物理学报 Acta Physica Sinica

Chinese Physical Society

Institute of Physics, CAS

一种基于开口谐振环的高增益端射天线设计

刘红喜 高军 曹祥玉 刘艳芳 张迪 李思佳

A design of high-gain end-fire antenna based on split-ring resonator structures

Liu Hong-Xi Gao Jun Cao Xiang-Yu Liu Yan-Fang Zhang Di Li Si-Jia

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 64, 234101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.234101
在线阅读 View online: http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234101
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

海面与其上方双矩形截面柱复合散射的混合算法研究
Study on composite electromagnetic scattering from the double rectangular cross-section columns above rough sea surface using hybrid method
物理学报.2015, 64(17): 174101 http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174101

射电天文用太赫兹三通带频率选择表面设计
Design of triple bandpass frequency selective surface in terahertz wave band for radio astronomy
物理学报.2015, 64(17): 174103 http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174103

一种采用互补结构的宽阻带共模缺陷地滤波器
A broad stopband common-mode suppression defected ground structure filter with complementary structure
物理学报.2015, 64(16): 164101 http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164101

基于十字形结构的相位梯度超表面设计与雷达散射截面缩减验证
Design and radar cross section reduction experimental verification of phase gradient meta-surface based on cruciform structure
物理学报.2015, 64(16): 164102 http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164102

基于变换光学的椭圆形透明聚集器的设计研究
Design and study of the elliptically cylindrical transparent concentrator based on transformation optics
物理学报.2015, 64(15): 154102 http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154102

一种基于开口谐振环的高增益端射天线设计*

刘红喜[1)] 高军[1)†] 曹祥玉[1)] 刘艳芳[2)] 张迪[1)] 李思佳[1)]

1) (空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

2) (内蒙古超高压供电局, 呼和浩特 010080)

(2015 年 6 月 8 日收到; 2015 年 7 月 31 日收到修改稿)

基于开口谐振环 (split-ring resonator, SRR) 奇异的电磁特性, 设计并制备了一种覆盖 C 和 X 波段的高增益 SRR-Vivaldi 端射天线. 采用等效分析方法对 SRR 结构谐振特性进行了研究, 并将其应用于传统 Vivaldi 天线指数渐变槽线前方, 使 SRR 结构形成特殊谐振能力的引向器, 将天线表面电流集中于端射方向, 在保证天线尺寸和带宽不变的前提下, 实现了天线增益的有效提升. 仿真和测试结果表明, 新型 SRR-Vivaldi 天线在 C 波段增益平均提高 75.44%, xoy 面和 xoz 面半功率波束宽度都缩减 20° 以上; 在 X 波段增益平均提高 24.46%, xoz 面半功率波束宽度大约缩减 25°. 该结构具有低成本、设计简单、便于加工、利于共形等优点, 为端射天线提高增益和增强定向性提供了新思路.

关键词: 端射天线, Vivaldi 天线, 高增益, 开口谐振环

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf **DOI:** 10.7498/aps.64.234101

1 引 言

Vivaldi 天线作为典型的端射天线因其方便集成、易于制作和便携式的特点在图像系统 [1]、通信系统 [2]、超宽带系统等 [2−4] 领域得到了广泛的应用. 然而, 要保证 Vivaldi 天线较好的辐射特性, 天线长度应大于 $\lambda_{\max}$($\lambda_{\max}$ 为低频端介质波长)、天线宽度应大于 $\lambda_{\max}/2$ [5]. 但是在要求小尺寸 (如天线长度为 $\lambda_{\max}/3$) 的应用场合时, 天线的低频段方向性变差、增益比较低 [2−4,6]. 近期也提出一些改进方法, 例如使用阵列技术 [4,7]、多层结构 [8]、插入高介电常数介质等 [1] 来提高天线增益; 但这些方法非常复杂, 加工难度较高, 并且体积较大. 随着超材料的发展, 一些创新和有效的方法引入天线中来改善其增益和方向性 [6,9−16], 文献 [6] 利用单层或者多层各向异性零折射率超材料 (inhomogeneous and anisotropic zero-index metamaterials, IA-ZIM) 改善了 Vivaldi 天线高频段的方向性, 在 9.5—12.5 GHz 频带内增益提高 3 dB; 文献 [10] 利用非谐振人工材料 (non-resonant artificial material, NRAM) 提高了对拓槽线天线的增益, 其 3 dB 增益有效提升范围主要在天线工作频带的高频段 13—18 GHz; 文献 [13] 利用人工磁导体 (artificial magnetic conductor, AMC) 提高了微带天线增益; 文献 [14, 16] 利用频率选择表面 (frequency selective surface, FSS) 作为空间滤波器, 有效提高了微带天线增益. 如何有效提高 Vivaldi 天线端射方向低频段增益成为目前亟待解决的问题.

开口谐振环 (split-ring resonator, SRR) 奇异的电磁特性引起了学者的广泛关注. 文献 [17] 利用 SRR 的负磁导率特性实现了 Vivaldi 天线带内频率可调谐设计, 进一步扩展了天线阻抗带宽; 文献 [18] 利用 SRR 的互补结构 CSRR 与人工磁导体结合, 提出了一种对入射波极化敏感的人工磁导体, 实现了宽带 RCS 减缩; 文献 [19] 利用发卡式的 SRR 结构, 设计了一种柔性且频带单独可控的双频带超材料, 其带阻特性实现了信号的屏蔽作用;

* 国家自然科学基金 (批准号:61271100, 61471389), 陕西省自然科学基础研究计划项目 (批准号:2012JM8003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gjgj9694@163.com

© 2015 中国物理学会 Chinese Physical Society

文献 [20] 将SRR与金属短线相结合, 设计了工作在太赫兹波段的新型电磁感应透明材料. 然而, 对于SRR结构在提高端射天线增益方面的应用还不多见.

本文基于SRR结构特殊的谐振作用, 通过在传统Vivaldi天线渐变槽线前方加载SRR结构, 使天线辐射前方形成特殊谐振功能的引向器, 设计了一种覆盖C和X波段的高增益SRR-Vivaldi端射天线, 在保证天线尺寸和带宽不变的前提下有效提高了天线的增益. 仿真和测试结果表明, 新型SRR-Vivaldi天线在C波段增益平均提高75.44%, xoy面和xoz面半功率波束宽度都缩减20° 以上; 在X波段增益平均提高24.46%, xoy面半功率波束宽度基本没有变化、xoz面半功率波束宽度大约缩减25° 以上. 同时, 该结构具有低成本、设计简单、便于加工、利于共形的优点, 为端射天线提高增益、改善方向性提供了新思路.

2 SRR结构设计与分析

2.1 SRR单元结构设计

选择单元结构的材料类型对于天线的整体性能十分重要, 将SRR谐振器[21]应用于本文所设计的Vivaldi天线中, SRR单元设计如图1 (a) 所示, 黄色部分是SRR环, 灰色部分是厚度1 mm、介电常数为2.2的聚四氟乙烯介质布板, 具体参数尺寸如表1所示.

表1 SRR单元尺寸
Table 1. Cell size of SRR.

L_1/mm	L_2/mm	W_1/mm	W_2/mm	S/mm
2	1.6	1	0.6	0.4

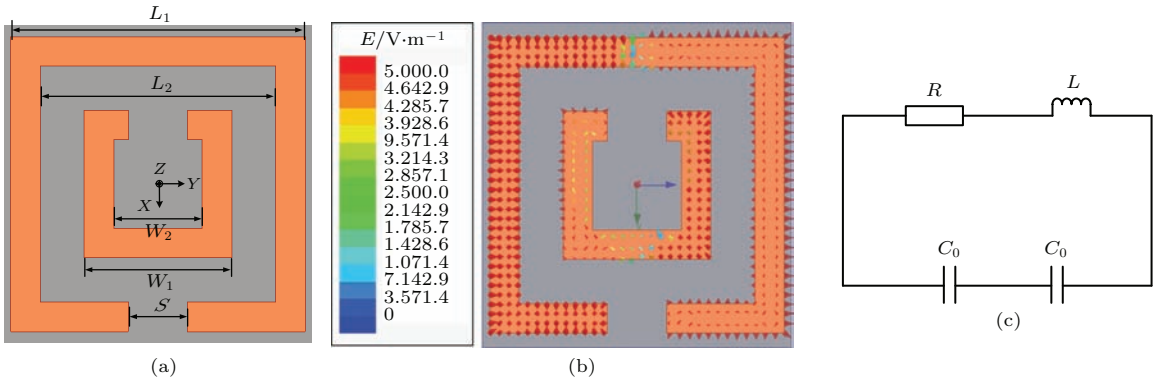

图1 (网刊彩色) SRR单元结构 (a) SRR单元设计; (b) SRR 表面电场分布; (c) SRR单元等效电路
Fig. 1. (color online) Unit structure of SRR: (a) Cell design of the SRR; (b) electric field distribution of SRR; (c) the equivalent circuit of the SRR.

将方形SRR置于TEM波导中, 沿z轴方向的波导壁设为磁壁 (PMC), 沿y轴方向的波导壁设为电壁 (PEC), 电磁波沿x轴方向传播, SRR在y轴方向电壁的镜像作用下可以等效成沿y轴方向无限周期的SRR阵列. 采用全波仿真分析得到SRR表面电场分布情况如图1 (b) 所示, 分析双环之间的电场分布可知, 开口缝右侧的电场方向都是从外环指向内环, 而左侧的电场方向从内环指向外环. 说明SRR的全电容主要由两环之间的电容决定, 因此可以等效为开口缝隙左右两侧双环之间的串联电容. 于是可以得到图1 (c) 所示的等效电路模型, SRR的谐振频率可由 $f_0 = (1/2)\pi\sqrt{LC_0/2}$ 得到. 其中, 左右两侧双环之间电容 $C_0 = 2L_1C_r$, L_1 是外环的边长, C_r 是两个金属环之间的单位长度的电容值[22]. L是SRR的全电感, 在计算SRR电感时, 可等效为一个完全闭合环的电感[23]. 由于金属损耗产生的等效电阻R对谐振频率没有影响, 所以本文不对其进行讨论.

2.2 SRR单元结构谐振特性分析

通过提取一个SRR结构的特性参数, 来进一步研究周期结构SRR的电磁特性. 如图2 (a) 所示的摆放形式, 使波导中TEM波的磁场H垂直穿过SRR所在平面, 电场E平行于SRR开口所在边的方向.

设TEM波导是一个边长2.2 mm × 2.1 mm × 6 mm的长方体. SRR的外环尺寸为$L_1 = 2$ mm, 两环之间的距离及环宽度相同都为$L_1 - L_2 = 0.4$

mm, 内外环的开口宽度也相同为 $S = 0.4$ mm.

图 2 (a) 所示方形 SRR 的摆放形式, 在 TEM 波导中的传输特性如图 2 (b) 所示. 在 8.5 GHz 以下频段 $S_{11} \leqslant -10$ dB, 在 8.5—13.6 GHz 频带范围内 -2.6 dB $\leqslant S_{11} \leqslant -10$ dB, 在 13.6 GHz 以上频段形成阻带, 电磁波传输受到抑制, 并在频率 16.8 GHz 处出现最小传输系数.

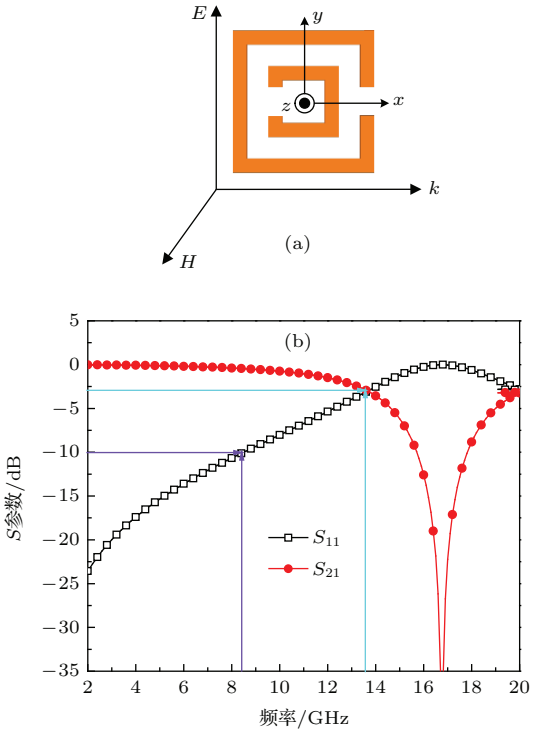

图 2 SRR 结构辐射性能 (a) SRR 结构置于 TEM 波导中; (b) 传输特性曲线

Fig. 2. Radiation performance of the SRR structure: (a) SRR structure in TEM waveguide; (b) curves of transmission characteristics.

3 SRR-Vivaldi 天线设计与分析

3.1 Vivaldi 天线理论分析

Vivaldi 天线结构如图 3 所示, 是一种介质基板双面印刷天线. 灰色部分为介质基板, 正面为指数渐变槽线、等宽度槽线和圆形谐振腔构成的金属辐射贴片; 背面为微带馈线和扇形微带短截线组成的馈电结构.

一般情况下, 天线工作频带的低频端介质波长是对应槽线宽端最大宽度的 2 倍; 而天线工作频带的高频端则受到槽线窄端宽度的限制, 窄端宽度一般为最高频率处对应波长的 0.02 倍 [4]. 在实际应用中, 考虑到天线尺寸大小、介质基板损耗等因素, 在保证天线具有较好辐射特性的前提下, 需要尽可能的小型化.

确定了槽线的两端宽度 H, W_{SL} 和长度 L_0 后, 建立合适的坐标系, 就可得出图 3 (a) 中 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 两点的坐标值. 再根据公式

$$y = \pm(c_1\,\mathrm{e}^{\delta x} + c_2) \tag{1}$$

可推导出渐变指数函数的数学表达式, 系数 c_1 和 c_2 可通过以下公式导出:

$$c_1 = \frac{y_2 - y_1}{\mathrm{e}^{\delta x_2} - \mathrm{e}^{\delta x_1}}, \tag{2}$$

$$c_2 = \frac{y_1\,\mathrm{e}^{\delta x_2} - y_2\,\mathrm{e}^{\delta x_1}}{\mathrm{e}^{\delta x_2} - \mathrm{e}^{\delta x_1}}, \tag{3}$$

其中, δ 为指数函数的渐变率, 决定着天线的波束宽度, 一般取 $\delta < 1$.

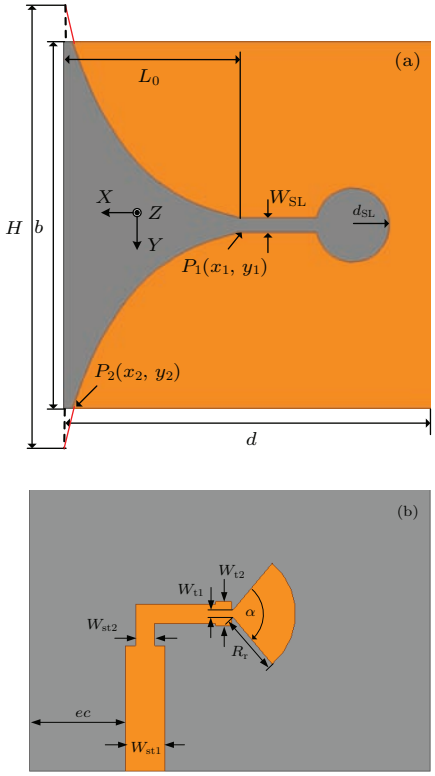

图 3 Vivaldi 天线结构图 (a) 正面图; (b) 背面图

Fig. 3. Vivaldi antenna structure: (a) Front elevation; (b) back elevation.

3.2 SRR-Vivaldi 高增益天线设计

针对常规 Vivaldi 天线尺寸大、低频段前向辐射增益低的问题, 本文提出一种提高 Vivaldi 天线增益的新方法, 通过在传统 Vivaldi 天线渐变槽线前方加载 SRR 结构, 使天线辐射前方形成特殊谐振功能的引向器, 将天线表面电流集中于端射方向, 明显提高天线的辐射性能.

表 2 参数优化后单元尺寸

Table 2. Cell size after parameters optimization.

b/mm	d/mm	H/mm	W_{SL}/mm	d_{SL}/mm	L_0/mm	ec/mm	W_{st1}/mm	W_{st2}/mm
25	25	28.9	1	5	13.5	4.8	2.5	2
W_{t1}/mm	W_{t2}/mm	R_r/mm	$\alpha/(^\circ)$	L_1/mm	L_2/mm	W_1/mm	W_2/mm	S/mm
0.5	1.2	4.1	100^0	2	1.6	1	0.6	0.4

图 4 为所设计的 SRR-Vivaldi 新型天线结构, 选取介电常数为 2.2 的介质基板材料 FR4_epoxy, 天线单元尺寸为 25 mm × 25 mm × 1 mm (0.33λ × 0.33λ × 0.013λ) (λ 为 4 GHz 处对应介质波长), 指数函数的渐变率 $\delta = 0.23$. 该天线具体尺寸如表 2 所示.

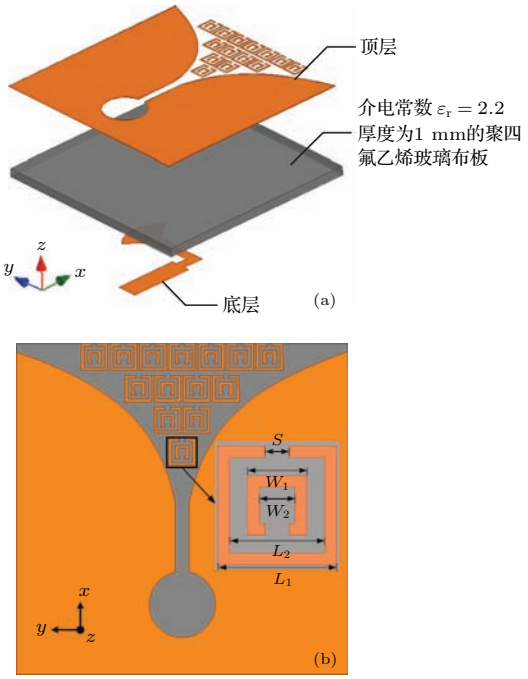

图 4 SRR-Vivaldi 天线 (a) 三维图; (b) 正面图

Fig. 4. SRR -Vivaldi antenna: (a) 3D graph; (b) front elevation.

利用有限元仿真软件 Ansoft HFSS14 进行仿真, 天线的 S_{11} 曲线如图 5 所示, 在 C 和 X 波段 SRR-Vivaldi 天线反射系数曲线较深, 阻抗匹配更好; 由于在 13.6—19.8 GHz 频带内 SRR 结构表现出阻带特性, 因此高频段辐射受到抑制, 产生陷波. 所以 SRR-Vivaldi 天线在高频端带宽有所缩减.

天线增益曲线如图 6 所示, 在传统 Vivaldi 天线渐变槽线前方加载 SRR 结构能够提高天线的增益, 特别是低频段的增益; 这主要是由于加载 SRR 结构后, 在天线辐射口径方向起到引向器作用, 将电磁能量引到辐射前方, 端射方向谐振能力得到有效增强. SRR-Vivaldi 天线在 4—13.6 GHz 频率范围内增益保持在 6 dBi 以上, 相比于原始 Vivaldi 天线, 在有效工作频带范围内增益均有提高; 在 X 波段增益平均增加 24.46%, 由于在 13.6—19.8 GHz 以上频率范围 SRR 结构表现出阻带特性, 因此 SRR-Vivaldi 天线增益急剧下降形成陷波带; SRR-Vivaldi 天线在 4—8 GHz 频带内增益都在 8 dBi 以上, 相比于原始 Vivaldi 天线增益平均提高 4.3 dB, 这与前面所分析 SRR 传输特性曲线在 4—8.5 GHz 频带内回波损耗较低相对应, 此时 SRR 结构引向作用最强, 明显把电磁能量集中于端射方向.

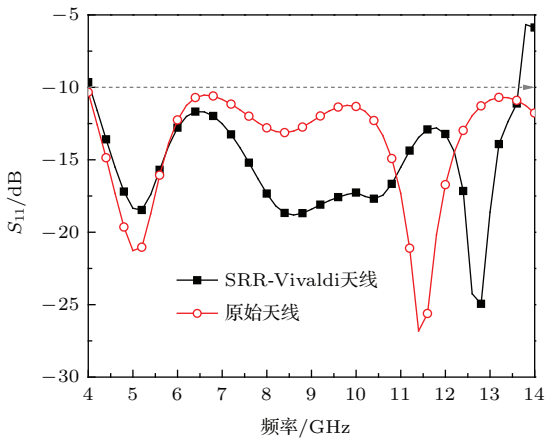

图 5 天线的 S_{11} 曲线

Fig. 5. S_{11} curves of antenna.

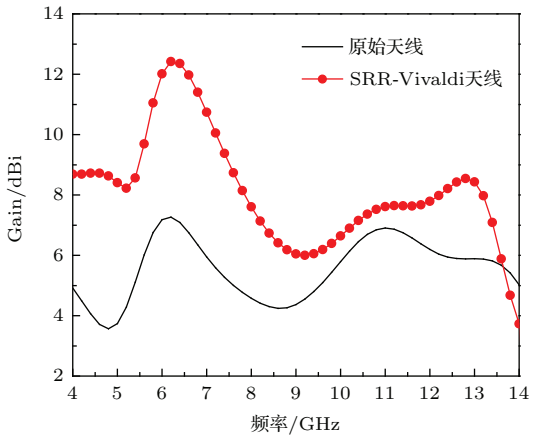

图 6 端射方向增益曲线

Fig. 6. Gain curves of the end-fire direction.

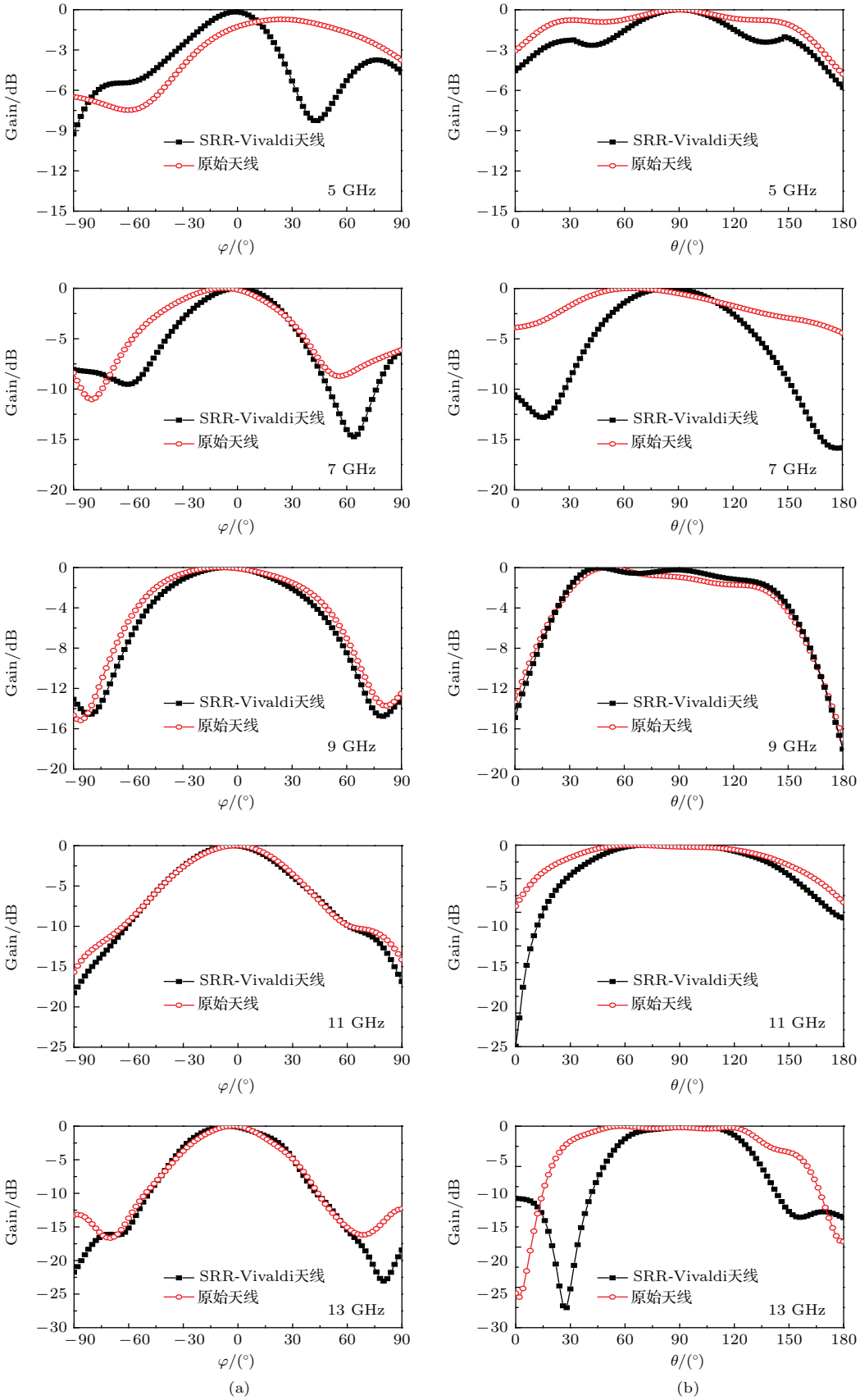

图 7 天线仿真辐射方向图 (a) *xoy* 面方向图; (b) *xoz* 面方向图

Fig. 7. Simulated radiation pattern of antenna: (a) *xoy*-plane patterns; (b) *xoz*-plane patterns.

天线二维辐射方向图如图7所示, 分析结果如表3所示. 与原始天线相比, SRR-Vivaldi天线 xoy, xoz 面方向图波束均匀有所变窄, 新型SRR-Vivaldi天线在C 波段 xoy 面半功率波束宽度缩减都在20° 以上、xoz 面半功率波束宽度缩减30° 以上, 在X 波段 xoy 面半功率波束宽度基本没有变化、xoz 面半功率波束宽度大约缩减25° 以上. 天线方向性明显增强, 端射性能较好, 说明本文所设计的SRR-Vivaldi 天线能够有效改善天线方向性, 特别是低频段效果更加明显.

如图8所示, 分析新型SRR-Vivaldi天线与原始天线在不同频点处的电场分布, 可以看出SRR-Vivaldi天线电场能量主要集中于渐变槽线前方, SRR结构起到明显的引向器作用, 天线端射方向辐射性能得到了有效改善, 证明利用SRR结构特殊的引向器作用可以提高天线的增益.

表3 加载SRR结构前后天线辐射性能

Table 3. Radiation properties of antenna with and without adding SRR structure.

加载方式	辐射性能		5 GHz	7 GHz	9 GHz	11 GHz	13 GHz
原始天线	增益/dBi		3.7	5.9	4. 3	6.88	5.88
	波束宽度/°	xoy 面	85.3	74.2	94	59.7	48.8
		xoz 面	180	134.8	160.3	129.2	132.3
SRR-Vivaldi 天线	增益/dBi		8.4	10.7	6.05	7.61	8.43
	波束宽度/°	xoy 面	56.2	57.6	80.8	58.1	45.0
		xoz 面	153.5	72.2	138.7	104.3	79.5

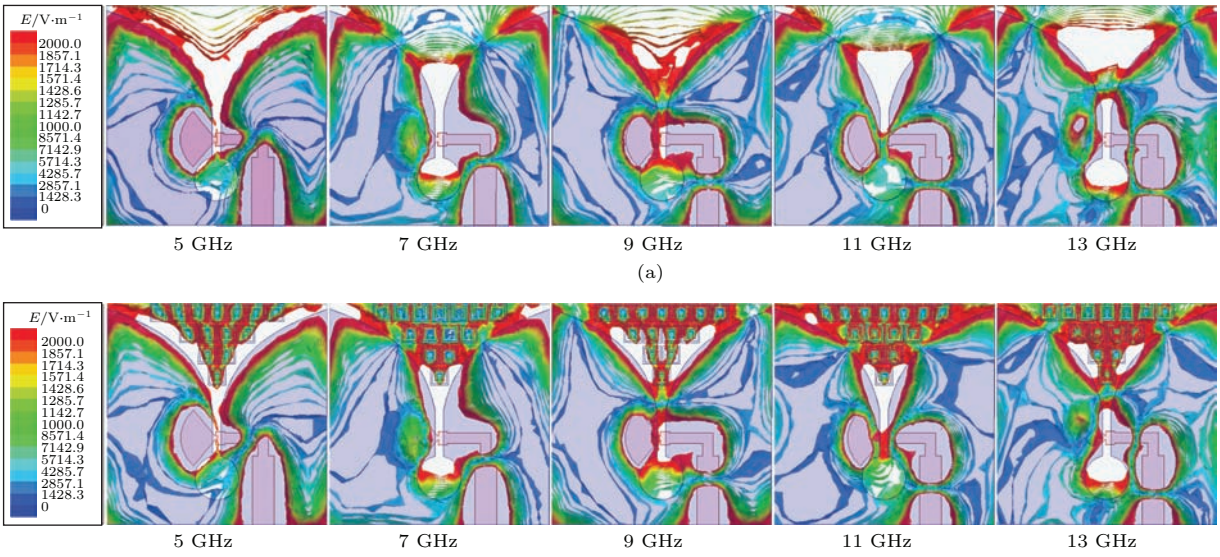

图8 加载SRR结构前后天线电场分布比较 (a) 原始天线; (b) SRR-Vivaldi天线

Fig. 8. Electric field distribution comparison of antenna with and without adding SRR structure: (a) The original antenna; (b) SRR-Vivaldi antenna.

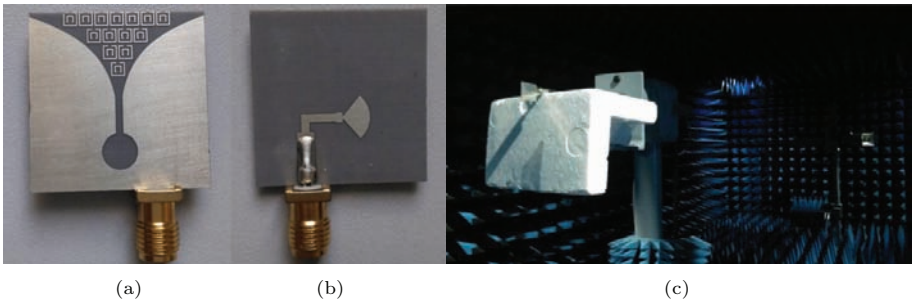

图9 天线实物图 (a) 正面图; (b) 背面图; (c) 实测环境

Fig. 9. Photograph of fabricated antenna: (a) Front elevation; (b) back elevation; (c) testing environment.

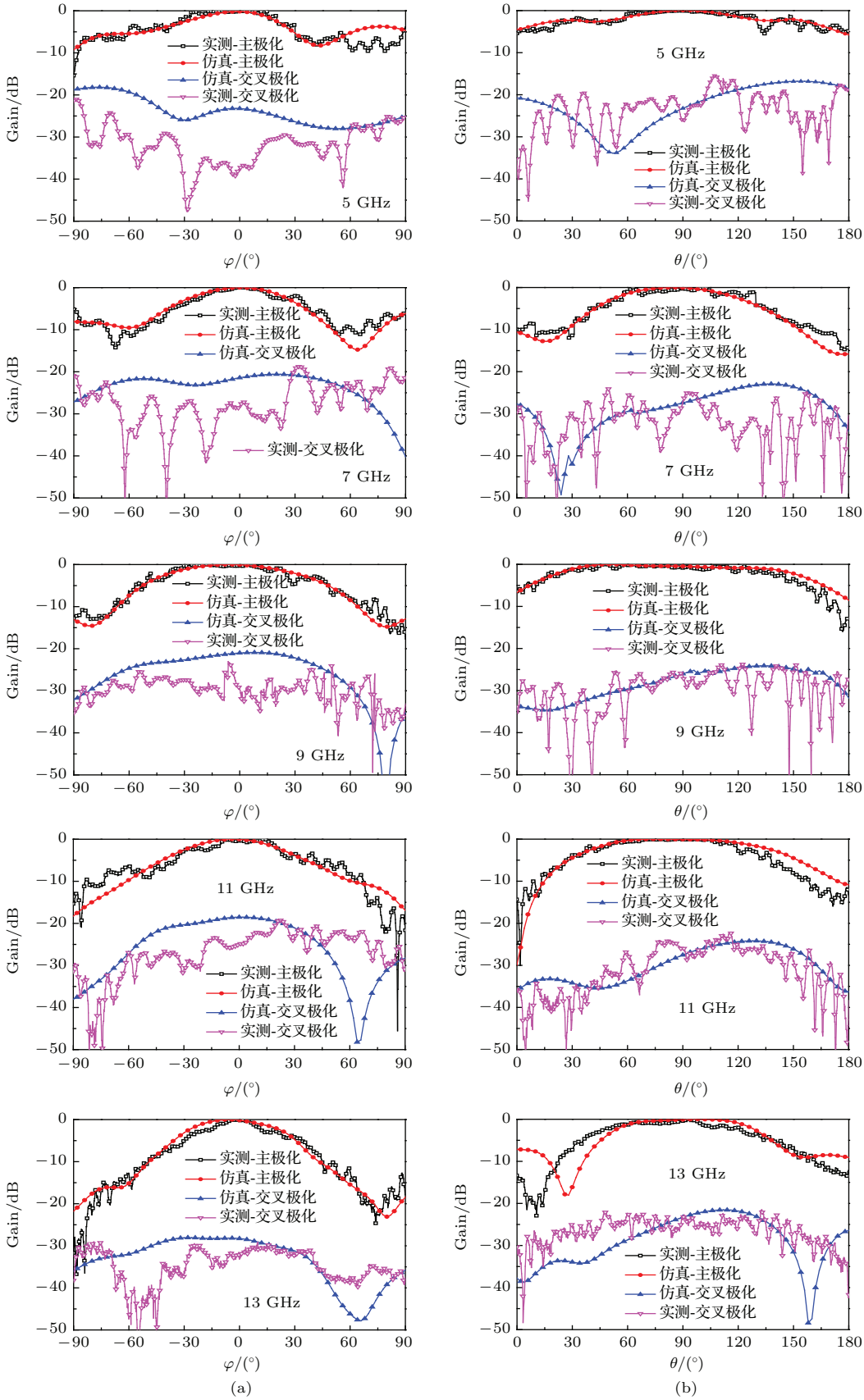

图 10 仿真和实测 SRR-Vivaldi 天线辐射方向图 (a) xoy 面方向图; (b) xoz 面方向图

Fig. 10. Simulated and measured radiation pattern of SRR-Vivaldi antenna: (a) xoy-plane patterns; (b) xoz-plane patterns.

3.3 实物加工测试

选取辐射性能最优的SRR-Vivaldi天线模型加工实物, 天线照片如图9所示. 并在标准微波暗室中用Agilent N5230C矢量网络分析仪测试了天线S_{11}曲线和方向图.

SRR-Vivaldi天线在工作频带内的xoy面和xoz面仿真和实测二维辐射方向图, 如图10所示. 可以看出, 在各个频点处实测与仿真结果基本吻合, 同时具有较低的交叉极化分量, 验证了设计的可靠性. 实测与仿真结果之间存在较小的误差, 这主要源于加工精度和测量误差.

SRR-Vivaldi天线仿真和实测S_{11}曲线如图11所示, 可以看出在4—13.6 GHz频带范围内$S_{11} < -10$ dB, 实测和仿真曲线基本吻合.

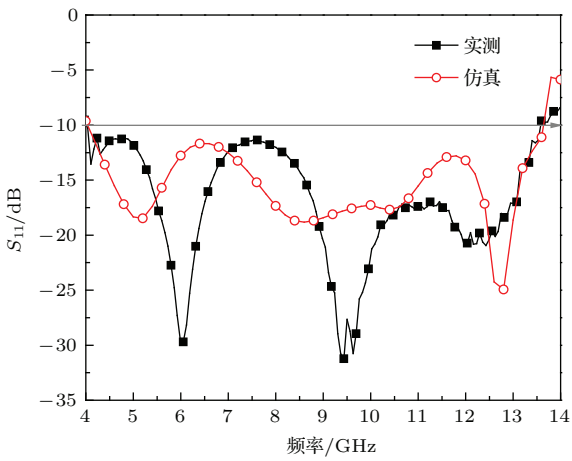

图11 SRR-Vivaldi天线的仿真和实测S_{11}曲线

Fig. 11. Simulated and measured S_{11} curves of SRR-Vivaldi antenna.

4 结 论

本文将开口谐振环与Vivaldi天线相结合, 提出了一种提高端射天线增益的新方法. 通过在传统Vivaldi天线渐变槽线前方加载SRR结构, 使天线辐射前方形成特殊谐振功能的引向器, 将天线辐射能量集中于端射方向, 明显提高了天线端射方向增益; 并通过仿真与实测进行了验证, 结果表明: 新型SRR-Vivaldi天线在C波段增益平均提高75.44%, xoy面和xoz面半功率波束宽度都缩减20° 以上; 在X波段增益平均提高24.46%, xoz面半功率波束宽度大约缩减25° 以上, 实现了在较宽频带内提高天线的增益. 证明所设计的SRR-Vivaldi天线具有高增益、高定向性, 低交叉极化的特点, 这种新型天线在端射、高增益、高定向性天线设计中, 有很好的借鉴作用.

参考文献

[1] Jeremie B, Michal O, Elise C F 2010 *IEEE Trans. Antennas Propagat* **58** 2318

[2] Aaron Z H, Tutku K, Erdem T 2008 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter* **7** 656

[3] Bai J, Shi S Y, Dennis W P 2011 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech* **59** 1051

[4] Wang Y W, Wang G M, Yu Z W, Liang J G, Gao X J 2014 *IEEE Trans. Antennas Propagat* **62** 4961

[5] Schaubert D H, Aas J A, Cooley M E 1994 *IEEE Trans. Antennas Propagat* **42** 1161

[6] Zhou B, Li H, Zou X Y, Cui T J 2011 *Progress In Electromagnetics Research* **120** 235

[7] Guntupalli A B, Wu K 2014 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter* **13** 384

[8] Yeap S B, Chen Z M 2010 *IEEE Trans. Antennas Propagat* **58** 2811

[9] Wu B I, Wang W, Pacheco J, Chen X, Grzegorczyk T M, Kong J A 2005 *Progress In Electromagnetics Research* **51** 295

[10] Chen L, Lei Z Y, Yang R, Fan J, Shi X W 2015 *IEEE Trans. Antennas Propagat* **63** 395

[11] Lovat G, Burghignoli P, Capolino F, Jackson D R, Wilton D R 2006 *IEEE Trans. Antennas Propagat* **54** 1017

[12] Zhou H, Pei Z B, Qu S B, Zhang S, Wang J F, Duan Z S, Ma H, Xu Z 2009 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter* **8** 538

[13] Cook B S, Shamim A 2013 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter* **12** 76

[14] Ge Y H, Esselle K P, Bird T S 2012 *IEEE Trans. Antennas Propagat* **60** 743

[15] Prakash P, Abegaonkar M P, Basu A, Koul S K 2013 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter* **12** 1315

[16] Yuan Z D, Gao J, Cao X Y, Yang H H, Yang Q, Li W Q, Shang K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014102 (in Chinese) [袁子东, 高军, 曹祥玉, 杨欢欢, 杨群, 李文强, 商楷 2014 物理学报 **63** 014102]

[17] Debdeep S, Kumar V S *Proceedings of the"2013 International Symposium on Electromagnetic Theory"*. Hiroshima, Japan, May 20–23, 2013 p466

[18] Zhao Y, Cao X Y, Gao J, Yao X, Ma J J, Li S J, Yang H H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154204 (in Chinese) [赵一, 曹祥玉, 高军, 姚旭, 马嘉俊, 李思佳, 杨欢欢 2013 物理学报 **62** 154204]

[19] Liu H W, Zhu S S, Wen P, Qin F, Ren B P, Xiao X, Hou X Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 038108 (in Chinese) [刘海文, 朱爽爽, 文品, 覃凤, 任宝平, 肖湘, 侯新宇 2015 物理学报 **64** 038108]

[20] Ding C F, Zhang Y T, Yao J Q, Sun C L, Xu D G, Zhang G Z 2014 *Chin. Phys. B* **23** 124203

[21] Tang W X, Zhao H, Zhou X, Chin J Y, Cui T J 2008 *Progress In Electromagnetics Research B* **8** 103

[22] Bahl I, Bhartia P (translated by Zheng X) 2006 *Microwave Solid State Circuit Design* (Vol. 2) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp53–80 (in Chinese) [(美) 巴尔, 巴希尔著 (郑新译) 2006 微波固态电路设计 (北京: 电子工业版社) 第 53—80 页]

[23] Marques R, Mesa F, Martel J, Medina F 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 2572

A design of high-gain end-fire antenna based on split-ring resonator structures*

Liu Hong-Xi[1)] Gao Jun[1)†] Cao Xiang-Yu[1)] Liu Yan-Fang[2)] Zhang Di[1)] Li Si-Jia[1)]

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

2) (*Inner Mongolia Ultra High Voltage Power Supply Bureau, Hohhot 010080, China*)

(Received 8 June 2015; revised manuscript received 31 July 2015)

Abstract

Vivaldi antennas have wide applications in practice due to the ultra-wide band properties; however, their gain and directivity are relatively low. In this paper, a new method is presented to improve the gain and directivity of Vivaldi antennas in a broad band using split-ring resonator (SRR). Based on the peculiar electromagnetic properties of SRR, a novel high-gain SRR-Vivaldi end-fire antenna in C and X bands is designed and fabricated. The size of the antenna is only $0.33\lambda \times 0.33\lambda \times 0.013\lambda$, a significant miniaturization. Equivalent analysis method has been adopted to study the resonance characteristic of an SRR structure. By adding the SRR structures the singular metamaterials in the front of the Vivaldi antenna have an exponential taper slot, and the SRR structures can play a role as a director which has the ability to enhance the antenna's directivity so that the surface currents will focus on the end-fire direction. The SRR structures have been analyzed, designed, and fabricated, which can be embedded into the original Vivaldi antenna smoothly and compactly. As a result, the gain of the SRR-Vivaldi antenna are enhanced effectively, while the size and bandwidth of the original antenna can be kept, with the reflection coeffcient less than −10 dB from 4 to 13.6 GHz after using SRR. The novel Vivaldi antenna based on the SRR has good features of high gain, high directivity, low return loss and low cross-polarization. Compared to the original Vivaldi antenna, the simulation and measured results demonstrate that the gain of the novel SRR-Vivaldi antenna in C band has been increased by an average value of 75.44% and the half-power beam width has been decreased by 20 degrees in xoy and xoz planes. Meanwhile, the gain has been increased by an average value of 24.46% in X band and the half-power beam width has been decreased by 25 degrees in xoz plane. Testing result of the fabricated antenna demonstrates the reliability of the design. A good agreement between simulations and measurements is obtained. The design owns the merits of low cost, simple design and ease in fabrication and conformation, thus provides a new idea for end-fire antenna gain and directivity improvement. The new antenna has great potentials in applications.

Keywords: end-fire antenna, Vivaldi antenna, high gain, split-ring resonator

PACS: 41.20.Jb, 73.20.Mf **DOI:** 10.7498/aps.64.234101

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61271100, 61471389) and the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2012JM8003).

† Corresponding author. E-mail: gjgj9694@163.com