

文章编号:1005-6122(2022)02-0012-06

DOI:10.14183/j.cnki.1005-6122.202202003

低截止频率多倍频程高增益对跖 Vivaldi 天线*

申婉婷¹ 潘少鹏¹ 肖培¹ 陈士举² 李高升¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,长沙 410082; 2. 复杂系统控制与智能协同技术重点实验室,北京 100074)

摘要: 针对传统对跖 Vivaldi 天线的最低截止工作频率较高、增益较低和方向性较差的问题,文中设计了一种新型超宽带对跖 Vivaldi 天线。融合运用辐射极板开矩形斜槽、加载吸收电阻和寄生矩形贴片等一系列电磁调控措施,扩展了天线的低频工作带宽;采取在天线极板间加载椭圆寄生贴片的技术方式大幅提高了天线的方向性和辐射增益。最后给出了天线的设计流程,从电场分布和表面电流分布的角度揭示了天线的微观工作机制。仿真和实测结果表明:天线的工作频带为 0.85~16 GHz(近 20 倍频程),相对带宽达 180%,在 3 GHz 以上频段增益均超过 10 dBi,并且具有较好的端射方向性,在超宽带无线通信、雷达探测、电子对抗和遥感遥测等领域具有广泛的应用前景。

关键词: 对跖 Vivaldi 天线,多倍频程天线,低截止频率,吸收电阻,寄生单元

A Multi-octave High-gain Antipodal Vivaldi Antenna with Low Cut-off Frequency

SHEN Wan-ting¹, PAN Shao-peng¹, XIAO Pei¹, CHEN Shi-ju², LI Gao-sheng¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Collaborative Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: To solve the problems of the lowest cut-off operating frequency being higher, low gain and poor directivity of the traditional antipodal Vivaldi antennas (AVA), an ultra-wideband multi-octave exponentially tapered AVA is proposed in this paper. Through the fusion of a series of electromagnetic control measures, such as notching rectangular slots on the radiating plate and loading absorption resistance and parasitic rectangular patches, the low frequency impedance matching has improved significantly. In addition, parasitic ellipse element is integrated into the center of exponential taper slot without sacrificing size. A substantial increase in directivity and gain of the entire frequency band is achieved. Three design steps of the proposed AVA are employed, and the working principle from the perspective of electric field and surface current distribution is analyzed. The simulated and measured results are in good agreement, which show the bandwidth ranges from 0.85 to 16 GHz (nearly 20 octave) and the relative bandwidth is about 180%. The realized gain is more than 10 dBi in the operation bandwidth of > 3 GHz. The proposed AVA has the advantages of simple design, easy fabrication and excellent performance, which provides practical significance for the research of ultra-wideband end-fire antenna with low cut-off frequency and high directivity. The design can be widely used in the ultra-wideband wireless communication, radar detection, electronic counter measures and remote sensing applications.

Key words: antipodal Vivaldi antenna, multi-octave antenna, low cut-off frequency, absorption resistance, parasitic element

引言

无线通信设备对带宽、数据速率以及信道容量的要求越来越高,电磁信号收发需要具有更大带宽、

更高增益以及更稳定方向图的天线来实现。目前对于超宽带天线的研究呈井喷态势,而其中 Vivaldi 天线(Vivaldi Antenna, VA)由于平面结构简单、带宽超宽和增益高,受到了广泛关注^[1-3]。VA 在低频段

* 收稿日期:2021-06-04;修回日期:2021-08-17

基金项目:复杂系统控制与智能协同技术重点实验室开放研究基金(CSCIC191001)

工作于谐振模式,在高频段则工作于行波模式,其最低谐振频率由最大的辐射极板开口槽决定^[4]。在共平面开槽的 VA 的基础上,1988 年 EHUD Gazit 提出了改进的对跖 Vivaldi 天线 (Antipodal Vivaldi Antenna, AVA),采用平行微带线结构对两块对称分布在介质基板上下平面的辐射极板进行馈电,降低了回波损耗,实现超宽带阻抗匹配,进一步减小了波束宽度、副瓣电平以及后向辐射,而且具有馈电结构简单的优势。近年来,很多学者对如何提高 AVA 的性能进行了研究。为了提高增益,学者们通过在天线极板间增加开口谐振环、渐变周期结构、介质棱镜和超材料结构来集中端射方向上的辐射波束^[5-11]。文献[5]利用开口谐振环形成具有特殊谐振能力的引向器,使得天线在 C 波段的平均增益提高 75.44%。文献[6]通过加载渐变周期结构将表面电流引向辐射端。文献[7]和文献[8]分别采用分形介质棱镜和“王”字形超材料棱镜结构提高天线增益,但是棱镜形式的选择以及位置的确定比较困难。在渐变槽中心位置放置寄生贴片的方式,不仅可以简化天线的整体结构,而且有利于天线与其它平面电路集成。但文献[4]采用的椭圆寄生贴片和文献[12]采用的圆形寄生贴片在增强 AVA 方向性的同时,增大了原有天线的尺寸。针对这一问题,学者们通过改变天线辐射极板的形状,来实现同时减小天线尺寸以及扩展带宽的目的,比如椭圆形、切比雪夫曲线形^[13]、树叶形^[14]和风车形^[15]槽线等。相比于其它形状的辐射极板,指数渐变槽设计方便、加工简单且效果明显,所以最为常用。为了进一步扩展阻抗匹配带宽,还可以采用在辐射极板上开槽的方式^[16-20]。文献[17]不仅在辐射极板的外边缘开了梳状槽,还在呈指数分布的内边缘上开了四个不等大的矩形槽,使得天线在大部分工作频段范围内副瓣和后瓣电平降低 10 dB。虽然上述方法都能有效扩展工作带宽、显著提高最高截止频率,但是由于天线口径的限制,最低截止频率仍然保持在较大的值。因此 AVA 基本都工作在较高的频段范围内,很少可以工作于 1 GHz 以下,并且在多倍频程范围内常存在着平均增益较低且方向图不稳定的问题。

本文提出了一种具有低截止频率的超宽带 AVA,通过在辐射极板上刻蚀矩形斜槽以及在指数槽线末端加载吸收电阻和寄生矩形贴片,在增益没有衰减的前提下,延长了低频段的电流流动路径,并减弱了天线口径处多余的反射电流,从而扩展了工作带宽。此外,在开口槽中心加载寄生椭圆贴片来

提高天线增益和增强端射方向,且没有额外增加天线尺寸。对所设计的平板 AVA 进行测试,仿真和实测结果匹配良好。天线整体尺寸为 201.6 mm × 135 mm × 1.03 mm,最低截止频率为 0.85 GHz,在 1~16 GHz 频段内增益均超过 4 dBi,并且在大于 3 GHz 频段的增益均高于 10 dBi。相比于其它的 AVA,所提出的天线结构紧凑、设计简单、加工便利、具有更低的截止频率,并且在带宽范围内有着更高的平均增益、更强的端射方向性,可广泛应用于超宽带无线通信、雷达探测、电子侦察与对抗、电磁频谱管理以及遥测遥感等领域。

1 天线的设计与分析

图 1 为所设计的超宽带高增益 AVA 模型,天线尺寸为 201.6 mm × 135 mm (即在频率为 0.85 GHz 处为 $0.57\lambda_0 \times 0.38\lambda_0$)。蓝色部分表示介质基板,为 1.03 mm 厚的 Rogers RO4533,其介电常数为 3.3,损耗角正切为 0.002。本文基于传统 AVA 结构,对其辐射极板指数渐变槽参数进行优化,馈电线的接地端采用渐变巴伦结构,形成了初步设计的对跖 Vivaldi 天线 (Original AVA, OAVA)。介质基板上下面对称印刷着辐射极板,橙色部分为上表面,作为辐射体,绿色部分为下表面,作为接地板。在两辐射极板边缘开等长、等间隔、平行的矩形斜槽,形成了缝隙加载的对跖 Vivaldi 天线 (Slots Integrated AVA, SAVA),进一步地,在 SAVA 上下两片辐射极板末端分别加载 100Ω 的吸收电阻和矩形寄生贴片,消耗低频段多余的反射电流,形成了加载缝隙和吸收电阻的对跖 Vivaldi 天线 (Slots Integrated and Resistance Loading AVA, SRAVA)。此外,在 SRAVA 指数缝隙开口槽中心位置的介质基板上表面加载寄生椭圆贴片以提高增益,最终实现本文提出的加载缝隙、吸收电阻和寄生椭圆贴片的对跖 Vivaldi 天线 (Slots Integrated and Resistance Loading AVA with Parasitic Ellipse, SREAVA)。

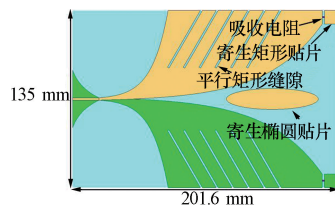


图 1 天线结构示意图

指数渐变槽的结构参数将直接影响电磁波的传播情况,从而影响行波特性。指数渐变槽曲线方程

如公式(1)和公式(2)所示:

$$y_1 = e^{\alpha_1 x} + c_1 \quad (1)$$

$$y_2 = e^{\alpha_2 x} + c_2 \quad (2)$$

其中 y_1 和 y_2 分别表示指数渐变槽的内曲线和外曲线; $\alpha_1 = 0.024$ 、 $\alpha_2 = 0.08$, 表示指数曲线的曲率; 而 c_1 和 c_2 则为曲线起始点坐标, 由馈电线的宽度决定。采用同轴线为微带线馈电, 优化调整馈电线宽度, 以匹配阻抗值为 50Ω 的 SMA 接头, 同时实现最大程度的 $S_{11} \leq -10$ dB 频带范围。

为了详细说明 SREAVA 的设计过程, 下面通过加载缝隙、吸收电阻和矩形贴片以及寄生椭圆贴片三个步骤来逐步展示最终得到的具有低截止频率的超宽带高增益对跖 Vivaldi 天线。

1.1 SAVA 结构设计

图 2(a) 为对指数渐变槽进行优化调整后的 OAVA 结构示意图, 其缺点是不能在较低的频带内实现阻抗匹配, 因此工作带宽有所限制。为了降低最低工作截止频率, 在 OAVA 辐射极板边缘处刻蚀 6 个等长、等间距、平行的矩形斜槽, 对开槽数量、长度、槽宽、间距和斜率进行优化设计, 具体参数如图 2(b) 所示: $W_d = 117.3$ mm、 $W_p = 10.5$ mm、 $W_s = 1.5$ mm、 $P_s = 50$ mm、 $L_s = 43.3$ mm。在辐射极板上刻蚀的矩形斜槽可以看作是工作于低频段的高阻抗表面, 目的是减少该频段贴片上的后向反射电磁波, 同时可以有效抑制天线边缘的电场分布, 从而降低天线的副瓣电平和后向辐射, 提高天线的方向性。此外, 斜槽还可以延长电流流经路径, 从而降低最低工作频率。从图 3 所示的 S_{11} 曲线对比可知, 最低谐振频率由 1.08 GHz 下降到 0.87 GHz, 与此同时 0.87 ~ 2.57 GHz 低频段内的阻抗匹配得到明显改善, 但是在 3 GHz 处 160 MHz 频段发生了阻抗匹配恶化, 此时 $S_{11} > -10$ dB。

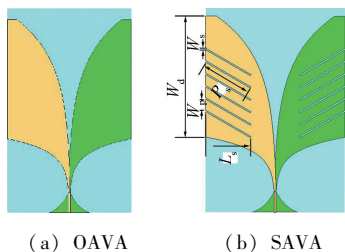


图 2 天线模型示意图

1.2 SRAVA 结构设计

为了进一步降低整个低频段的反射系数, 解决 3 GHz 处阻抗匹配恶化问题, 提出了一种在指数槽

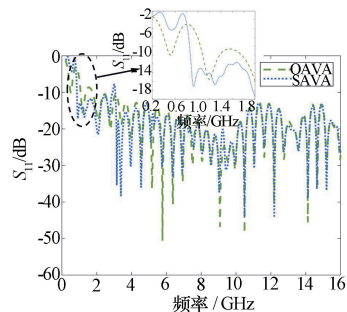


图 3 OAVA 和 SAVA 的 S_{11} 曲线对比

线末端加载贴片电阻和矩形寄生贴片的方式。将贴片电阻和矩形寄生贴片放置在介质基板正反两面的辐射极板末端, 从而吸收和消耗低频段多余的电流, 阻止其反射进入天线辐射开口槽内。如图 4 所示, SRAVA 结构参数分别为 $W_r = 1.6$ mm、 $W_x = 10$ mm、 $L_x = 10.3$ mm, 采用的是封装尺寸为 0402 的 100Ω 电阻, 寄生矩形贴片尺寸为 10 mm \times 10.3 mm。电阻两端分别焊接在辐射极板和寄生贴片上, 三者相互连接。贴片尺寸和电阻大小经过仿真优化, 既能改善驻波, 又不会恶化天线的其它性能, 如增益、方向性、前后比等特性。

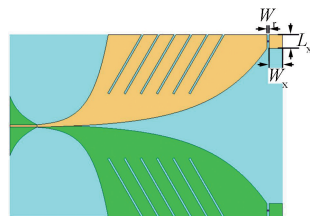


图 4 SRAVA 模型示意图

图 5 为 OAVA 和 SRAVA 的电流分布图, 从图 5 中可知辐射极板开口槽边缘电流分布基本保持不变, 而 SRAVA 中辐射极板上的矩形斜槽处集中了部分电流, 增加了电流路径, 从而实现扩展带宽的目的。此外, 位于辐射极板外边缘的电流明显减少, 有效提高了天线的辐射性能。同时在增加的寄生贴片上也有电流集中于此, 说明电阻和寄生贴片的加载有效吸收了低频段的多余电流。由于两片辐射极板分别位于介质基板的正反两面, 因此从上表面观察, 电流为同向顺时针流动。由图 6 的 S_{11} 曲线图可知, 在 3 GHz 处的阻抗匹配较差的现象已经得到改善, 使得 SRAVA 整体带宽实现近 20 倍频程, 频带范围扩展至 0.85 ~ 16 GHz, 相对带宽达到 180%。

1.3 SREAVA 结构设计

在调整好天线的带宽后, 进一步采取优化措施以提高天线的其它性能参数。如图 7 所示, 在频率为 12.5 GHz 处, 包括 SRAVA 在内的前三种 AVA 主

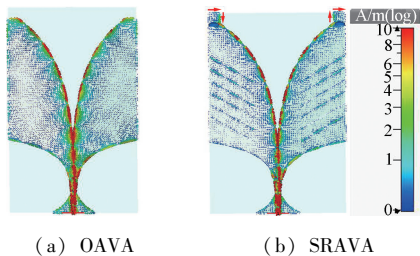


图 5 天线表面电流分布图

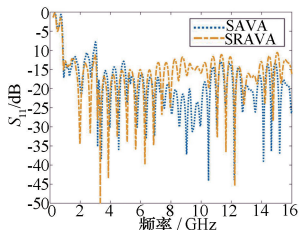


图 6 SAVA 和 SRAVA 的 S_{11} 曲线对比

辐射方向上的方向图出现了严重的分裂现象, 产生了多个辐射主瓣, 方向性降低。这是因为在高频时两个辐射极板之间的耦合度降低, 天线辐射口径处的电场出现不连续现象。为解决上述问题, 在天线口径处加载一个椭圆形金属贴片, 整个结构位于指数开口槽内部。这样既不会额外增加天线尺寸, 又可大大提高天线两个极板之间的耦合度, 在天线辐射口径方向起到引向器作用, 使得辐射波束朝端射方向集中, 解决了天线方向图波瓣分裂的问题, 并进一步提高了天线的方向性。从图 7 可以看到, 加载了椭圆形贴片之后, SREAVA 的方向图波瓣分裂问题得到了很好的改善, 副瓣明显降低, 前向辐射更加明显, 方向性显著提高。与此同时, SREAVA 的 S_{11} 没有恶化, 仍在 0.87~16 GHz 频段内保持良好的阻抗匹配, 如图 8 所示。

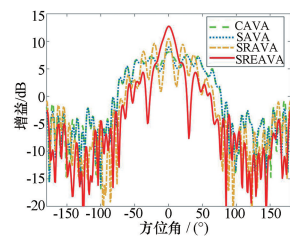


图 7 四种天线的 12.5 GHz 二维方向图

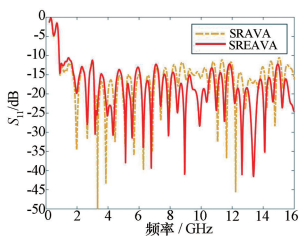


图 8 SRAVA 和 SREAVA 的 S_{11} 曲线对比

图 9 为 OAVA 和 SREAVA 电场分布对比图, 可以发现在矩形斜槽上有明显的电场分布, 有效减少了平行于介质基板边缘的辐射极板上的电场分布, 抑制了电场在天线边缘的绕射行为, 从而可以减小副瓣电平, 提高天线的方向性。同时可以观察到在椭圆寄生贴片边缘上有高强度的电场分布, 将电场

集中在指数开口槽的中心, 从而显著提高天线端射增益。值得注意的是, 由于辐射极板末端吸收电阻和寄生矩形贴片的加载, 天线口径处的电场有所发散, 但是对天线的整体辐射性能影响不大。

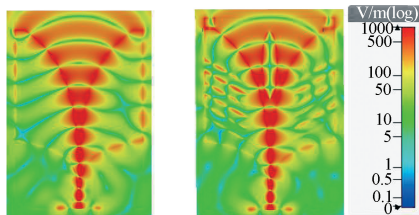


图 9 表面电流分布图

图 10 为四种天线的前后对比曲线图, 在辐射极板上增加缝隙、末端增加寄生电阻和矩形贴片以及在开口指数缝中心增加椭圆寄生贴片, 这些措施能够显著提高天线在整个带宽范围内的前后比性能, 尤其是在 4~7 GHz 频段, 6 GHz 时前后比提高了 100%。图 11 为四种天线的增益对比曲线图, 可以看到在指数开口槽中心加载了椭圆形寄生单元后增益有了明显提高, 尤其是在大于 8 GHz 的高频段, 平均提高了 3 dB; 在谐振频率为 14 GHz 处, 相对于前三种 AVA, 所提出的 SREAVA 增益提高了 4.5 dB, 实现了在 3 GHz 以上频段增益均超过 10 dB。

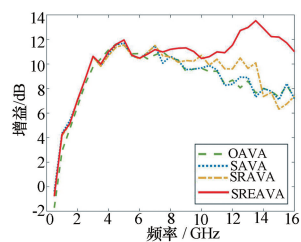
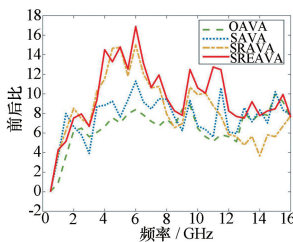


图 10 四种天线的前后比曲线 图 11 四种天线的增益对比曲线

2 天线加工和实测

为了进一步验证所提出的多倍频程高增益 AVA 设计方法的可行性, 按照上述结构参数加工了 SREAVA 实物, 并在其表面增加焊盘和油墨覆层, 以便于焊接 SMA 接头和贴片电阻, 同时防止金属表层氧化。该天线采用 1.03 mm 厚的 RO4533 介质基板, 椭圆寄生贴片印刷于介质基板上表面, 在这里没有选择文献[17]中提到的增加第三层金属层, 大大简化了天线加工方式, 不需要额外采用粘合剂去固定两层介质基板。馈电接头采用的是 SMA-KFD0851 夹板式连接器, 频率范围为 DC~26.5 GHz。图 12(a) 和 (b) 分别为 SREAVA 和 SMA 接头实物图的正视图和背视图。图 13 为天线在微波暗室中的测试环境。



(a) 正视图 (b) 背视图

图 12 天线和馈电结构的实物图

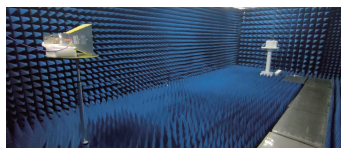


图 13 微波暗室中的测试环境

图 14 为 SREAVA 仿真与实测 S_{11} 曲线对比图, 可以看到阻抗带宽基本一致, 实际测量得到的阻抗带宽为 0.4~16 GHz, 比仿真略有扩宽, 分析产生微小差异的原因是由于加工和测试误差所引起。图 15 为天线仿真与实测增益随频率变化的曲线对比图, 从图中可以发现, 仿真和测量结果基本一致, 验证了实验的正确性。在 4 GHz 以上频段, 增益均大于 10 dBi, 平均增益为 11.5 dBi, 具有稳定的辐射特性。

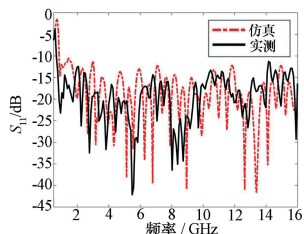
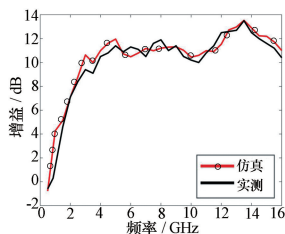
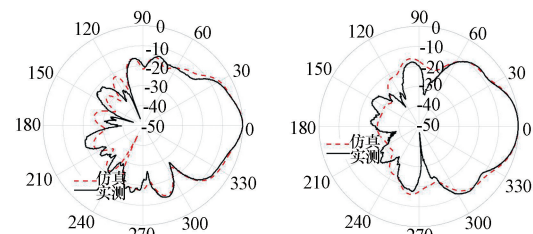
图 14 天线 S_{11} 仿真
与实测对比图 15 天线增益的仿真
与实测对比

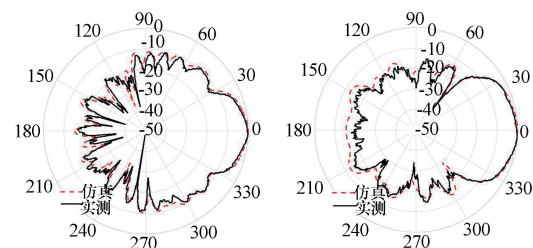
图 16(a) 和 (b) 分别为在 5 GHz 处仿真和实测得到的天线 E 面和 H 面二维辐射方向图, 图 16(c) 和 (d) 分别为在 9 GHz 处仿真和实测得到的天线 E

面和 H 面二维辐射方向图。从图中可以看到, 天线仿真和实测结果在主瓣和旁瓣上吻合度非常高。由于测试环境的影响, 在 9 GHz 处的实测方向图曲线有轻微抖动。综上所述, 天线端射方向性良好, 副瓣电平较低, 并且具有较高的前后比。



(a) 5 GHz 时 E 面方向图

(b) 5 GHz 时 H 面方向图



(c) 9 GHz 时 E 面方向图

(d) 9 GHz 时 H 面方向图

图 16 天线仿真与实测辐射方向图对比

表 1 为本文设计的 SREAVA 与其它文献设计的超宽带 AVA 的对比情况。由于工作频率相较于其它天线更低, 因此将物理尺寸转换为电尺寸进行比较。电尺寸是由物理尺寸与最低工作频率对应的介质中波长的比值计算得到。相较于其它同类天线, 本文设计加载了平行矩形斜槽、吸收电阻以及寄生椭圆贴片等多种电磁调控措施融合运用的 SREAVA, 其电尺寸较小, 相对带宽更宽, 并且具有更低的最低截止工作频率, 在整个带宽内有相对更高且更稳定的增益。

表 1 本文设计的 SREAVA 与其它文献的对比

	带宽/ GHz	介电 常数	尺寸/ (mm×mm×mm)	电尺寸/ (λ×λ×λ)	增益/第一频率点/ (dBi / GHz)	增益/第二频率点/ (dBi / GHz)
本文	0.85~16	3.3	201.6×135×1.03	1.04×0.69×0.005	4/0.85	13.5/13.5
文献[2]	5.3~40	2.2	31×20×0.51	0.81×0.52×0.013	3/5.3	11
文献[3]	1.35~17	2.65	93.5×90×0.8	0.69×0.66×0.006	3.5	9.3
文献[11]	3.1~14	4.2	130×76×1	2.75×1.61×0.021	5.8/3.1	7.26/10
文献[12]	3.01~10.6	4.6	34×16×0.8	0.73×0.34×0.017	3.27/3.06	6.23/10.6
文献[16]	3.7~18	4.4	42×36×1.6	1.09×0.93×0.041	1.8	6.9
文献[17]	2.5~57	2.94	186×77×0.55	2.66×1.10×0.008	4/2.5	16/22
文献[18]	3.4~40	3.28	90×40×0.508	1.85×0.82×0.010	8/3.4	14/40
文献[20]	1.65~18	3.38	202×120×0.508	2.04×1.21×0.005	6.7/1.65	10.3/3

3 结论

本文设计了一种多倍频程超宽带高增益对跖

Vivaldi 天线, 本设计具有低截止频率特性, 可工作于 P~Ku 波段, 带宽覆盖范围为 0.85~16 GHz, 实现近 20 倍频程, 相对带宽达 180%。在整个频带

范围具有稳定的方向图和较高的平均增益, 在 3 GHz 以上频段内增益均超过 10 dBi。本文分三部分介绍了天线的设计流程, 包括加载平行矩形斜槽、吸收电阻和寄生矩形贴片以及开口槽中心的寄生椭圆贴片。辐射极板上的矩形斜槽以及辐射极板末端的吸收电阻能够有效优化低频段阻抗匹配, 使得最低工作频率降低至 0.85 GHz。在没有增大天线体积和影响其它性能的基础上, 寄生椭圆单元的加载显著提高了天线的增益与方向性。对天线进行了加工与测试, 仿真和测试结果匹配良好, 证明了该设计思路和方法的正确性和高效性。本设计对于超宽带低截止频率高增益天线的研究具有现实的借鉴意义, 适用于无线通信、雷达导航和探测遥感等领域。

参考文献

- [1] 叶木进, 姜兴, 孙逢圆, 等. 对拓式高增益 Vivaldi 天线设计[J]. 微波学报, 2021, 37(1): 28-31, 36
Ye M J, Jiang X, Sun F Y, et al. Design of an antipode-type Vivaldi high gain antenna [J]. Journal of Microwaves, 2021, 37(1): 28-31, 36
- [2] Yin Z F, He G Q, Yang X X. Miniaturized ultrawideband half-mode Vivaldi antenna based on mirror image theory[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(4): 695-699
- [3] Wang Z D, Yin Y Z, Wu J J. A miniaturized CPW-fed antipodal Vivaldi antenna with enhanced radiation performance for wideband applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 16-19
- [4] Ibrahim T N, Thomas M W. A novel method for improving antipodal Vivaldi antenna performance [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(7): 3321-3324
- [5] 刘红喜, 高军, 曹祥玉, 等. 一种基于开口谐振环的高增益端射天线设计[J]. 物理学报, 2015, 64(23): 234101
Liu H X, Gao J, Cao X Y, et al. A design of high-gain end-fire antenna based on split-ring resonator structures [J]. Acta Phys. Sin., 2015, 64(23): 234101
- [6] 唐尧, 曹祥玉, 高军, 等. 加载渐变周期结构的 Vivaldi 天线[J]. 微波学报, 2019, 35(4): 62-65, 80
Tang Y, Cao X Y, Gao J, et al. Vivaldi antenna loaded with gradual period structure [J]. Journal of Microwaves, 2019, 35(4): 62-65, 80
- [7] Anirban K, Anindita B, Anuradha S, et al. Design of a fractal inspired antipodal Vivaldi antenna with enhanced radiation characteristics for wideband applications [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2019, 13(7), 892-897
- [8] Omer Y, Gonul T S. Metasurface lens for ultra-wideband planar antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(2): 719-726
- [9] Moosazadeh M, Kharkovsky S, Case J T, et al. Miniaturized UWB antipodal Vivaldi antenna and its application for detection of void inside concrete specimens [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1317-1320
- [10] Moosazadeh M. High-gain antipodal Vivaldi antenna surrounded by dielectric for wideband applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, 66(8): 4349-4352
- [11] Amiri M, Tofigh F, Ghafoorzadeh-Yazdi A, et al. Exponential antipodal Vivaldi antenna with exponential dielectric lens [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1792-1795
- [12] Zhang X Y, Chen Y T, Tian M, et al. A compact wideband antipodal Vivaldi antenna design [J]. Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng., 2019, 29(4)
- [13] Abhik G, Anirban K, Manimala P, et al. A super wideband Chebyshev tapered antipodal Vivaldi antenna [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2015, 69(9): 1328-1333
- [14] Biswas B, Ghatak R, Poddar D R. A fern fractal leaf inspired wideband antipodal Vivaldi antenna for microwave imaging system [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(11): 6126-6129
- [15] Goel T, Patnaik A. Novel broadband antennas for future mobile communications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(5): 2299-2308
- [16] Rajesh N, Jithila V G, Malathi K, et al. A compact antipodal Vivaldi antenna for UWB applications [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1557-1560
- [17] Eichenberger J, Yetisir E, Ghalichechian N. High-gain antipodal Vivaldi antenna with pseudoelement and notched tapered slot operating at 2.5-57 GHz [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(7): 4357-4366
- [18] Moosazadeh M, Kharkovsky S. A compact high-gain and front-to-back ratio elliptically tapered antipodal Vivaldi antenna with trapezoid-shaped dielectric lens [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 552-555

- ture coupled microstrip antennas[J]. Electronics Letters, 1996, 27(13): 1129-1131
- [7] Targonski S D, Pozar D M. Design of wideband circularly polarized aperture-coupled microstrip antennas[J]. IEEE Trans on Antennas & Propagation, 1993, 41(2): 214-220
- [8] José D Díaz, Salazar J L. A dual-polarized cross-stacked patch antenna with wide-angle and low cross-polarization for fully digital multifunction phased array radars[A]. IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST) [C], Waltham, MA, USA, 2017. 5258-5267
- [9] Serra A A, Nepa P, Manara G, et al. A wide-band dual-polarized stacked patch antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2007, 6(11): 141-143
- [10] Gao S C, Li L W, Leong M S, et al. Wide-band microstrip antenna with an H-shaped coupling aperture[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(1): 17-27
- [11] Jang Y W. Broadband T-shaped microstrip-fed U-slot coupled patch antenna[J]. Electronics Letters, 2002, 38(11): 485-486
- [12] Pozar D M. Microstrip antenna aperture-coupled to a microstripline[J]. Electronics Letters, 1985, 21(2): 49-

- 50
- [13] 黄晓东, 曹瑾茹, 金秀华[P]. 高增益平面渐变槽线天线. CN109888469A. 2019
Huang X D, Cao J R, Jin X H[P]. High gain planar gradient slot antenna. CN109888469A. 2019
- [14] 梁仙灵. 双极化微带天线阵与超宽带多频段印刷天线[M]. 上海: 上海大学出版社, 2011
Liang X L. Dual-polarization microstrip antenna array and Ultra-wideband multi-band printed antenna [M]. Shanghai: Shanghai University Press, 2011
- [15] Diaz J D, Aboserwal N, Logan J T, et al. Ultra-low cross polarization microstrip patch antennas for phased arrays [A]. 2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology (PAST)[C], Waltham, MA, USA, 2019. 1-4

曹成云 男, 1994 年生, 硕士生。主要研究方向: 双极化天线技术。

柴舜连(通信作者) 男, 1969 年生, 教授。主要研究方向: 新型天线技术, 微波电路与系统。

E-mail: chaishunlian@nudt.edu.cn

刘亿荣 男, 1997 年生, 硕士生。主要研究方向: 紧耦合天线技术。

(上接第 17 页)

- [19] Oliveira A M D, Perotoni M B, Kofuji S T, et al. A palm tree antipodal Vivaldi antenna with exponential slot edge for improved radiation pattern[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 1334-1337
- [20] Moosazadeh M, Kharkovsky S, Case J T, et al. Antipodal Vivaldi antenna with improved radiation characteristics for civil engineering applications [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, 11(6): 796-803

申婉婷 女, 1998 年生, 硕士生。主要研究方向: 天线理论

与技术, 超宽带天线与阵列天线。

潘少鹏 男, 1995 年生, 硕士生。主要研究方向: 天线理论与技术, 超宽带天线与超材料天线。

肖培 男, 1989 年生, 博士, 副研究员。主要研究方向: 电磁兼容与电磁防护技术、天线理论与技术。

陈士举 男, 1973 年生, 研究员。主要研究方向: 复杂系统控制, 智能协同, 精确制导等。

李高升(通信作者) 男, 1980 年生, 博士, 教授。主要研究方向: 天线理论与技术, 电磁兼容与电磁防护技术。

E-mail: gaosheng7070@vip163.com