

文章编号 1005-0388(2008)03-0471-05

改进型 vivaldi 天线

徐志^{1*} 刘其中¹ 章传芳² 纪奕才³

(1. 西安电子科技大学 天线与微波技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 中航雷达与电子设备研究院, 江苏 无锡 214063;

3. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要 常规 vivaldi 天线存在后向辐射大, 主辐射方向增益低的缺点。通过优化常规 vivaldi 天线贴片形式的方法, 改变天线表面的电流分布, 得到其改进形式—兔耳形 vivaldi 天线。对改进型 vivaldi 天线的电性能进行了分析, 设计并制作了一付工作在 6~18 GHz 的改进型 vivaldi 天线, 与常规 vivaldi 天线相比, 天线增益在整个频带内均有显著的提高。

关键词 缝隙天线; vivaldi 天线; LTSA; 增益

中图分类号 TN823+.24

文献标志码 A

Modified vivaldi antenna

XU Zhi¹ LIU Qi-zhong¹ ZHANG Chuan-fang² JI Yicai³

(1. National Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian

Univ., Xi'an Shanxi 710071, China; 2. Radar and Avionics Institute of AVIC, Wuxi Jiangsu

214063, China; 3 Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract For great back-radiation and low gain in the main-direction of traditional vivaldi antenna, a modified form named as Rabbit-Ear antenna is proposed by changing the current distribution on the optimized regular vivaldi antenna patch. The antenna operating at the bandwidth of 6-18 GHz is designed and fabricated, and its electrical characters is analyzed. Comparing with traditional vivaldi antenna, the gain of the modified antenna is improved at the whole bandwidth.

Key words slot antenna; vivaldi antenna; LTSA; gain

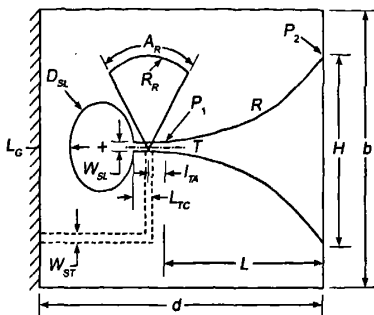
1 引言

1979年, Gibson首次提出了一种按指数规律渐变的宽带探测器缝隙天线, 即 vivaldi 天线^[1], 如图1所示。

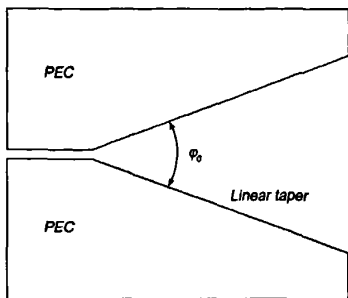
Vivaldi 天线作为一种宽频带、高增益的行波缝隙天线是通过微带传输线把能量耦合到天线贴片上并辐射的。其逐渐变宽形成喇叭口形状的缝隙结构是辐射或接收能量的主体, 其中不同的工作频点对应相应的 $\lambda/2$ 的缝隙宽度 (λ 为该频点的波长), 如图1(a)中的缝隙开口宽度 H 对应于 vivaldi 天线的

最低工作频点。喇叭口形状的贴片结构决定了 vivaldi 天线可以实现很宽的频带, 并具有较高的增益。vivaldi 天线也是一种线极化天线, 电场矢量平行于介质平面。在两个主辐射面内, vivaldi 天线线极化纯度都很高, 交叉极化电平很低, 并且波束宽度也较宽, 具有很低的旁瓣电平。

同在1979年, Prasad 和 Mahapatra 也提出了一种十分类似于 vivaldi 天线的线性渐变缝隙天线 (linearly tapered slot antenna-LTSA)^[2], 如图1(b)。LTSA除了采用线性结构的缝隙外, 其他结构与 vivaldi 天线类似。



(a) 指数渐变 Vivaldi 天线



(b) 线性渐变缝隙天线-LTSA

图 1 指数渐变 Vivaldi 天线和
线性渐变缝隙天线-LTSA

Vivaldi 天线及 LTSA 自提出以来,其优异的性能已引起大家广泛关注^{[3][4]}。Shin 使用全波矩量法分析了 vivaldi 天线各种设计参数的变化对天线阵性能的影响,指出天线在馈电带线与缝隙处的输入阻抗对描述天线参数变化对阵列的影响十分有效,而且相比于单个天线的性能,如果天线高度远低于 $\lambda/2$ 时,阵列单元的性能将更加优异^[5]。Nikolaou 在柔性结晶聚合体上制作了共形的双指数渐变缝隙天线(Double Exponentially Tapered Slot Antenna-DETSA),文中指出共形处理将增加天线的交叉极化,讨论了变形后的 vivaldi 天线发射脉冲时的特性^[6]。vivaldi 天线及 LTSA 在相控阵的设计中也占有重要位置。Holter 利用缝隙天线单元建立了一个 $9 \times 8 \times 2$ 共 144 个单元的垂直交叉双极化相控阵。文中通过测量天线单元间的耦合系数和单元的扫描方向图,指出在低频段互耦的影响十分的显著,而且至少要建立列数在 30~40 之间的相控阵才可以和计算时使用的无限大相控阵相比拟^[7]。Yun 利用带状线馈电的 vivaldi 天线阵列和电压传感器控制的多线移相器,构建了一种新的造价低廉的相

控阵方案,此相控阵实现了宽频带内较宽波束扫描的功能^[8]。

本文设计了一付工作在 6~18 GHz、带内驻波小于 2、主辐射方向增益大于 6 dB 的天线。根据线极化、宽带、高增益的设计要求,首先采用常规 vivaldi 天线指数渐变的贴片形式进行设计(后文称其为天线 1)。设计中发现天线 1 在频率高于 16 GHz 时主辐射方向增益将小于 6 dB,特别是在 18 GHz 时增益下降为 4.73 dB。为此,通过改变常规 vivaldi 天线贴片形式的方法来优化天线表面的电流分布,得到改进型 vivaldi 天线(后文称其为天线 2),天线 2 全频带内的增益均有显著提高,实际测试结果证明了改进型 vivaldi 天线的有效性。

2 常规形式 Vivaldi 天线的设计

根据天线带宽、电压驻波比和增益的设计要求,首先采用 Gibson 提出的 vivaldi 天线指数模型公式,即

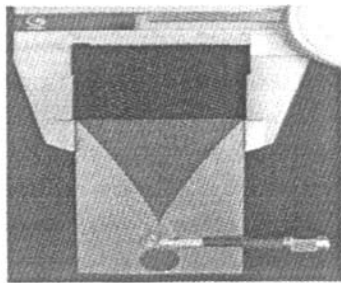
$$f(x) = \pm (c_1 e^{R_x} + c_2) \quad (1)$$

设计了表达式为

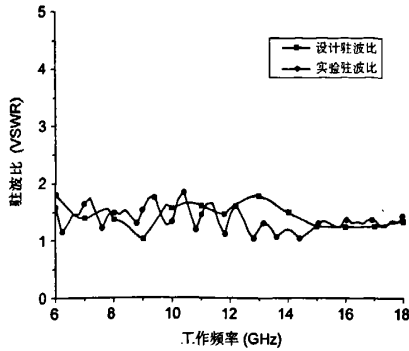
$$f(x) = \pm (17.887e^{0.015x} - 23.995) \quad (2)$$

的常规形式的 vivaldi 天线(天线 1),天线 1 尺寸为 $60 \times 40 \times 0.5$ (mm),采用相对介电常数为 2.65 的介质板。

为减小交叉极化,天线 1 采用前馈式馈电设计,馈电点距天线底端为 13 mm,如图 2(a)所示。这种馈电方式的优点在于当缝隙的宽度远小于半波长时,缝隙可以看作是一种低损耗的传输介质,只传输能量而不辐射能量。图 2(a)中 $\phi = 10$ mm 的匹配圆起到了阻抗匹配的作用。天线 1 电压驻波比的设计与实际测量结果如图 2(b)所示,全频带内小于 2。

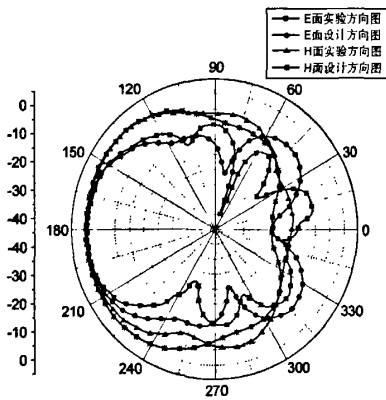


(a) 常规 Vivaldi 天线实物

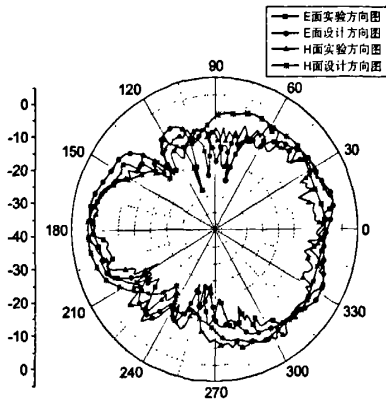


(b) 常规 vivaldi 天线驻波比
图 2 常规 vivaldi 天线实物及测量驻波比

天线 1 归一化方向图的设计与实际测试结果吻合良好,如图 3 所示。天线 1 在 6 GHz 时 E 面 3 dB 波束宽度测量结果为 66° ,H 面达到了 120° ;18 GHz 时 E 面 3 dB 波束宽度为 18° ,H 面为 23° 。同时可以



(a) 常规 vivaldi 天线 6 GHz 归一化方向图



(b) 常规 vivaldi 天线 18 GHz 归一化方向图

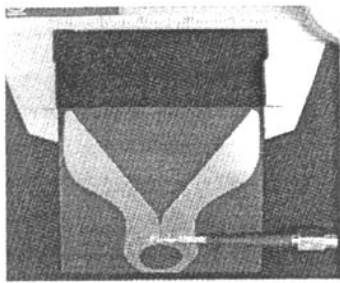
图 3 常规 Vivaldi 天线的归一化方向图

看到 18 GHz 时,天线 1 的后向辐射(即方位角为 0°)过大,E 面后向 3 dB 波束宽度达到 90° ,H 面达到 120° ,严重影响了天线增益的提高。从表 1 中可以看到天线 1 在频率高端增益明显下降,特别是 18 GHz 时,实测增益仅为 4.11 dB,无法满足天线的设计要求。为此需要对天线 1 进行改进,以提高其性能。

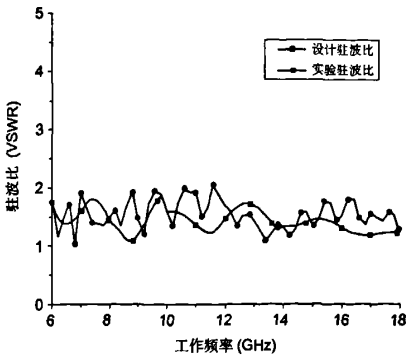
3 兔耳形缝隙天线的设计

为了提高天线 1 在高频端的增益,使用实验优化的方式,改变天线贴片的结构,优化得到的天线辐射体形状与兔耳相似,如图 4(a)所示。改进型天线有效改善了天线表面的电流分布,从而使天线在全频段内的增益得到显著提高。

兔耳形 vivaldi 天线,即天线 2,采用线性缝隙天线(LTSA)的开口形式,匹配圆及馈电点参数不变。天线 2 的尺寸略有增大,为 $62 \times 46 \times 0.5(\text{mm})$,介质板相对介电常数为 2.65。天线 2 电压驻波比的设计与实际测量结果如图 4(b)所示,全频带内小于 2。



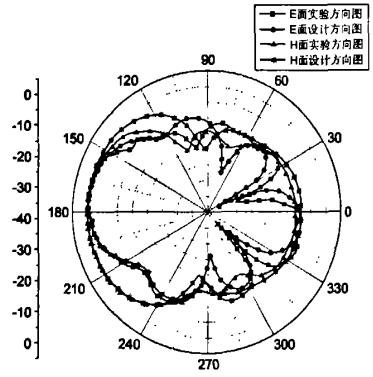
(a) 兔耳形缝隙天线实物



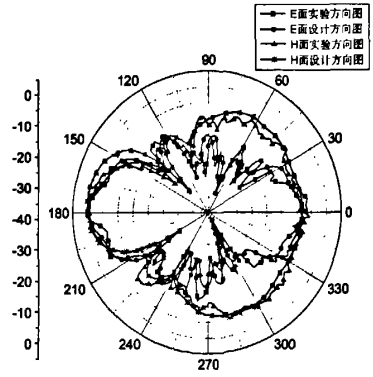
(b) 兔耳形缝隙天线驻波比

图 4 兔耳形缝隙天线实物及测量的驻波比

天线 2 归一化方向图的设计与实际测试结果如图 5 所示。天线 2 在 6 GHz 时 E 面 3 dB 波束宽度测量值为 46°, H 面为 89°, 18 GHz 时 E 面 3 dB 波束宽度为 15°, H 面为 32°。比较图 3(b)和图 5(b), 在 18 GHz 时天线 2 的 E 面后向辐射要比天线 1 小很多。图 6 又对天线 1 和天线 2 的设计增益进行了比较, 可以看到天线 2 的设计增益在全频段均比天线 1 有显著提高, 尤其体现在高频端。表 1 中, 天线 2 的实测增益在全频段内均大于 6.4 dB, 特别是 18 GHz 时实测增益达到了 10.09 dB, 满足了天线的设计要求。



(a) 兔耳形缝隙天线 6 GHz 归一化方向图



(b) 兔耳形缝隙天线 18 GHz 归一化方向图

图 5 兔耳形缝隙天线的归一化方向图

表 1 常规 vivaldi 天线与兔耳形缝隙天线的增益比较

| 增益天线频率、名称 | 设计增益 (dB) | 测量增益 (dB) |
|----------------------------|-----------|-----------|
| $f = 6$ GHz 常规 vivaldi 天线 | 5.95 | 5.36 |
| $f = 6$ GHz 兔耳形缝隙天线 | 7.08 | 6.42 |
| $f = 12$ GHz 常规 vivaldi 天线 | 8.70 | 7.87 |
| $f = 12$ GHz 兔耳形缝隙天线 | 10.69 | 9.75 |
| $f = 18$ GHz 常规 vivaldi 天线 | 4.73 | 4.11 |
| $f = 18$ GHz 兔耳形缝隙天线 | 10.31 | 10.09 |

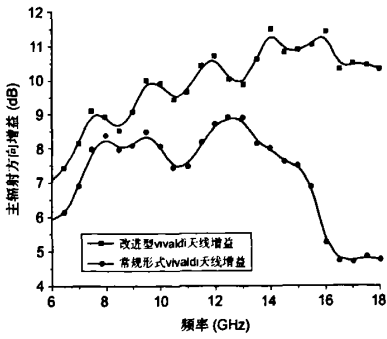
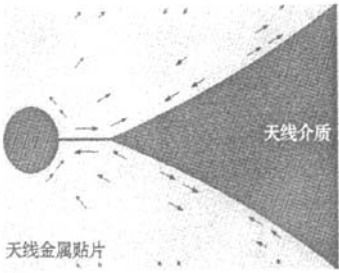


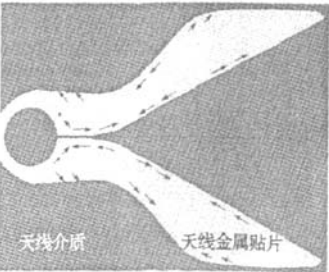
图 6 常规 vivaldi 天线与兔耳形缝隙天线的设计增益比较

4 电特性分析

天线 2 增益提高的原因在于天线表面电流分布的变化。如图 7(a)所示, 天线 1 的贴片表面电流因为导体面积相对较大, 电流强度较弱, 尤其是贴片的边缘电流更是微弱, 导致向前辐射的能力下降; 图 7(b)中, 兔耳形天线的贴片结构使天线表面电流分布更加集中, 电流强度更大, 电流沿贴片的曲线边沿流动并且在电流较强时遇到不连续性边界条件而产生较强的辐射。天线 2 增益提高的关键正是在于较大的表面电流强度及特定的兔耳形边界曲线, 使能量能够更加集中地向喇叭口方向辐射, 使天线的增益得到提高, 尤其是在高频段, 效果显著。



(a) 常规 vivaldi 天线贴片电流分布



(b) 兔耳形缝隙天线贴片电流分布

图 7 常规和兔耳形缝隙天线的电流分布

5 结论

设计了一种线极化、宽带、高增益的改进型 vivaldi 天线。实际测量结果表明,该天线克服了常规形式 vivaldi 天线在增益方面的不足之处,在整个工作频带内具有稳定的增益表现。此种改进型 vivaldi 天线方案的提出对宽带、高增益天线的设计与研究有很高的参考价值。

参考文献

- [1] P J Gibson. The Vivaldi Aerial[J]. in Proc. 9th Eur. Microwave Conf., Brighton, U. K., Sept., 1979, pp. 101-105.
- [2] S N Prasad and S Mahapatra. A novel mic slot line aerial[J]. in Proc. 9th European Microwave Conf., Brighton, U. K., 1979, pp. 120-124.
- [3] 姚凤薇,钟顺时. 新型带扇形馈源的宽带缝隙天线[J]. 电波科学学报, 2005, 20(5): 675-677.
Yao F W, Zhong S S. A new broadband slot antenna with a fan-shaped microstrip feed[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(5): 675-677.
- [4] 陈雅娟,龙云亮. 宽带微带贴片天线的研究进展[J]. 电波科学学报, 1999, 14(3): 357-361.
Chen Y J, Long Y L. The development of the wideband microstrip antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14(3): 357-361.
- [5] J Shin and D H Schaubert. A parameter study of strip-line-fed vivaldi notch-antenna arrays[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation., May. 1999, 47: 879-886.
- [6] S Nikolaou, G E Ponchak, J Papapolymerou, et al.. Conformal double exponentially tapered slot antenna (DETTSA) on LCP for UWB applications[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation., June. 2006, 54: 1663-1669.

- [7] H Holter, T H Chio and D H Schaubert. Experimental results of 144-element dual-polarized endfire tapered-slot phased arrays[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation., Nov. 2000, 48(11): 1707-1718.
- [8] T Y Yun and K Chang. A low-cost 8 to 26.5 GHz phased array antenna using a piezoelectric transducer controlled phase shifter[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation., Sep. 2001, 49(9): 1290-1298.



徐志 (1981—), 男, 内蒙古人, 西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士生。主要研究方向为宽带辐射单元, 宽带相控阵, MIMO 信道分析等。



刘其中 (1938—), 男, 重庆人, 西安电子科技大学天线与电磁散射研究所教授, 博士生导师。在国内外刊物上发表论文 100 多篇, 主要研究方向为天线数值计算与 CAD、宽带小型化天线和智能天线、电磁散射和电磁兼容等。

E-mail: qzhliu@xidian.edu.cn



章传芳 (1961—), 女(回族), 江西人, 中航雷达与电子设备研究院研究员。主要研究方向为各种体制机载雷达的各类天线及机载相控阵雷达天线关键技术。

E-mail: cfzhangz@163.com

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>