

文章编号: 2095-4980(2021)02-0261-04

一种小型化的对跖 Vivaldi 天线设计

彭艳华^{1a,b,2}, 周以国^{1a,b,2}

(1.中国科学院 a.空天信息创新研究院, 北京 100094; b.电子学研究所, 北京 100190; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于对宽带宽覆盖角天线的需求, 设计了一种工作于 9~11 GHz 的小型化对跖 Vivaldi 天线。在天线开口末端加入矩形引向器, 以获得良好宽带匹配效果。利用 HFSS 软件进行结构优化, 得到天线的具体参数, 由此加工和测试带引向器的对跖 Vivaldi 天线。通过仿真和实测得到, 在 9~12 GHz 频带内回波损耗小于 -15 dB, 在 -10 dB 以下的带宽为 6.9~14 GHz。同时, 通带内 3 dB 波束宽度实现 $\pm 30^\circ$ 的扫描范围。此时天线的尺寸仅为 15 mm×16 mm×0.762 mm, 是一种宽带宽覆盖角的小型化天线。

关键词: 小型化天线; 对跖 Vivaldi 天线; 宽带; 宽覆盖角

中图分类号: TN822.8

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019486

A miniaturized antipodal Vivaldi antenna design

PENG Yanhua^{1a,b,2}, ZHOU Yiguo^{1a,b,2}

(1a. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 1b. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the demand for antenna with wide-bandwidth and wide coverage angle, a miniaturized antipodal Vivaldi antenna is designed for 9 GHz to 11 GHz. A rectangle director is added to the back end of the antenna for better broadband matching effect. The HFSS software is used for structural optimization to obtain the specific parameters of the antenna. The antipodal Vivaldi antenna with the director is processed and tested. Through simulation and actual measurement, the return loss is less than -15 dB in the 9–12 GHz band, and the bandwidth below -10 dB is 6.9–14 GHz. At the same time, 3 dB beam width enables $\pm 30^\circ$ coverage range. The size of the antenna is only 15 mm×16 mm×0.762 mm. The proposed antenna is a miniaturized one with a wide bandwidth and wide coverage angle.

Keywords: miniaturized antenna; antipodal Vivaldi antenna; wide bandwidth; wide coverage angle

宽工作带宽和宽覆盖角天线是当前研究热点, 小型化天线因为质量轻、剖面低、造价低、易共性等优点被广泛运用。1979 年提出的 Vivaldi^[1] 天线作为常见的宽带行波天线, 被广泛运用在相控阵、5G 等领域^[2-6]。常见的 Vivaldi 天线是渐变槽线加微带转槽线馈电^[7], 也有在槽线两侧加槽实现陷波^[8]的方式。在这些方式下可以获得很好的宽带, 但是很难实现宽角覆盖的效果。文献[9]在传统天线形式的基础上进行优化, 采用对跖的形式, 加入引向器和波纹开眼结构, 实现 3~20 GHz 的带宽范围内, 回波损耗小于 -10 dB。但是此时的天线尺寸为 42.56 mm×40.16 mm, 尺寸相对较大; 文献[10]对天线进行了小型化处理, 在 5.2~11 GHz 频带内减小了垂直方向的高度, 但宽度上依旧有 34 mm, 导致其无法运用到二维相控阵当中; 文献[7]则是在 0.5~2 GHz 内通过使用共面结构的 Vivaldi 天线, 实现了天线在宽度和高度上的小型化, 但是频率不够宽, 回波损耗也较大。

常见的行波天线, 需要其长度满足 $L \geq \lambda_l$ (λ_l 为最低工作频率对应波长), 同时其宽度满足 $W \geq \lambda_l / 2$ 。在阵列设计中, 为了保证单元之间较小的互耦影响, 需要进一步减小单元的尺寸。综合上述的文献资料以及相关设计要求, 本文设计了一种小型化的对跖 Vivaldi 天线, 对跖结构可以弥补传统 Vivaldi 天线因微带-槽线转换对带宽的限制。设计中加入引向器, 实现宽带良好的匹配并提高低频部分的增益; 进一步减小天线尺寸, 使其满足 $\lambda_l / 2 \geq W \geq \lambda_l / 4$, $\lambda_l \geq L \geq \lambda_l / 2$ 。

收稿日期: 2019-11-21; 修回日期: 2019-12-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0503001)

作者简介: 彭艳华(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为宽带天线。email: pengyanhua17@mails.ucas.ac.cn

1 天线原理及设计

Vivaldi 天线最重要的结构就是渐变的槽线，这个槽线就是其辐射区域，电磁能量在渐变槽线区域由受到束缚的电磁波向槽线开口的方向辐射出去。而其能量传输过程就是电磁能量通过馈电的方式馈入到渐变槽线的窄缝处，槽线越大则对能量的束缚能力也就相对越弱，当束缚能力弱到一定程度就会产生电磁波辐射。渐变槽线的不同位置辐射不同频率的电磁信号。在天线中，窄带槽线处辐射的是最高频率信号，而宽带处就辐射其最低频率信号。因此合理控制槽线宽端和窄端的大小就能保证信号在特定的频带内工作。

此外，槽线开口变化对天线的阻抗匹配带宽有影响，同时，槽线指数变化的曲率渐变特性，会进一步影响到匹配效果。多者作用决定了天线最终的匹配带宽特性，因此需要合理设计天线结构。

基于前文所述，设计的对跖型 Vivaldi 天线具有小型化的特点，要求工作频带为 9~11 GHz。在选择介质基板时，需要充分考虑其对天线性能的影响。基板介质常数越高，厚度越薄，越容易实现小型化。但相应地会使得天线效率以及频带带宽降低。因此选择基板材质为 Taconic 的 RF-35，其相对介电常数为 3.5，同时选择其厚度 $d=0.762\text{ mm}$ 。天线的具体结构示意图如图 1(a)所示，其对称的渐变结构分别位于基板两面，图 1(b)为仿真整体模型。相对于共面结构，对跖形式无需进行微带-槽线转换，可以获得更好的宽带阻抗匹配效果。由文献[9]和文献[11]可知，此时渐变曲线满足以下公式：

$$\begin{cases} x_{in} = \pm(Cs \times e^{Ks \times y} - Cs - 0.5 \times Cw) \\ y \in [0, la - lb] \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_{out} = \pm(Cw \times e^{Kw \times y^2} - 0.5 \times Cw) \\ y \in \left[0, \sqrt{\frac{\ln((wa/2 + Cw/2)/Cw)}{Kw}} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中： l 和 w 分别是基板的高度和宽度； la 是微带线的高度； wa 和 lb 分别是天线背面参考地平面的宽度和高度； Cs, Ks, Cw, Kw 是控制渐变曲线的参数。

在此基础上研究引向器的影响，将引向器加入到基板参考地平面的天线开口末端。为了获得最佳的阻抗匹配效果，需要调整其位置以及大小。分别以圆形、三角形、矩形、梯形结构进行分析，通过对比以获得最佳的结构和位置。如图 2 所示，可以发现，虽然采用不同的引向器结构，但其均以纵轴为方向对称分布。

依次仿真了四种不同结构、位置和大小对回波损耗的影响，并与不加入引向器的结果相对比。

矩形结构的引向器获得最为平坦的回波损耗曲线，同时增益曲线也最为平稳。此时矩形引向器位于纵轴方向上 12.6 mm 的位置，并且相对纵轴对称，其宽度为 1 mm，高度为 0.5 mm，天线其他参数的具体取值见表 1。

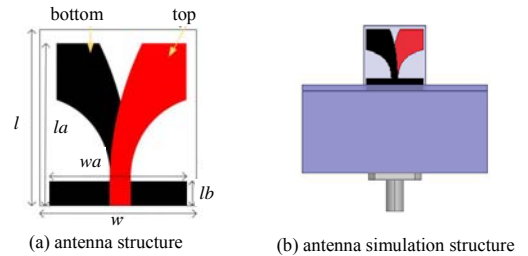


Fig.1 Diagram of antenna structure
图 1 天线结构图

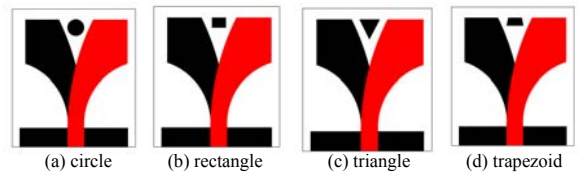


Fig.2 Diagram of the antenna structure adding director
图 2 加引向器的天线结构示意图

表 1 Vivaldi 天线尺寸(单位: mm)

Table 1 Size of the Vivaldi antenna(unit: mm)

w	l	wa	la	lb	Cs	Ks	Kw	d	Cw
15	16	14	15	3	0.12	0.241	31	0.762	1.6

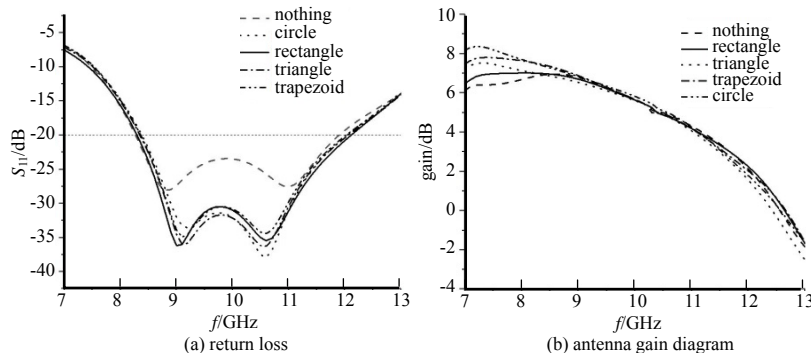


Fig.3 Simulation results of antenna

图 3 天线仿真结果

如图 3 所示, 最终得到天线回波损耗在 -20 dB 以下的频率范围为 $8.3\sim 12.1$ GHz, 相对带宽达到 38%。进一步观察天线的增益, 得到图 3(b)的结果。可以发现, 随着频率升高, 天线的增益在不断减小。在 8 GHz 时达到最大 7 dB 的增益, 随后增益随着频率的升高而降低, 在 11 GHz 时增益为 4.2 dB, 在 $9\sim 11$ GHz 的通带范围内, 增益变化 2.5 dB。

观察天线的仿真方向图, 从 8 GHz 开始, 以 1 GHz 为步进, 观察主极化和交叉极化, 得到图 4 的结果。与天线的增益图对比发现, 随着频率的升高, 在天线增益降低的同时, 其扫描角度逐渐展宽。在通带范围内, 天线的 3 dB 波束宽度在不断变大。其带宽从 9 GHz 的 $\pm 66^\circ$ 开始, 不断展宽, 在 11 GHz 时已经达到 $\pm 132^\circ$ 。

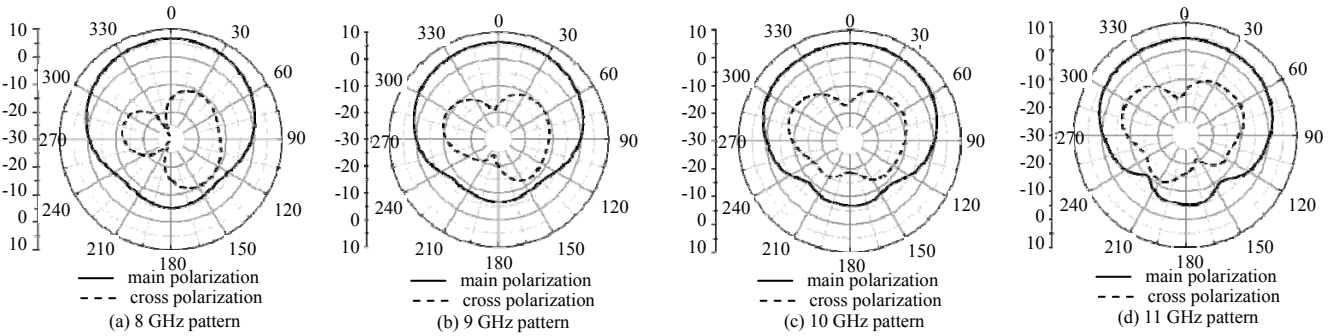


Fig.4 Antenna patterns
图 4 天线方向图

2 实物制作及测试

在 8 GHz 到 12 GHz 的范围内, 进行天线回波损耗和辐射方向图的测试, 实际制作的天线如图 5(a)所示, 除了前文提到的天线结构之外, 增加了提供反射背板和固定天线的结构件, 天线采用 SMA 馈电。测试回波损耗时, 使用型号 N5244A 矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA), 其工作频率为 10 MHz ~ 43.5 GHz。图 5(b)为在暗室中的测试环境, 使用 X 波段($8.2\sim 12.6$ GHz)的波导探头与测试天线组成发射、接收链路, 实现对天线方向图的测量。得到如图 5(c)所示结果, 发现 $6.9\sim 14$ GHz 范围内回波损耗均小于 -10 dB。在 $9\sim 12$ GHz 带宽范围内, 其回波损耗均小于 -15 dB。通过与仿真得到的回波损耗曲线(图 3)相对比, 发现实测数据相对仿真值有所恶化。主要原因在于: 实际测试中通过 SMA 探针与天线微带之间压接和焊接实现相连, 这与仿真模型有所差异; 同时由于天线尺寸较小, 加工过程中的精确度难以确保与仿真模型完全符合, 而设计的天线本身又对参数要求很高, 故导致实测结果变差; 天线工作于 X 波段, 相对频率较高, 应该尽可能实现 SMA 探针与微带、结构件与天线之间的无缝连接, 而实物制作中难免存在结构件加工误差。这些原因都会导致最终测试的回波损耗变差。

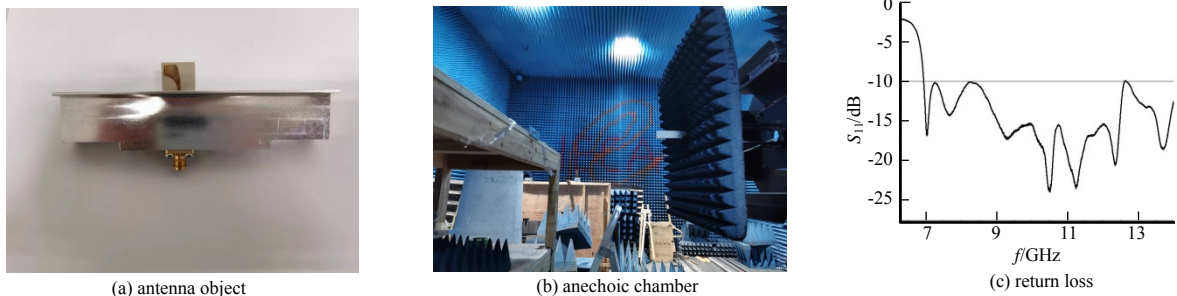


Fig.5 Antenna and test environment
图 5 实物及测试环境图

通过微波暗室对天线方向图进行测试, 得到图 6 的结果。图中列出了 9 GHz, 10 GHz, 11 GHz 三个频点上 E 面与 H 面的方向图。在工作带宽范围内, E 面方向上 3 dB 波束宽度在 $\pm 30^\circ$ 左右, 随着频率升高, 其波束宽度有所变宽, 但变化不大。 H 面与 E 面相比, 其带宽更宽, 两个方向上随频率升高, 3 dB 波束带宽都有所展宽。

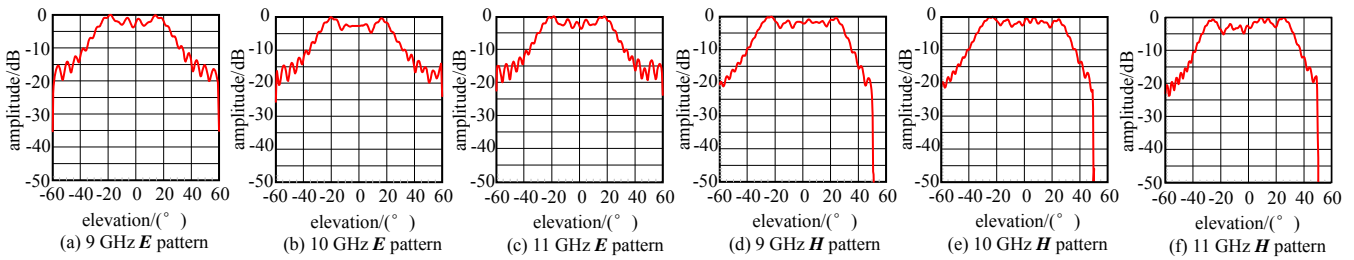


Fig.6 Measured antenna patterns

图 6 天线实测方向图

3 结论

设计了一种小型化的对跖 Vivaldi 天线, 仿真及实测数据表明, 在 6.9~14 GHz 频带内通带回波损耗均小于 -10 dB, 通带内 3 dB 波束宽度实现 $\pm 30^\circ$ 的覆盖角度范围。此时天线的尺寸仅为 15 mm \times 16 mm \times 0.762 mm。在制作和测试中发现, 因为天线对尺寸参数的精确度要求较高, 而天线在制作过程中存在加工误差, 另外, 进行结构件安装时由于本身的加工误差也会导致出现缝隙的情况, 因此导致测试结果相对仿真值有所偏差。但是该天线依旧表现出宽工作带宽、宽覆盖角度的特点, 该天线对宽带宽覆盖角的小型化天线设计有较高的应用价值和参考意义。

参考文献:

- [1] GIBSON P J. The Vivaldi aerial[C]// 9th European Microwave Conference. Paris:IEEE, 1979:101-105.
- [2] ZHU Shuangshuang, LIU Haiwen, CHEN Zhijiao, et al. A compact gain-enhanced Vivaldi antenna array with suppressed mutual coupling for 5G mmwave application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 17(5):776-779.
- [3] HERZI Rabiaa, BOUSLAMA Moufida, OSMAN Lotfi, et al. Frequency agile Vivaldi antenna with enhanced gain for wireless applications[C]// IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications. Pavia, Italy:IEEE, 2017:1-3.
- [4] 梁志伟, 夏琛海, 牛宝君. 低剖面渐变槽线天线单元设计[J]. 微波学报, 2012, 28(3):12-16. (LIANG Zhiwei, XIA Chenhai, NIU Baojun. Design of a low profile gradually slotted antenna unit[J]. Journal of Microwaves, 2012, 18(3):12-16.)
- [5] HE Shanhong, SHAN Wei, FAN Chong, et al. An improved Vivaldi antenna for vehicular wireless communication systems[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014(13):1505-1508.
- [6] LOGAN John T, KINDT Rick W, VOUVAKIS Marinos N. Low cross-polarization Vivaldi arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(4):1827-1837.
- [7] 张锋, 纪奕才, 方广有. 一种工作于 0.5~2 GHz 的小型化 Vivaldi 天线[J]. 微波学报, 2010, 26(6):54-57. (ZHANG Feng, JI Yicai, FANG Guangyou. A miniaturized Vivaldi antenna working at 0.5-2 GHz[J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(6):54-57.)
- [8] 刘亚娟, 梁建刚, 杨波, 等. 一种具有陷波特性的改进型 Vivaldi 超宽带天线[J]. 微波学报, 2016, 32(6):23-26. (LIU Yakun, LIANG Jiangang, YANG Bo, et al. An improved Vivaldi ultra-wideband antenna with notch characteristics[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(6):23-26.)
- [9] 吴青龙, 王宏建, 刘广. 新型小尺寸带引向器波纹开眼对跖型 Vivaldi 天线[J]. 电波科学学报, 2018, 33(2):208-216. (WU Qinglong, WANG Hongjian, LIU Guang. A new type of small size Vivaldi antenna with corrugated eyelet with opener[J]. Journal of Radio Science, 2018, 33(2):208-216.)
- [10] 叶芑, 张月园, 张晓燕, 等. 加载引向器的小型化对跖 Vivaldi 天线设计与仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(1):85-89. (YE Peng, ZHANG Yueyuan, ZHANG Xiaoyan, et al. Design and simulation of miniaturized confronted Vivaldi antennas with loaded directors[J]. Journal of Terahertz Science and Electronics Information Technology, 2019, 17(1):85-89.)
- [11] HOOD A Z, KARACOLAK T, TOPSAKAL E. A small antipodal Vivaldi antenna for ultrawide-band applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008(7):656-660.