

# 倾斜波束圆极化天线的 CSRR-FS 结构设计研究

李思佳, 曹祥玉, 郑秋容, 刘 涛, 陈校平

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安 710077)

**摘 要:** 为了拓展倾斜波束圆极化天线(Circularly Polarized Antenna with Tilted Beam, CPA-TB)的带宽,在分析了该天线结构及其特征的基础上,提出了一种花纹式螺旋臂(Flower-Spiral, FS)协同互补开口谐振环(complementary split ring resonator, CSRR)的 CSRR-FS 结构.该结构通过 FS 增加了天线表面电流路径,实现了天线驻波比(voltage standing wave ratio, VSWR)的拓展;利用 CSRR 改变了低频点反射板的电流分布,实现反射板小型化的同时,减小了天线的交叉极化分量,增强了天线的辐射性能,拓展了天线的轴比带宽.仿真和实测结果表明:与普通的平面反射板相比,在保证圆极化、波束倾角  $30^\circ$  的条件下,基于 CSRR-FS 结构的 CPA-TB 相对带宽为 24% (5.5 - 7GHz),天线工作带宽拓展了 1.8 倍. CSRR-FS 结构的提出为 CPA-TB 带宽的拓展提供了新的途径.

**关键词:** 圆极化天线, 倾斜波束, 花纹式螺旋臂结构, 互补开口谐振环

**中图分类号:** TN82      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2014)10-2123-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.10.040

## Research on CSRR-FS Structure of Circularly Polarized Antenna with Tilted Beam

LI Si-jia, CAO Xiang-yu, ZHENG Qiu-rong, LIU Tao, CHEN Xiao-ping

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the configuration and the character of the circularly polarized antenna with tilted beam, a novel CSRR-FS(Complementary Split Ring Resonator with Flower-Spiral, CSRR-FS)structure is proposed to increase the bandwidth of the antenna. This structure is designed through the flower-spiral arm and five complementary split ring resonator(CSRR) splits loaded on ground plane. The VSWR(voltage standing wave ratio)is enhanced through the flower-spiral structure. And respectively, five CSRR splits are loaded on the perfect electronic conductor ground plane to miniaturize the ground plane and decrease the cross-polarization component. The axial ratio is improved through the ground plane loaded five CSRR splits. Simulated and measured results both show that the relative bandwidth of the novel antenna with the CSRR-FS structure is 24% from 5.5GHz to 7GHz in the condition of circularly polarized radiation. And while, it is an azimuth angle of  $30^\circ$  tilted beam by the CSRR-FS structure. The bandwidth increases 1.8 times as wide as one without the CSRR-FS structure in the same condition. The proposed structure is an effectively method for increasing the bandwidth of circularly polarized antenna with tilted beam.

**Key words:** circularly polarized antenna; tilted beam; flower-spiral structure; CSRR

## 1 引言

现阶段圆极化倾斜波束天线(Circularly Polarized Antenna with Tilted Beam, CPA-TB)在卫星通信、航空信息传输、宇航探测等方面都有着广泛的应用<sup>[1,2]</sup>.而传统天线波束倾斜主要是通过阵列天线方向图综合<sup>[3]</sup>、波束赋形<sup>[4]</sup>和相控阵<sup>[5]</sup>等技术实现,而这些实现方法一般都必

须经过结构设计和波束算法两个过程.如何通过天线结构达到固定波束倾斜角度,实现天线波束倾斜与宽带拓展的一体化设计,成为天线研究和应用中亟待解决的难题.

为此,文献[6]和[7]分别设计了双叶片和四叶片天线,实现了天线的线极化倾斜波束,同时线极化倾斜波束天线的相对带宽都大于 25%.然而实际应用中,由于

线极化方式的敏感性和场合受限的原因, CPA-TB 的设计受到了学者们的关注. 文献[8]通过等角螺旋天线和外部侧馈激励的方式, 设计了一种圆极化倾斜波束天线. 然而, 该天线工作的相对带宽较窄(相对带宽为 8.6%, 频率从 11.7GHz - 12.75GHz), 并且天线的倾斜波束特征依赖于大反射底板(反射底板直径为波长的 5 倍). 为了拓展 CPA-TB 的带宽, 提了一种花纹式螺旋(Flower-spiral, FS)臂协同 CSRR(Complementary Split Ring Resonator, CSRR)环的 CSRR-FS 结构. 该结构通过 FS 结构增加了电流的路径, 减小了天线的特征阻抗, 增强了天线匹配效果, 拓展了天线的 VSWR 带宽; 同时结合 CSRR 环, 改变低频段反射板的电流分布, 减小了天线的交叉极化分量, 改善了天线的轴比, 且实现了反射板的小型化. 最终拓展了天线的工作带宽, 仿真和实测试验了设计的有效性.

## 2 基于 CSRR-FS 结构的 CPA-TB

CPA-TB 主要是将柱状螺旋天线作为平面螺旋天线的馈电传输线, 利用柱状螺旋天线的锥形辐射模式, 和平面螺旋天线有机结合, 在远区场进行了方向图合成, 从而实现了波束的倾斜. 但一般条件下其受  $VSWR < 2$ 、波束倾斜角度和  $AR < 3\text{dB}$  的限制, 工作带宽较窄. 而新颖的 CSRR 环在可重构天线<sup>[9-11]</sup>和射频陷波器<sup>[12-14]</sup>的带宽拓展等方面有着应用. 为了拓展带宽, 提出了 CPA-TB 的 CSRR-FS 结构, 如图 1 所示. 所设计的基于 CSRR-FS 结构的倾斜波束宽带圆极化天线的工作频段为 5.5GHz - 7GHz. 图 1(a) 给出的是结构的透视图, 图 1(b) 为其对应的俯视图. 整个天线结构由三部分组成, 即顶部的花纹式螺旋臂、柱状螺旋线和刻蚀有 5 个 CSRR 环缝隙的金属反射底板. 其中 FS 结构和柱状螺旋线贴在厚度为 1mm、 $\epsilon = 2.2$  的介质桶上. 介质桶的外半径  $r_{\text{out}} = 13.6\text{mm}$ , 内半径  $r_{\text{in}} = r_{\text{out}} - 1\text{mm} = 13.6\text{mm}$ , 外高度  $H = 13.6\text{mm}$ , 内高度  $H_{\text{in}} = H - 1\text{mm} = 12.6\text{mm}$ . 天线的整体高度为 13.6mm, 介质桶的顶部花纹式螺旋结构的方程为:

$$\begin{cases} r_{\text{in}} = r_1 + c_1\varphi + d_1 \frac{\varphi - \varphi_{\text{start}}}{\varphi_{\text{end}} - \varphi_{\text{start}}} \sin(n_1\varphi) \\ r_{\text{out}} = r_2 + c_2\varphi + d_2 \frac{\varphi - \varphi_{\text{start}}}{\varphi_{\text{end}} - \varphi_{\text{start}}} \sin(n_1\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

其中  $n_1 = 40$ , 其余相关的参数由式(2)确定.

$$\begin{cases} r_1 = 0.5\text{mm} & c_1 = 0.55\text{mm} & d_1 = 0.5\text{mm} \\ r_2 = 0.55\text{mm} & c_2 = 0.66\text{mm} & d_2 = 0.5\text{mm} \end{cases} \quad (2)$$

侧面的柱状螺旋线共两圈, 线宽为  $h_2 = 2.06\text{mm}$ , 螺旋圈之间的间距为  $h_3 = 5.6\text{mm}$ . 柱状螺旋线的最低点距离反射地板 0.34mm. 采用穿孔式的同轴馈电方式进行馈电. 金属反射板的厚度  $h_1 = 1\text{mm}$ , 其半径为  $R = 30\text{mm}$

$\approx 0.62\lambda$  ( $\lambda$  为中心频率 6.15GHz 对应的波长), 反射板所刻蚀的 CSRR 环如图 1 所示, 其中 CSRR 环的参数  $a_1 = b_1 = b_2 = 0.4\text{mm}$ ,  $a_2 = 5.6\text{mm}$ ,  $a_3 = 7.2\text{mm}$ . 穿过 X 轴的 CSRR 环中心位置的极坐标为  $(\rho_1, \varphi_1) = (22.5\text{mm}, 0^\circ)$ , 其它 4 个 CSRR 环的坐标由式(3)确定.

$$\begin{bmatrix} \rho_2, \varphi_2 \\ \rho_3, \varphi_3 \\ \rho_4, \varphi_4 \\ \rho_5, \varphi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1, 45^\circ \\ \rho_1, 90^\circ \\ \rho_1, 135^\circ \\ \rho_1, 180^\circ \end{bmatrix} \quad (3)$$

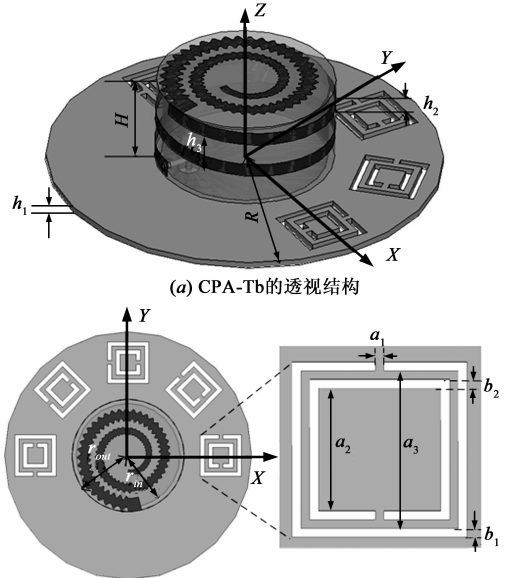


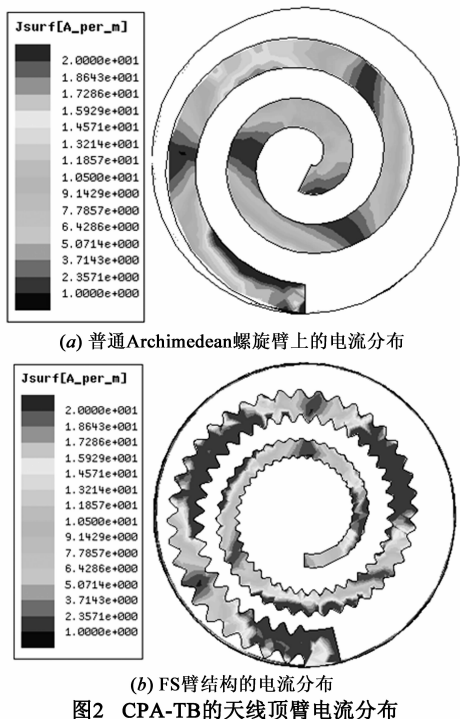
图1 基于CSRR-FS结构的倾斜波束天线结构图

## 3 仿真与分析

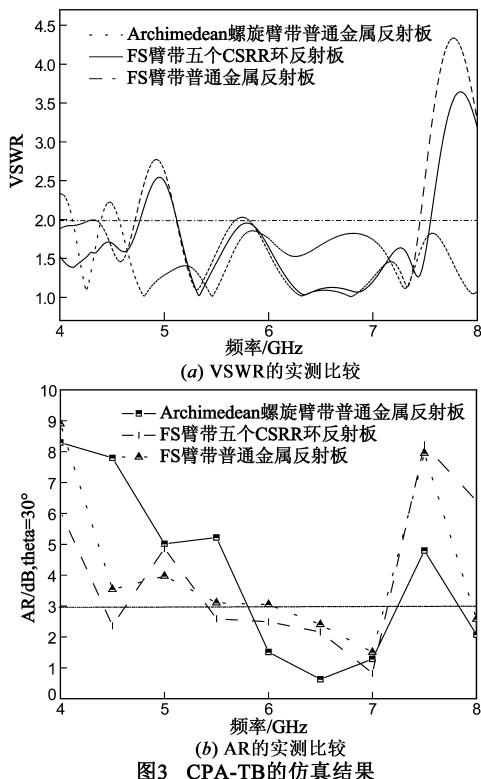
为验证 CSRR-FS 结构对 CPA-TB 的电流分布、VSWR 和 AR 的影响, 利用 Ansoft HFSS 12.0 软件对不同环境条件下 CPA-TB 辐射性能进行仿真.

相同普通金属反射板条件下, 仿真了 FS 臂和普通 Archimedean 螺旋臂上的电流分布、VSWR 曲线和 AR 曲线. 普通 Archimedean 螺旋臂的宽度为 2.6mm, 其余参数与图 1 参数相同. 仿真频率为 4-8GHz, 中心频率为 6GHz, 电流分布的仿真环境: 频率为 5.5GHz, 信号相位为  $0^\circ$ . CPA-TB 的天线顶臂电流分布如图 2 所示, 图 2(a) 是普通 Archimedean 螺旋臂上的电流分布, 图 2(b) 是 FS 臂的电流分布. 根据电流的分布情况可知: 与 Archimedean 螺旋臂的电流分布相比, FS 臂的辐射电流分布得到增强. 这主要是因为电流的流通过程得到延长; 同时 FS 结构是连续变化的, 减小了回波损耗; 而边缘连续变化的齿状结构带来了额外电流分布的不规则性, 从而更有利于自互补结构的形成, 拓展 AR 带宽.

图 3(a)、3(b) 分别给出了不同天线结构条件下的



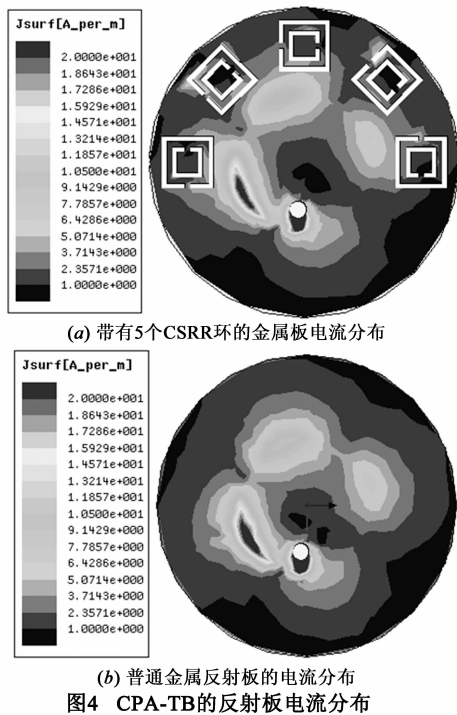
VSWR 曲线和 AR 曲线. 从图中在工作频段内, 基于 CSRR-FS 类型的 VSWR 改善明显, 尤其在 6.3-6.9GHz 范围内, 基于 CSRR-FS 类型的 CPA-TB 的 VSWR 基本保持在 1.2 以下. 这主要是因为一方面, FS 臂结构延长了天线的电流流电路径, 减小了天线的特征阻抗, 改善了天



线的阻抗匹配效果, 拓展了 VSWR 带宽; 另一方面, 反射板的五个 CSRR 环结构增强了馈电匹配, 改善了天线的驻波性能.

对于图 3(b) 中的 AR 曲线, 可以明显看到: 基于 AR < 3dB 的标准, 在仿真频段范围内, FS 臂类型的 AR 带宽由普通 Archimedean 螺旋臂的 1.2GHz(5.9 - 7.1GHz) 扩展到 1.6GHz(5.4 - 7.1GHz), 天线的低频段 AR 带宽得到扩展. 这主要是因为: 一方面 FS 臂由于边缘连续变化的齿状结构带来了额外电流分布的不规则性, 从而更有利于自互补结构的形成, 实现 AR 的拓展; 另一方面, 带有 5 个 CSRR 环的反射板, 减弱了馈电点位置的非平衡性影响, 增强了反射板的均衡性, 同时减弱了交叉极化分量, 从而改善了天线的 AR 特征.

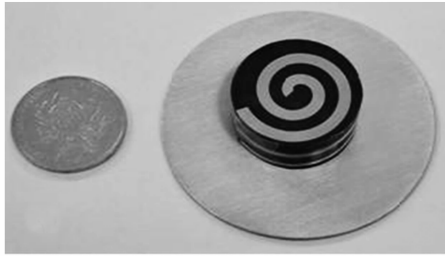
图 4 给出了 CPA-TB 的两种不同类型反射板的电流分布. 电流分布的仿真环境: 频率为 5.5GHz, 交流信号相位为 0°. 图 4 的 CPA-TB 反射底板电流分布对比情况可知: CSRR 环改变了 PEC 反射板的电流分布, 增强了反射板在波束倾斜方向部分的电流. 当 CSRR 环的谐振频点位于 CPA-TB 工作频段之外时, 一方面延长了电流路径, 实现了反射板的小型化; 另一方面, 5 个 CSRR 环改变了低频点反射板的电流分布, 减弱了交叉极化分量, 增强了反射板的均衡性, 改善了天线的 AR.



### 4 实测分析

为了验证具有 CSRR-FS 结构的 CPA-TB 的优越性, 实测了普通 Archimedean 螺旋臂类型、带有如图 1 所示

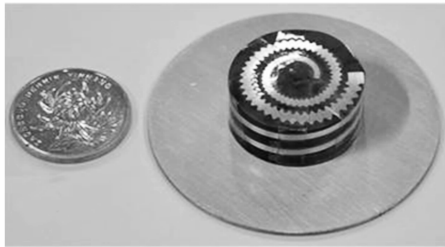
的5个CSRR环金属板和普通金属反射板的CPA-TB性能.天线的实物如图5所示.利用型号为AgilentN5230C的矢量网络分析仪进行天线VSWR的实测,结果如图6(a)所示;利用型号为云傲AT-1的转台和宽带喇叭天线(1-18GHz)构成远场测试环境,然后利用极化瓣图法<sup>[16-18]</sup>测量出天线的极化瓣图,进而得到天线的AR和倾角.AR实测结果如图6(b)所示.VSWR和AR的实测结果表明:天线的VSWR和AR带宽都得到拓展,实测与仿真结果吻合较好.



(a) 普通Archimedean螺旋臂类型



(b) 5个CSRR环的PEC反射板

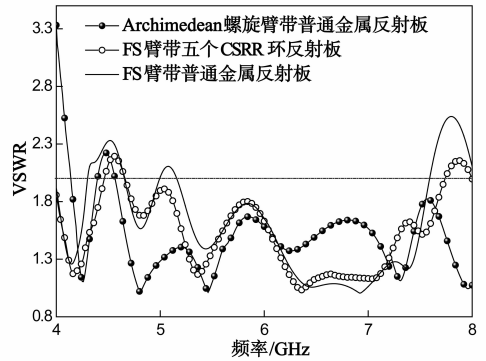


(c) PEC普通反射板

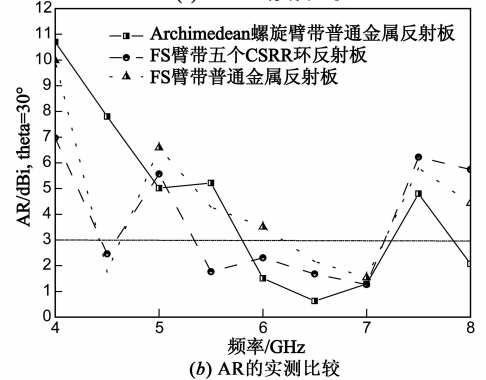
图5 CPA-TB的实物图

利用云傲AT-1转台、高品质圆极化信号发生器、标准增益天线和宽带喇叭(1-18GHz)构成远场的增益测试环境;分别两次测试水平放置和垂直放置的待测天线和标准增益天线,通过转台旋转测试标准增益天线和待测天线的方向图.然后利用增益比较法<sup>[15]</sup>得到天线的方向图及其增益.方向图实测结果如图7(a)-(d)

所示,天线的方向图实测结果表明:和其它两种结构相比,带5个CSRR环的PEC反射板在改善天线工作带宽的同时,保证了天线在5.5-7GHz内的30°波束倾斜角度,且天线增益保持不变.综合VSWR < 2, AR < 3dB且波束倾角30°的条件,本文设计的基于CSRR-FS结构的CPA-TB工作的相对带宽为24%,与文献[8]工作带宽8.6%相比,本文CPA-TB的工作带宽拓展了1.8倍.



(a) VSWR的实测比较

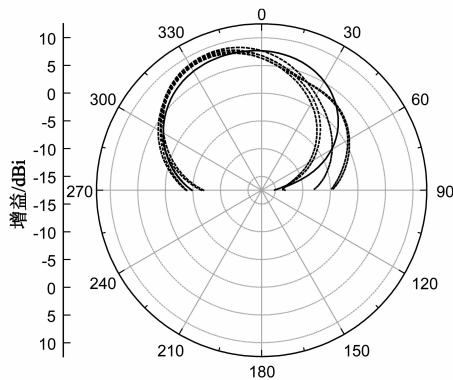


(b) AR的实测比较

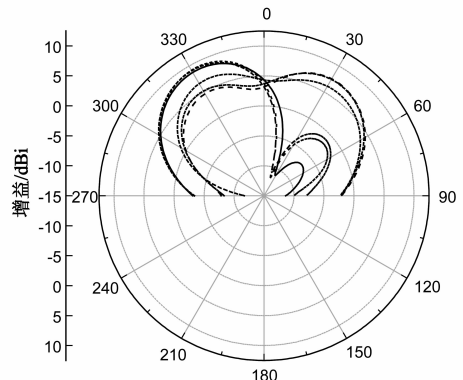
图6 CPA-TB的实测结果

## 5 结论

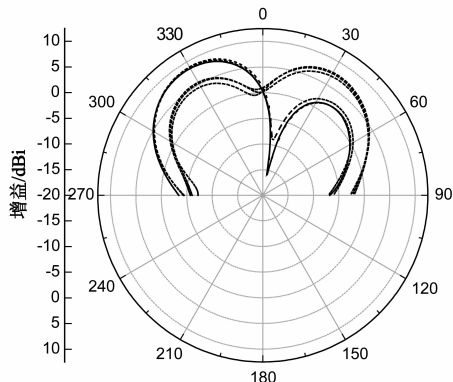
倾斜波束圆极化天线在无线通信中有着重要的应用.为了拓展带宽设计了CPA-TB的CSRR-FS结构,分析了结构的表面电流分布,通过比较显示出了所设计CSRR-FS结构的优越性,仿真与实测结果表明CSRR-FS结构不仅改善了CPA-TB的VSWR,更拓宽了天线的AR带宽.CSRR-FS结构的提出为进一步倾斜波束天线带宽的拓展提供了新途径.



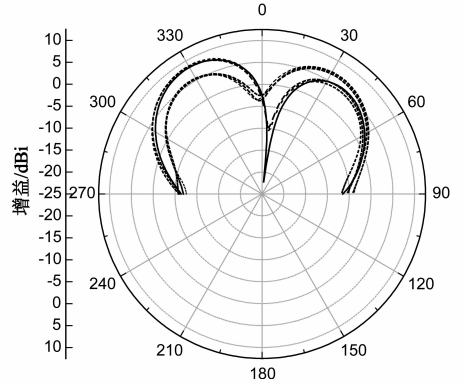
(a) 5.5GHz条件下的实测辐射方向图



(b) 6GHz条件下的实测辐射方向图



(c) 6.5GHz条件下的辐射方向图



(d) 7GHz条件下的辐射方向图

—  $\varphi=0^\circ$ , Archimedean螺旋臂带普通金属反射板    - - -  $\varphi=0^\circ$ , FS臂带5个CSRR环反射板    - · - ·  $\varphi=0^\circ$ , FS臂带普通金属反射板  
 - -  $\varphi=90^\circ$ , Archimedean螺旋臂带普通金属反射板    - · - ·  $\varphi=90^\circ$ , FS臂带5个CSRR环反射板    - · - ·  $\varphi=90^\circ$ , FS臂带普通金属反射板

图7 天线辐射方向图的测量结果

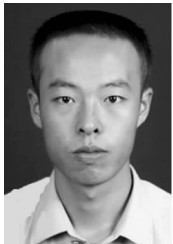
## 参考文献

- [1] J S Row, M C Chan. Reconfigurable circularly-polarized patch antenna with conical beam[J]. IEEE Trans on Antennas Propagat, 2010, 58(5): 2753 – 2757.
- [2] 李思佳, 曹祥玉, 高军, 郑秋容, 杨欢欢. 倾斜波束非对称 SAARS 微带天线设计[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版). 2014, 41(1): 204 – 209  
 LI Si-jia, CAO Xiang-yu, GAO Jun, ZHENG Qiu-rong, YANG Huan-huan. SAARS microstrip antenna design with asymmetrical structure and tilted beam[J]. Journal of xidian univ. 2014, 41(1): 204 – 209. (in Chinese).
- [3] 刘颜回, 聂在平. 非均匀阵列赋形功率方向图综合方法研究[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2086 – 2090.  
 LIU Yan-hui, NIE Zai-ping. Study on synthesizing nonuniform arrays with shaped Power patterns[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2086-2090. (in Chinese).
- [4] 龚文斌. 星载 DBF 多波束发射有源阵列天线[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2904 – 2909.  
 GONG Wen-bin. DBF multi-beam transmitting phased array antenna on LEO satellite[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12): 2904 – 2909. (in Chinese).
- [5] M Sazegar, Yu liang Zheng, Holger Maune, et al. Low-cost phased-array antenna using compact tunable phase shifters based on ferroelectric ceramics[J]. IEEE Trans. Microw. Theory Techniques, 2011, 59(5): 1265 – 1273.
- [6] H Nakano, Y Ogino, J. Yamauchi. Bent two-leaf antenna radiating a tilted, linearly polarized, wide beam[J]. IEEE Trans on Antennas Propagat, 2010, 58(11): 3721 – 3725.
- [7] H Nakano, Y Ogino, J. Yamauchi. Bent four-leaf antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagat Lett, 2011(10): 223 – 226.
- [8] H Nakano, S Kirita, N Mizobe, et al. External-excitation curl antenna[J]. IEEE Trans on Antennas Propagat, 2011, 59(11): 3969 – 3977.
- [9] D R Smith, D C Vier, W Pandilla, et al. Loop-wire medium for investigating plasmons at microwave frequencies[J]. Applied Physics Letters. 1999(75): 1425 – 1427.
- [10] R A Shelby, D R Smith, S Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292: 77 – 79.
- [11] 伍裕江, 聂在平, 乐铁军. 基于极化可重构天线的天线选择方案[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2252 – 2257.  
 WU Yu-jiang, NIE Zai-ping, LE Tie-jun. Antenna selection scheme based on polarization reconfigurable antenna[J]. Acta

Electronica Sinica, 2007, 35(12): 2252 – 2257. (in Chinese).

- [12] MMohammed, B Suwailam, F Omar, et al. Mutual coupling reduction between microstrip patch antennas using slotted-complementary split-ring resonators [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagat Lett, 2010(9): 876 – 878.
- [13] D S Miguel, A Vélez, F Aznar, et al. Applications of open split ring resonators and open complementary split ring resonators to the synthesis of artificial transmission lines and microwave passive components [J]. IEEE Trans on Microw Theory Techniques, 2009, 57(12): 3395 – 3403.
- [14] J Bonache, G Sisó, M Gil, et al. Application of composite right/left handed(CRLH)transmission lines based on complementary split ring resonators (CSRRs) to the design of dual-band microwave components[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Lett, 2008, 18(8): 524 – 526.
- [15] DJohn, J Ronald. Antennas: for all applications(Third Edition) [M]. Wiley Publishing Inc., New York, NY, 2002.
- [16] S Jacobsen, H O Roflsnes, R Paul. Characteristics of microstrip muscle-loaded single-arm archimedean spiral antennas as investigated by FDTD numerical computations[J]. IEEE Trans on Biomedical Engineering, 2005, 52(2): 321 – 330.
- [17] M Lee, A B Kramer, C C Chen, et al. Distributed lumped loads and lossy transmission line model for wideband spiral antenna miniaturization and characterization[J]. IEEE Trans on Antennas Propagat, 2007, 55(10): 2671 – 2678.
- [18] 孙竹, 钟顺时, 孔令兵, 高初, 汪伟, 金谋平. 宽带双波段双极化共口径 SAR 天线设计[J]. 电子学报. 2012, 40(3): 542 – 547.
- Sun Zhu, Zhong Shun-shi, Kong Ling-bing, Gao Chu, Wang Wei, Jin Mou-ping. Design of Broadband Dual-Band Dual-Polarized Share-Aperture SAR Antenna [J]. Acta Electronica Sinica. 2012, 40(3): 542 – 547. (in Chinese)

## 作者简介



**李思佳** 男, 1987 年生于陕西西安, 2009 年毕业于广西大学, 获电子信息工程专业学士学位, 2011 年获空军工程大学通信与信息系统专业硕士学位, 现为空军工程大学博士研究生, 主要从事斜波束天线(阵)、双极化天线(阵)设计, 人工电磁超材料设计及其在天线 RCS 减缩中的应用等方面研究. 至今已在物理学报、电子学报、西安电子科技大学学报、Journal of Applied

Physics, IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., Microw. Opti. Technol. Letts. 等国内外知名刊物上发表学术论文 40 余篇. 至今获得数学建模竞赛国家一等奖 1 次, 二等奖 2 次; 硕士学位论文获省级优秀硕士学位论文奖. 获第四届全国信息科学博士学位论坛国家三等奖, 个人主持空军工程大学研究生创新基金空军工程大学优秀博士论文创新基金各一项.

E-mail: lsj051@126.com



**曹祥玉** 女, 1964 年出生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 中国电子学会天线分会委员, IEEE senior member. 主要从事电磁场数值计算、电磁兼容、天线阵列分析与设计、人工电磁超材料及其在天线(阵列)RCS 减缩中的应用等方面的研究. 至今已在 IEEE Trans. Antennas Propag., IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., Microw. Opti. Technol. Letts., 物理学报、电子学报等国内外著名期刊发表论文 150 余篇, 其中 SCI、EI 和 ISTP 检索 80 余篇. 至今已获得国家和省部级奖项十余项.

E-mail: xiangyucaokdy@163.com



**郑秋容** 男, 1974 年出生, 副教授, 主要研究方向: 天线设计与分析, 人工电磁超材料及其在天线(阵列)RCS 减缩中的应用等方面的研究. 至今已在 IEEE Trans. Antennas Propag., IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 物理学报、电子学报等国内外著名期刊发表论文 40 余篇, 其中 SCI、EI 和 ISTP 检索 10 余篇.

E-mail: Zqr1620@sina.com



**刘涛** 男, 1976 年出生, 博士后, 工程师, 主要研究方向: 人工电磁超材料及其在天线(阵列)中的应用方面的研究. 已在 IEEE Trans. Antennas Propag., Microw. Opti. Technol. Letts., 物理学报、电波科学学报、电子与信息学报等国内外著名期刊发表论文 30 余篇, 其中 SCI、EI 和 ISTP 检索 10 余篇.

E-mail: lt9571@163.com.



**陈校平** 男, 1970 年出生, 副教授, 主要研究方向: 雷达系统设计, 天线设计. 至今已在北京邮电大学学报、中国科学等期刊上发表论文 30 余篇, 其中 SCI、EI 和 ISTP 检索 10 余篇. 至今已获得省部级奖项 5 项.

E-mail: Xiaoping\_chen@126.com