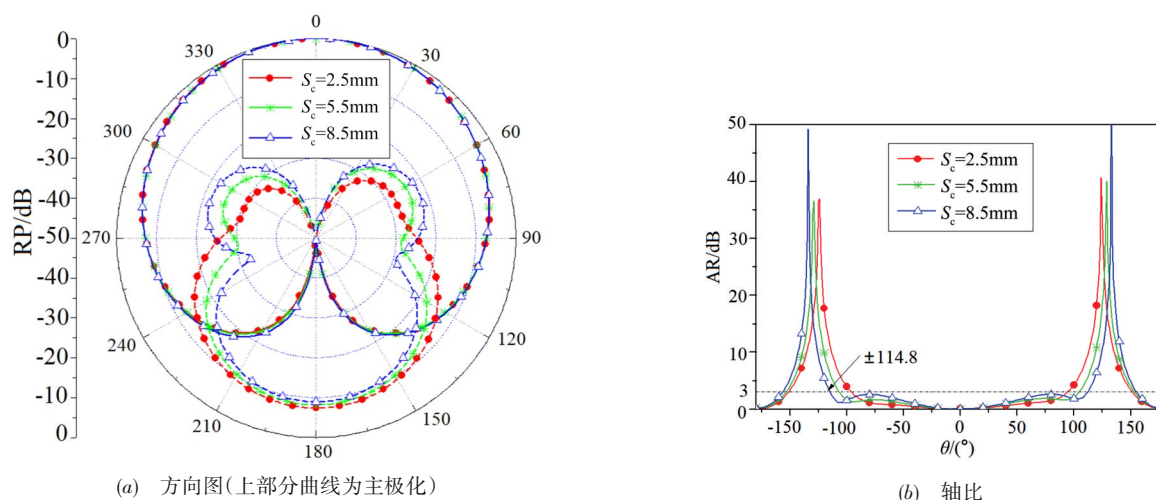
图 7 为不同间隙宽度 S_c 下的天线方向图和轴比.

图6 N 变化时天线的方向图和轴比

同时,主极化的方向图也没有改变.随着间隙宽度的增大,上半空间的交叉极化逐渐增大,下半空间的交叉极化逐渐减小.这个规律与增加折叠数的规律相似.当宽度为8.5mm时,3dB轴比波束宽度最大,为 $229.6^\circ (\pm 114.8^\circ)$.这里,腔的直径为 0.544λ .

上述MLRC的典型结果也列在表1中.只需稍微增大天线的底板结构,该方法就能降低低仰角时的交叉

极化,明显提高3dB轴比波束宽度.另外,当弯折线折叠数 N 和间隙宽度 S_c 不变,随着距离 D_c 的增加,也可以减少下半空间的交叉极化,进一步提高3dB轴比波束宽度.同时考虑腔的尺寸和对交叉极化的抑制作用,MLRC的参数确定为: $D_c = 15\text{mm}$, $S_c = 2.5\text{mm}$, $N = 2$.如果需要更宽的抑制交叉极化范围,则可以考虑直径稍大的腔体结构.

图7 不同 S_c 时天线的方向图和轴比

3.4 天线照片及测试结果

图8为尺寸为辐射体到环腔内壁的距离 D_c 为15mm,间隙宽度 S_c 为2.5mm,折弯线折叠数 N 为2时,加工的天线实物照片.

图9为上述天线的测试图.通过在暗室中对天线远场进行测试,对比仿真与测试数据,发现实测数据与仿真数据趋势基本一致.

3.5 MLRC上的电流分析

为了解释在上半空间中良好的圆极化特性,分析了该结构上的电流密度分布.图10为天线上电流密度分

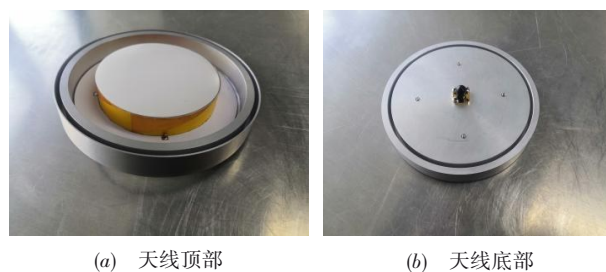
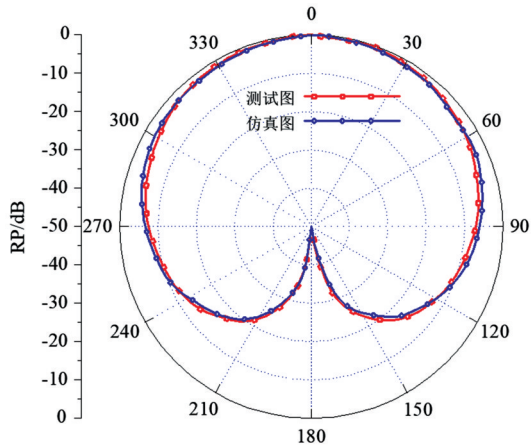
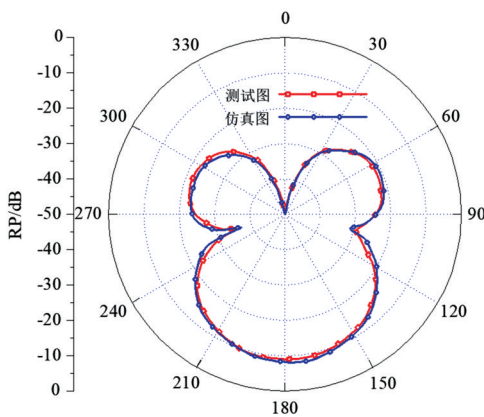


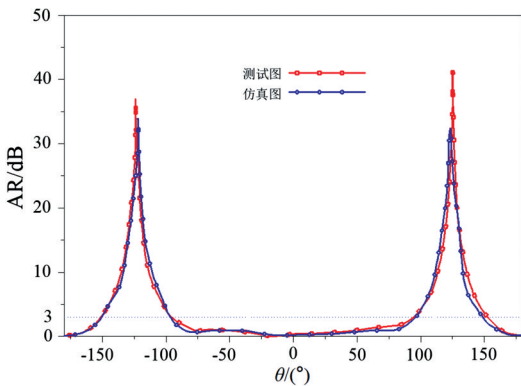
图8 天线实物图



(a) 天线主极化测试对比图



(b) 天线交叉极化测试对比图



(c) 天线轴比测试对比图

图9 天线方向图

布图. 图 10(a)给出了 MLRC 上电流密度的俯视图,其中包含了电流密度在一个周期内的变化. 可以观察到等效电流密度 J_e 随着时间逆时针旋转,如图 10(b)所示,结合视图方向,等效矢量的规律满足右手定则. 因此,MLRC 在天顶方向促进了右旋圆极化 (Right-Hand Circularly Polarized, RHCP). 另一方面,也观察到了在弯折线环腔

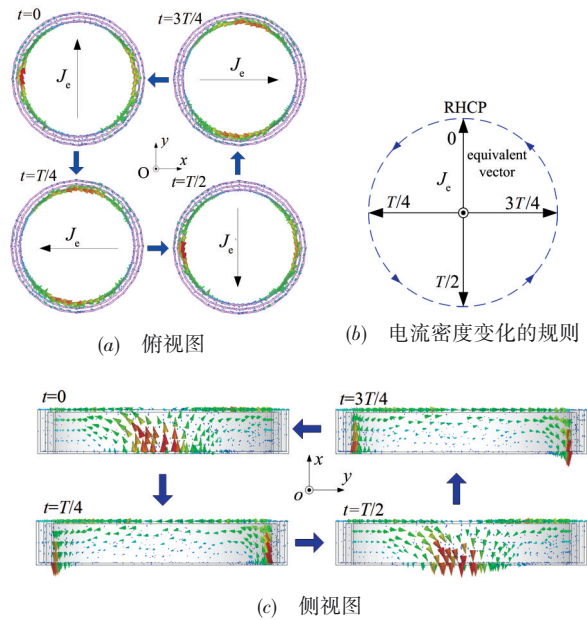


图 10 天线上电流密度分布图

侧壁上的电流密度. 图 10(c)显示了一个周期内 MLRC 上电流密度的侧面图. 当 $t=0$ 时,电流密度的等效矢量沿 $+z$ 方向,电流密度强度较大. 当 $t=T/4$ 时,等效向量沿 $-y$ 方向. 虽然在 $t=0$ 时电流密度强度较弱,但其电流密度分布较长. 当 $t=T/2$ 时,分布与 $t=0$ 时相似,但相位相反. 向量沿着 $-z$ 方向. 当 $t=3T/4$ 时,情况与 $t=T/4$ 相反,矢量沿 $+y$ 方向. 直到下一个周期,电流密度的分布回到 $t=0$ 的情况. 侧视图中的等效矢量也随时间逆时针旋转,其视图方向也符合右手定则. 因此,也得到了水平方向的 RHCP 辐射.

4 结论

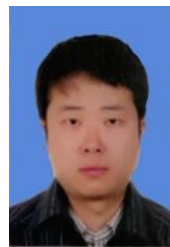
本文研究了一种小型圆极化天线和低仰角交叉极化的抑制技术. 首先介绍了该天线的结构,天线具有小型化、带宽和高效等优点. 天线的尺寸仅为 $0.064\lambda \times 0.264\lambda$. $VSWR \leq 2$ 的阻抗带宽为 20.8%, $AR \leq 3\text{dB}$ 的圆极化带宽为 8.5%. 在重叠波段,辐射效率大于 95%. 以小型化圆极化天线为基础,分析了不同地面结构对低仰角交叉极化的抑制作用,提出了一种新型的小型化弯折线环腔结构 (MLRC). MLRC 的高度和直径只有 0.064λ 和 0.448λ . 通过对 MLRC 结构的分析,表明 MLRC 可以明显改善天线圆极化性能,抑制低仰角下的交叉极化. 结果表明,在 $\theta = \pm 90^\circ$ 时,交叉极化可从 -10.6dB 降低到 -26.1dB , 3dB 轴比束宽从 106° 提高到 192° . 这些性能都有助于提高圆极化波的信号质量,减轻低仰角的多径干扰. 如果还希望减少水平面以下的干扰,可以进一步设计更多弯折线结构. 因此,所提出的 MLRC

结构可作为卫星导航和通信应用中的良好天线选型。

参考文献

- [1] Pravin Ratilal Prajapati, Gannavarapu Gopala Krishna Murthy, Amalendu Patnaik, Machavaram Venkata Kartikeyan. Design and testing of a compact circularly polarised microstrip antenna with fractal defected ground structure for L-band applications[J]. IET Microwaves Antennas Propagation, 2015, 9(11): 1179 – 1185.
- [2] Agarwal Kush, Nasimuddin, Alphones Arokiaswami. Triple-band compact circularly polarised stacked microstrip antenna over reactive impedance meta-surface for GPS applications[J]. IET Microwaves Antennas Propagation, 2014, 8(13): 1057 – 1065.
- [3] Nasimuddin, QING Xian-ming, CHEN Zhi-ning. A compact circularly polarised slotted patch antenna for GNSS applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(8): 3764 – 3768.
- [4] LIU Qiang, LIU Yuan-an, WU Yong-le, SHEN Jun-yu. Compact wideband circularly polarized patch antenna for CNSS applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 1280 – 1283.
- [5] CAI Tong, WANG Guang-ming, ZHANG Xiao-fei, SHI Jun-peng. Low-profile compact circularly-polarized antenna based on fractal metasurface and fractal resonator[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1072 – 1076.
- [6] LIU Qiang, SHEN Jun-yu, LIU Hong-li, WU Yong-le, SU Ming, LIU Yuan-an. Low-cost compact circularly polarized directional antenna for universal UHF RFID handheld reader applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1326 – 1329.
- [7] ZHENG Hui-li, LIU Ying, SUN Chao. Analysis and design of a low-cost dual-band compact circularly polarized antenna for GPS application[J]. IEEE Trans on Antennas Propag, 2016, 64(1): 365 – 370.
- [8] HANG W, K K SO, K B NG, K M LUK, XUE Q. Virtually shorted patch antenna for circular polarisation[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 12: 1213 – 1216.
- [9] SUN Chao, ZHENG Hui-li, ZHANG Ling-fei, LIU Ying. Analysis and design of a novel coupled shorting strip for compact patch antenna with bandwidth enhancement[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 1477 – 1481.
- [10] PADROS N, ORTIGOSA J I, BAKER J, ISKANDER M F, THORNBERG B. Comparative study of high-performance GPS receiving antenna designs[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(4): 698 – 706.
- [11] KILDAL P S. Artificially soft and hard surfaces in electromagnetics[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, 38(10): 1537 – 1544.
- [12] SCIRE-SCAPPUZZO F, MAKAROV S N. A low-multipath wideband GPS antenna with cutoff or non-cutoff corrugated ground plane[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(1): 33 – 46.
- [13] Baggen Holzwarth, Martinez-Vazquez. Low profile Galileo antenna using EBG technology[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(3): 667 – 674.
- [14] CHEN Xi, YANG Long, ZHAO Jia-yue. High-efficiency compact circularly polarised microstrip antenna with wide beamwidth for airborne communication[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1518 – 1521.
- [15] MAQSOOD M, GAO S, BROWN T W C, UNWIN M. A compact multipath mitigating ground plane for multiband GNSS antennas[J]. IEEE Trans on Antennas Propag, 2013, 61(5): 2775 – 2782.

作者简介



罗 艺 男, 1981 年 6 月生于四川省成都市. 现为成都中电科 10 所 3 部遥遥遥控室副主任, 主要从事微波与天线, 无线电测控系统与无人机数据链相关专业方向的研究.

E-mail: 7195096@qq.com



柳志荣 男, 1984 年 3 月生于甘肃省平凉市. 现为陕西蓝鹰航空电器有限公司天线事业部部长、天线设计师, 主要从事天线、微波技术方面的研究制造工作.

E-mail: 395800911@163.com