

# Y 形缝隙加载小型化超宽带 Vivaldi 端射天线

刘红喜, 高 军\*, 李思佳, 张 迪

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

**摘要** 针对常规 Vivaldi 天线尺寸大、低频段前向辐射增益低的问题,设计了一款覆盖 2.7~18.3 GHz 的小型化高增益超宽带端射天线。该天线通过在辐射贴片两侧加载 Y 形缝隙的方法,将天线表面电流汇聚于槽线附近,使天线的辐射特性明显提高。改善天线的阻抗匹配特性,展宽天线带宽,提高天线的增益,增强天线端射效果,天线的尺寸仅为 25 mm×25 mm×1 mm,实现了小型化。低频部分(2.7~8 GHz)增益比原始天线提高最大值为 3.5 dB。通过天线实物的加工和测试,进一步验证了设计的可靠性。

**关键词** Vivaldi 天线;端射天线;小型化;高增益;超宽带

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.016

**中图分类号** TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0073-05

## Y-shaped Aperture Loaded Miniaturized Ultra-wideband Vivaldi End-fire Antenna

LIU Hong-xi, GAO Jun\*, LI Si-jia, ZHANG Di

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

**Abstract:** The paper proposes a miniaturized, high-gain, ultra-wideband and end-fire antenna which covers 2.7~18.3 GHz band to overcome the large size and small forward gain at low frequency of conventional Vivaldi antenna. By adding Y-shaped apertures on both sides of the radiation patch, the surface current of antenna converges near the through line, so the radiation property is improved, including the impedance bandwidth, the antenna gain and the end-fire effect. The size of the antenna is only 25 mm×25 mm×1 mm, thus achieving a significant miniaturization. The gain of low frequency part (2.7~8 GHz) is increased to a maximum value of 3.5 dB compared with the original antenna. The test result of the fabricated antenna demonstrates the reliability of the design.

**Key words:** Vivaldi antenna; end-fire antenna; miniaturization; high-gain; ultra-wideband

超宽带(UWB, Ultra-Wideband)天线在无线通信领域应用非常广泛,如何设计同时满足小型化、较宽的阻抗带宽和良好的辐射性能的天线是目前亟待解决的问题。Vivaldi 天线(即指数线型锥削槽天线)是用于 UWB 技术的最佳天线之一,1979 年由 Gibson 首次提出<sup>[1]</sup>,它是一种综合性能较为优良的

锥削槽天线。作为一种端射行波天线,理论上 Vivaldi 天线应具有无限大的带宽,但实际上传统 Vivaldi 天线的工作频带被天线口径尺寸限制。为保证锥削槽天线的有效辐射,天线宽度应大于  $1/2 \lambda_{\max}$  (低频端介质波长)<sup>[2]</sup>。Vivaldi 天线有宽的阻抗带宽,低交叉极化、高定向性的辐射方向图。然而,为

收稿日期:2014-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271100,61471389),陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2012JM8003)

作者简介:刘红喜(1989—),男,内蒙古包头人,硕士生,主要从事端射天线,人工电磁材料等研究.E-mail:hongxi\_liu517@163.com

\*通信作者:高 军(1962—)男,教授、硕士生导师,主要从事天线与电磁兼容,电磁超材料等研究.E-mail:gjgj9694@163.com

引用格式:刘红喜,高军,李思佳,等.Y 形缝隙加载小型化超宽带 Vivaldi 端射天线[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):73-77. LIU Hongxi, GAO Jun, LI Sijia, et al. Y-shaped Aperture Loaded Miniaturized Ultra-wideband Vivaldi End-fire Antenna[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(2): 73-77.

了达到良好的性能, Vivaldi 天线总是需要大的天线尺寸<sup>[3]</sup>。尽管锥形 Vivaldi 天线的内外边缘也可以拓宽带宽, 提高辐射性能<sup>[4-6]</sup>, 但尺寸较大。

为了实现 Vivaldi 天线的小型化, 文献[6]提出对拓 Vivaldi 天线, 利用锥形槽边缘延伸突破低频端限制, 实现天线尺寸小型化, 但也需要相对大的尺寸; 文献[7]提出了一种小型对拓 Vivaldi 天线, 具有从 3.1~10.6 GHz 的阻抗带宽, 但是这种设计以降低天线增益为代价; 文献[8]用一个椭圆形的带状导体改进渐变槽线天线, 文献[9]采用矩形缝隙加载技术, 尽管采用这两种技术阻抗匹配能够得到改善, 但天线尺寸仍然较大。

本文对传统 Vivaldi 天线进行改进, 采用在辐射贴片上加载“Y”字形缝隙, 相比于文献[8]和[9]方法, 该技术非常有效的扩展了天线的阻抗带宽。与文献[4~6]相比, 在取得相似的阻抗带宽和增益的前提下, 他们的尺寸分别为 41 mm×48 mm、50 mm×50 mm 和 48 mm×60 mm, 本文设计的天线尺寸仅有 25 mm×25 mm, 相对带宽达到 148.6%, 实现了明显的宽带小型化。天线辐射特性良好, 高频部分(8~18.3 GHz)增益保持在 4.5 dBi 以上, 最大增益为 7.1 dBi; 低频部分(2.7~8 GHz)增益比原始天线提高最大值为 3.5 dB。

### 1 理论分析

Vivaldi 天线结构见图 1, 是一种介质基板双面印刷天线。绿色部分为介质基板, 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, 如图中蓝色部分; 背面为微带馈线和扇形微带短截线组成的馈电结构, 如图中红色部分。

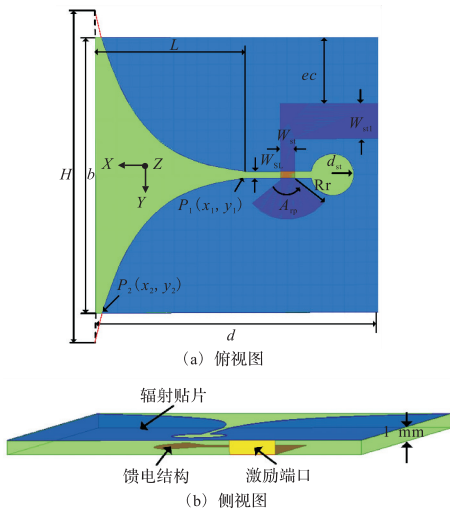


图 1 Vivaldi 天线结构图  
Fig.1 Vivaldi antenna structure

一般情况下, 工作频带的低频段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段则受到槽线窄端宽度的限制, 窄端宽度一般为最高频率波长的 0.02 倍<sup>[10]</sup>。在实际设计制作中, 由于需要考虑天线尺寸大小、介质基板等因素, 槽线宽端可取低频端对应介质波长的 1/6, 槽线长约为 1 个介质波长, 并能取得较好的天线特性<sup>[11]</sup>。

确定了槽线的两端宽度  $H$ 、 $W_{sl}$  和长度  $L$  后, 建立合适的坐标系, 就可得出图 1 中  $P_1(x_1, y_1)$  和  $P_2(x_2, y_2)$  两点的坐标值。再根据式(1)可推导出渐变指数函数的数学表达式, 系数  $c_1$  和  $c_2$  可通过式(2)和式(3)推出。

$$y = \pm (c_1 e^{Rx} + c_2) \quad (1) \quad c_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \quad (2)$$

$$c_2 = \frac{y_1 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \quad (3)$$

式中:  $R$  为指数函数的渐变率, 决定天线的波束宽度, 一般取  $R < 1$ 。

### 2 Y 形缝隙天线设计

由于金属辐射贴片的表面电流不是很集中, 为将其更好地约束到渐变槽线附近, 在不改变原天线设计尺寸的前提下, 通过在天线金属辐射贴片两侧对称开多条不同长度 Y 形缝隙, 进而增强金属槽线的辐射特性。

图 2 为设计的在 Vivaldi 天线辐射贴片上蚀刻 Y 形渐变缝隙的新型天线结构, 选取介电常数为 2.2 的介质基板材料 FR4\_epoxy, 天线单元尺寸: 长为 25 mm, 宽为 25 mm, 厚度为 1 mm, 指数函数的渐变率  $R = 0.27$ 。该天线具体尺寸见表 1。

表 1 参数优化后单元尺寸

Tab.1 Cell size after parameters optimization mm

| $b$ | $d$   | $H$   | $W_{sl}$ | $W_{st}$ | $W_{st1}$ | $L$  | $ec$ | $d_{st}$ |
|-----|-------|-------|----------|----------|-----------|------|------|----------|
| 25  | 25    | 28    | 0.6      | 1.27     | 3.2       | 13.5 | 4.8  | 3.8      |
| Rr  | $a_2$ | $b_2$ | $b_3$    | $Arp$    | $\theta$  | $lc$ | $lx$ | $ly$     |
| 4.1 | 0.5   | 2     | 1.6      | 100°     | 90°       | 3    | 7.55 | 0.9      |

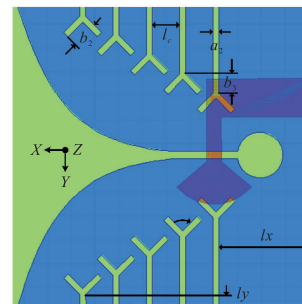


图 2 Y 形缝隙 Vivaldi 天线结构  
Fig.2 Y-shaped aperture Vivaldi antenna structure

### 3 天线的仿真实测与分析

#### 3.1 天线辐射性能的仿真验证

利用有限元仿真软件 Ansoft HFSS13 仿真, 结构改进前后天线阻抗特性曲线见图 3。

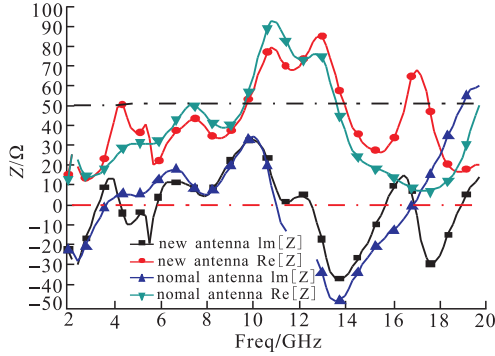


图 3 加载 Y 形缝隙前后天线阻抗特性曲线

Fig.3 Impedance characteristic curves of antenna with and without adding Y-shaped aperture

从图 3 中可以看出, Y 形缝隙天线低频部分(例如 4 GHz), 天线特性阻抗实部由 30 Ω 提高到 50 Ω, 这是由于加载 Y 形缝隙后增加了等效电感引起的, 天线特性阻抗虚部基本不变, 也就是等效电容基本不变, 说明相比原始 Vivaldi 天线, Y 形缝隙天线感性增强, 阻抗特性得到改善。而缝隙的存在也延长了电流的路径, 天线工作的最低频点也会向低频移动, 从而起到小型化的作用。

天线结构改进前后增益曲线见图 4, 在天线辐射贴片上加载 Y 形缝隙能够提高天线的增益, 特别是低频段的增益, 天线增益基本保持在 3.5 dB 以上, 最大增益达 7.1 dB。

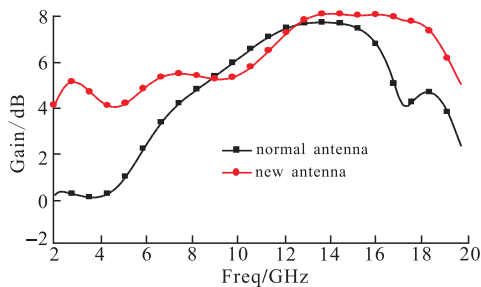


图 4 加载 Y 形缝隙前后天线增益曲线

Fig.4 Gain curves of antenna with and without adding Y-shaped aperture

原始 Vivaldi 天线最大辐射方向在端射方向即 +x 轴方向。为证实 Y 形缝隙天线仍然保持端射特性, 在工作带宽内选取 4 个频点 4 GHz、8 GHz、12 GHz 和 16 GHz, 给出了其三维辐射方向图, 见图 5。从方向图可以看出, 天线辐射能量主要集中在水平 +x 方向, 在其他方向辐射较弱, 改善了原始

Vivaldi 天线低频部分端射效果差的现象, 在高频处方向图出现恶化, 但仍然沿 +x 方向端射。

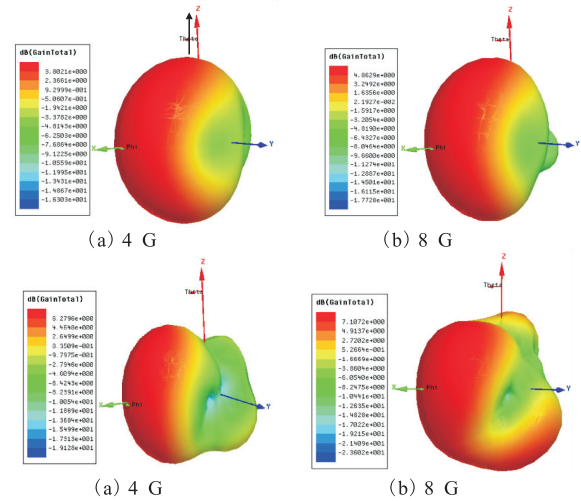


图 5 三维方向图

Fig.5 Radiation pattern of 3D

由图 6 可以看出, 天线辐射贴片两侧加载 Y 形缝隙后, 天线表面电流大部分集中在渐变槽线附近, 边缘的电流沿着槽线流动, 天线的辐射特性得到了有效改善, 验证了理论分析的正确性。

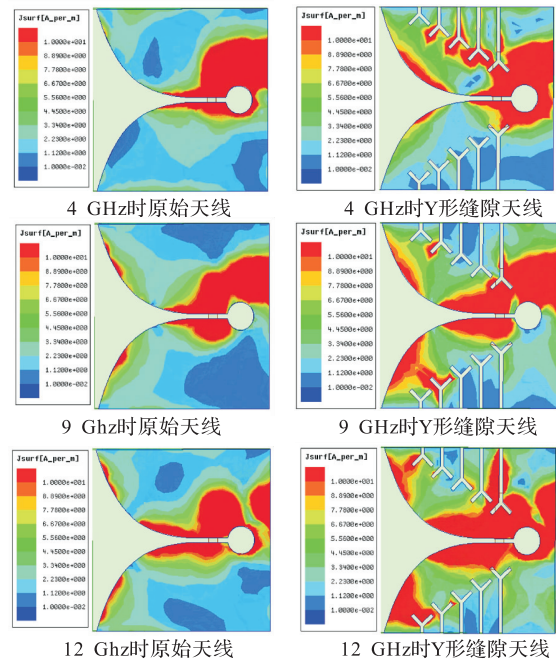


图 6 加载 Y 形缝隙前后天线的电流分布比较

Fig.6 Current distribution comparison of antenna with and without adding Y-shaped aperture

#### 3.2 关键参数分析

通过对 Y 形缝隙的等差渐变长度  $b_3$ , 缝隙宽度  $a_2$ , 缝隙间距  $l_c$ , 以及 Y 形缝隙张角  $\theta$  进行优化分析, 得到如图 7 所示结果。可以看出, 长度  $b_3$  只对天线  $S_{11}$  的高频点有影响; 宽度  $a_2$  对天线  $S_{11}$  曲线影响不大; 缝隙间距  $l_c$  对天线  $S_{11}$  曲线影响较大, 在 3.0 mm 时有较宽的带宽, 但在 2.5 mm 和 3.5 mm

时分别在 10.78~15.5 GHz、12.5~18.2 GHz 时  $S_{11}$  都超过了 -10 dB;随着 Y 形缝隙张角  $\theta$  的变化,相比于 T 形缝隙 ( $\theta = 180^\circ$ ) 和箭头形缝隙 ( $\theta = 270^\circ$ ),加载 Y 形缝隙 ( $\theta = 90^\circ$ ) 的天线在整个频带内谐振点增多,  $S_{11}$  曲线更深、阻抗匹配特性更好。

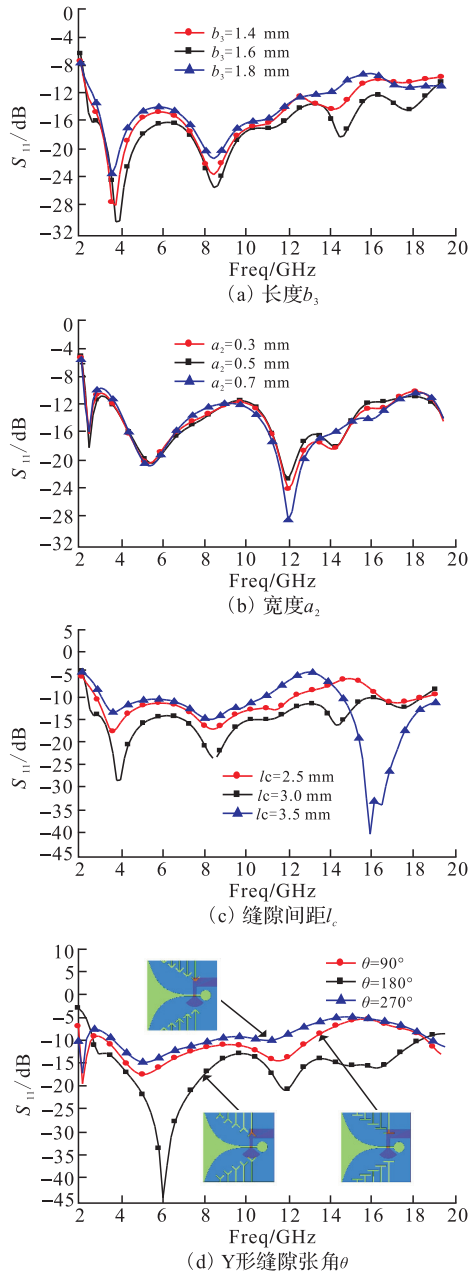


图7 不同参数优化下的  $S_{11}$  曲线

Fig.7  $S_{11}$  curves under different parameters optimization

### 3.3 天线辐射性能的实验验证

根据以上参数优化分析,最后选取表 1 的天线尺寸加工实物。天线照片见图 8。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。

天线仿真和实测  $S_{11}$  曲线见图 9,蓝色曲线和红色曲线分别为原始 Vivaldi 天线和 Y 形缝隙天线的反射系数仿真曲线。可以看出,相比原始 Vivaldi

天线在辐射贴片上加载 Y 形缝隙后,在 17 GHz 附近多了一个谐振频点,使得改进后天线带宽在高频段得到大大扩展,在 2.7~18.3 GHz 的频率范围内  $S_{11} < -10$  dB;天线带宽向低频扩展 0.62 GHz,向高频扩展 6 GHz,整个频带展宽 6.62 GHz,相对带宽达到 148.6%,实现了超宽带小型化。

比较 Y 形缝隙天线的仿真和实测反射系数曲线,可以看出天线的驻波曲线整体变化趋势相近,实测  $S_{11}$  曲线向高频有所偏移,在 3.1~19.2 GHz 的频率范围内  $S_{11} < -10$  dB,仿真和实测吻合的较好。

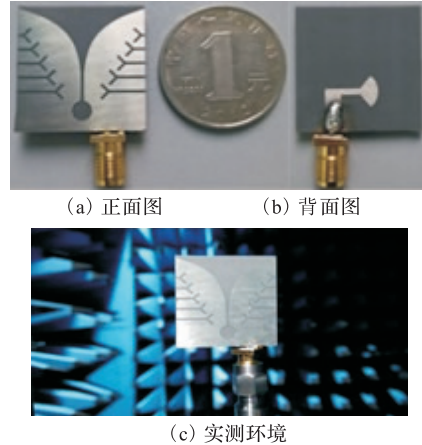


图8 天线实物图

Fig.8 Photograph of fabricated antenna

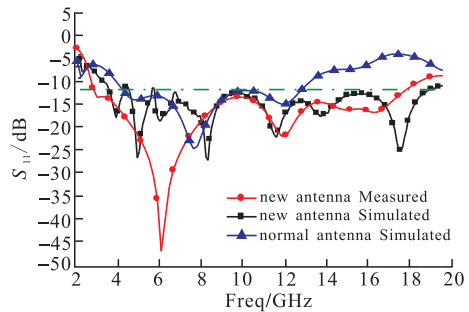


图9 天线仿真和实测  $S_{11}$  曲线

Fig.9 Simulated and measured  $S_{11}$  curves of antenna

加载 Y 形缝隙结构后,天线最显著变化就是带宽的展宽。一般微带天线带宽展宽伴随着天线增益的降低,但本结构形式的天线在整个带宽内仍保持了较高的增益。比较加载 Y 形缝隙结构前后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,得到见图 10 和表 2 结果。

表2 加载 Y 形缝隙前后天线的辐射特性比较

Tab.2 Radiation performance comparison of antenna adding Y-shaped aperture

| 频率/GHz | $xoy$ 面波束宽度/ $^\circ$ | $xoz$ 面波束宽度/ $^\circ$ |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| 7      | 64                    | 137                   |
| 10     | 65                    | 131                   |
| 13     | 61                    | 116.8                 |



从图 10 可以看出,Y 形缝隙天线相比原始天线  $xoy$ 、 $xoz$  面方向图后瓣明显变小,增益得到提升; $xoy$  面波束宽大于  $60^\circ$ , $xoz$  面波束宽度都大于  $116^\circ$ ,仍然保持较宽的波束宽度;实测与仿真结果吻合的较好,实现了宽带、宽角、端射的辐射性能。

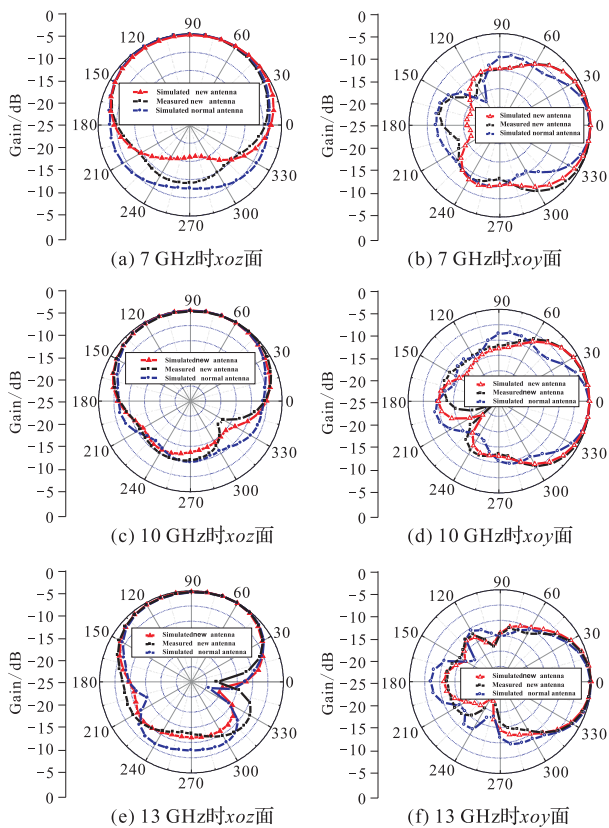


图 10 天线仿真和实测方向图

Fig.10 Simulated and Measured radiation pattern of antenna

## 4 结语

通过在天线辐射贴片两侧加载 Y 形缝隙的方法,明显改善了天线的电性能参数。实际加工制作了一副天线,在整个频带范围都保持较高增益的同时实现了超宽带小型化,相对带宽达到 148.6%,增益保持在 3.5 dB 以上。这种新型天线在宽频带、端射、高增益天线设计中,有很好的借鉴作用。

### 参考文献 (References):

[1] Gibson P J.The Vivaldi aerial[C]//9th European Microwave Conference,1979:101-105.  
 [2] Schaubert D H, Aas J A,Cooley M E, et al.Moment Method Analysis of Infinite strip Line-fed Tapered Slot Antenna Arrays with A Ground Plane[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994,42 (8):1161-1166.  
 [3] Elsheakhl Dalia M, Abdallah Esmat A. Novel Shapes

of Vivaldi Antenna for Ground Penetrating Radar (GPR) [C]//2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2013:2886-2889  
 [4] Wu Jiangniu, Zhao Zhiqin, Nie Zaiping, et al.A Printed UWB Vivaldi Antenna Using Stepped Connection Structure between Slot line and Tapered Patches[J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett ,2014,13:698-701.  
 [5] Lee D H, Yang H Y, Cho Y K.Tapered Slot Antenna with Band-Notched Function for Ultra Wideband Radios[J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2012, 11 :682-685.  
 [6] Fei P, Jiao Y C, Hu W, et al. Miniaturized antipodal Vivaldi antenna with improved radiation characteristics[J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2011, 10:127-130.  
 [7] Hood A Z, Karacolak T, Topsakal E.A Small Antipodal Vivaldi Antenna for Ultrawide-Band Application [J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2008, 7: 656-660.  
 [8] Siddiqui J Y, Antar Y M M, Freundorfer A P, et al. Design of an Ultra Wideband Antipodal Tapered Slot Antenna Using Elliptical Strip Conductors [J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2011,10:251-254.  
 [9] Bai J, Shi S, Prather D W. Modified Compact Antipodal Vivaldi Antenna for 4-50 GHz UWB Application [J]. IEEE Trans. Microw Theory Tech, 2011,59(4): 1051-1057.  
 [10] 李鹤言,李萍,蒋旭东.改进型 Vivaldi 天线 [J]. 电子科技, 2011,24(7):15-17.  
 LI Heyan, LI Ping, JIANG Xudong. Modified Vivaldi antenna[J]. Electronic Sci & Tech, 2011, 24(7):15-17. (in Chinese)  
 [11] 王乃彪.超宽频带锥削槽天线及阵列的设计与实现 [D].西安:西安电子科技大学,2009.  
 WANG Naibiao. Design and Implementation of Ultra-Wideband Tapered Slot Antennas and Arrays[D]. Xi'an: Doctoral dissertation of Xidian University, 2009. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)