

一种小型化超宽带双极化天线

陈松旻¹, 庞晨², 周坚², 刘萌瑶¹, 赵梓彤¹, 李高升¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 国防科学技术大学 电子科学学院, 长沙 410073)

摘要: 本文设计了一种小型化超宽带双极化天线。为实现小型化, Vivaldi 天线设计了契合模拟能量密度波纹的拟合曲线槽缝, 从而大大拓展了带宽。在未增大尺寸的同时设计了超表面透镜, 在实现小型化的基础上提高了增益。将设计的单极化 Vivaldi 天线交叉交叉镶嵌得到了最终的双极化天线。实测结果表明, 双极化天线带宽为 2.17 GHz~13.70 GHz, 空间体积仅为 $0.144\lambda_1^3$ (λ_1 为带内最低频波长), 最高增益达到 12.32 dBi, 隔离度大于 30 dB。该天线可应用于雷达侦察系统等对极化敏感度要求高的应用场景。

关键词: 小型化; 双极化天线; 拟合曲线槽缝; 超表面透镜; Vivaldi 天线

中图分类号: TN821⁺.1; TN821⁺.5

文献标志码: A

A Miniaturized UWB Dual-polarized Antenna

CHEN Songmin¹, PANG Chen², ZHOU Jian², LIU Mengyao¹, ZHAO Zitong¹, LI Gaosheng¹

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

2. College of Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A miniaturized ultra wideband dual-polarized antenna is designed in this article. To achieve miniaturization, the Vivaldi antenna is designed with fitted curve slots that fit the simulate energy density corrugation, which expand the bandwidth. A metasurface lens is designed without increasing the size, and the gain is improved on the basis of miniaturization. After the designed single polarization Vivaldi antenna is crossed and embedded, a dual-polarized antenna is obtained. The dual-polarized antenna bandwidth is 2.17 GHz to 13.70 GHz, and the space volume is only $0.144\lambda_1^3$ (λ_1 is the lowest frequency wavelength within the band), with a maximum gain of 12.32 dBi and an isolation degree of more than 30 dB. This antenna can be used in radar reconnaissance systems and other applications requiring high polarization sensitivit.

Key words: miniaturization; dual-polarized antenna; fitted curve slot; metasurface lens; Vivaldi antenna

引言

雷达侦察系统通常采用天线接收各种雷达信号。超宽带天线在其中占有重要地位。因电磁环境的日益复杂, 对雷达侦查设备接受信号的敏感性提出了更高的要求, 雷达极化的相关研究愈发深入^[1-3]。同时, 为了获得雷达的极化信息, 双极化天线成为雷达系统的关键部件。双极化天线可以接收所有的极化信息, 具有较强的抗干扰能力, 因而可以提高系统的灵敏度。研究适合工程应用的双极化超宽带天线具有重要的现实意义^[4-9]。

Vivaldi 天线^[10]是一种很常用的天线形式, 有着超宽带的优势, 且具有较高的增益和定向辐射能力^[11-13], 使得它在一众超宽带天线中脱颖而出, 发展飞速。在基于 Vivaldi 天线的双极化天线发展研究中,

文献[14]提出一种采用 Vivaldi 天线单元的双极化天线, 在 3.1 GHz~10.6 GHz 的工作频率范围内具有 8 dBi 的增益和 -25 dB 的交叉极化。文献[15]提出了一种机载雷达测量的双极化 2 GHz~18 GHz Vivaldi 阵列, 可以对海冰上的雪进行全极化测量。文献[16]提出了一种应用于飞行器的双极化 Vivaldi 天线, 该天线可应用于 3 GHz~13 GHz, 质量轻、剖面低、体积小。文献[17]设计了一种改进平衡馈电的双极化 Vivaldi 天线, 设计最突出的优点是避免了馈线的相交。

本文设计了一种基于拟合曲线槽缝的小型化超宽带双极化天线。首先设计了基于三次多项式拟合曲线槽缝边缘结构的小型化 Vivaldi 天线, 并通过增加超表面透镜来提高高频处的增益, 得到单极化 MLFC-VA 天线单元。通过将单极化天线交叉交叉镶嵌得到双极化天线。该双极化天线尺寸仅为 55 mm×55 mm×

收稿日期: 2023-10-15; 修回日期: 2023-12-18

基金项目: 国家重点研发计划课题(2021YFC2203503)

引用格式: 陈松旻, 庞晨, 周坚, 等. 一种小型化超宽带双极化天线[J]. 微波学报, 2024, 40(5): 71-77.

CHEN Songmin, PANG Chen, ZHOU Jian, et al. A miniaturized UWB dual-polarized antenna[J]. Journal of Microwaves, 2024, 40(5): 71-77.

126.2 mm。实测结果显示,带宽范围为 2.17 GHz~13.70 GHz,天线增益最高可达到 12.32 dBi,天线隔离度在整个带宽范围内大于 30 dB。

1 天线结构设计

1.1 拟合曲线槽缝 Vivaldi 天线设计

首先,优化设计了一个传统的 Vivaldi 天线(VA),如图1所示。介质板材料为 Rogers 5880,厚度为 0.508 mm,介电常数为 2.2。其中,VA 的指数型槽线可以由式(1)~式(3)确定。槽线的起始点和截止点分别为 (x_1,y_1) 和 (x_2,y_2) ,其中 a 为指数型槽线的曲率。

$$y = c_1 \cdot e^{ax} + c_2 \tag{1}$$

$$c_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{ax_2} - e^{ax_1}} \tag{2}$$

$$c_2 = \frac{y_1 e^{ax_2} - y_2 e^{ax_1}}{e^{ax_2} - e^{ax_1}} \tag{3}$$

对设计的 VA 进行仿真,可以得到图 1 中的 S_{11} 仿真结果,此时,VA 的带宽范围为近似为 5.7 GHz~12.7 GHz。

由图 1 可见,设计的 VA 在多个低频谐振峰值附近的 S_{11} 参数值都大于 -10 dB,此时设计的天线没有很好的带宽特性,特别是在低频处。因此,要实现小型化,就要拓展带宽,改善图 1 中标记频点的阻抗匹配特性,降低低频截止频率。

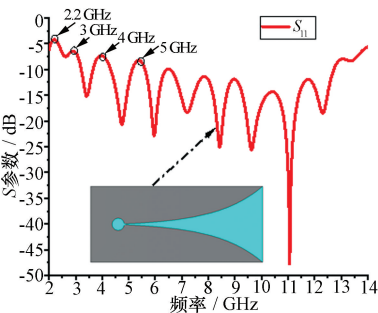


图 1 VA 的 S_{11} 图
Fig. 1 S_{11} diagram of VA

本文提出了一种基于天线的回波损耗特性,通过模拟相应频点处能量密度的波纹在辐射臂开槽的方法,对天线的低频性能进行了改善,这种开槽方法可以比较快速地确定开槽位置,得到比较好的结果,对实际应用有一定参考意义。

通过仿真发现,天线的能量密度分布图呈现出类似波传播的波纹结构,这种波纹出现在密度相对小的位置。通过对波纹的模拟开槽研究发现,电能密度的波纹对选定谐振频点的匹配改善效果明显,由于电磁波能量守恒定律的存在,磁能密度波纹则对选定谐振

频点附近谐振点的匹配改善更为明显。
图 2 为模拟不同能量密度波纹开槽得到的天线和初始 VA 的回波损耗性能对比。绿色阴影部分代表基于磁能密度波纹的开槽天线的回波损耗低于电能密度波纹,橙色则相反,可以验证上文所述,为 VA 的开槽提供参考。

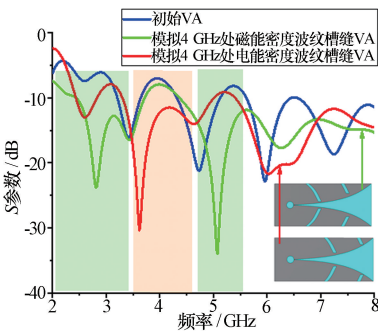


图 2 模拟不同能量密度波纹开槽 S_{11} 对比
Fig. 2 Comparison of S_{11} with slots simulating different energy density ripples

由于本文中 VA 存在多处谐振峰值 $S_{11} > -10$ dB,本文选择模拟 4 GHz 和 5.5 GHz 处的磁能密度波纹来开槽。首先,如图 3(a)所示,将两个频点处的波纹结构模拟转化为曲线,得到图 3(b)中的曲线,通过提取得到如图 3(c)所示散点图,将曲线等效转换为数据点。最终将 5 条曲线拟合为一条三次多项式拟合函数曲线如图 3(d)中黑色曲线,得到的曲线函数如式(4)所示,其中,图中坐标轴单位无量纲,均假设为单位 1,最终函数由比例系数 s 确定。

$$y = s \cdot (-0.06833 + 0.49849 \cdot x^1 - 0.02203 \cdot x^2 + 0.00558 \cdot x^3) \quad (y > 0) \tag{4}$$

式中: s 为比例系数,通过与前述设计天线等比计算得到 $s = 2.76841$ 。

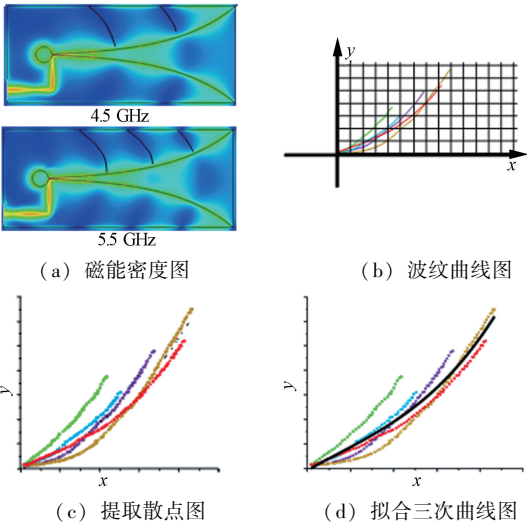


图 3 磁能密度波纹曲线
Fig. 3 Magnetic energy density ripple curves

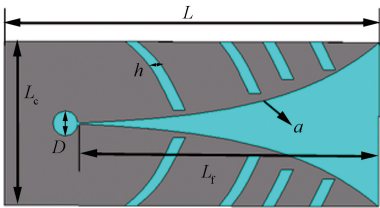
依据上述函数,设计了一种模拟能量密度波纹的拟合曲线槽缝 Vivaldi 天线(FC-VA)。通常情况下,曲线关于天线呈轴对称分布。槽缝的数量、位置和形状分别与天线对应频点处能量密度波纹的数量、位置和形状相同。需要说明的是,当不同频点处的一个以上波纹重合时,对应位置仅设置一个槽缝即可。本文槽缝宽度选择为 4 mm,位置对应图中波纹结构。因在两个频点处有两处波纹近似重合,槽缝数量最终为 8 个,最终天线如图 4(a)所示。其各项关键参数如表 1 所示。

表 1 天线各项参数

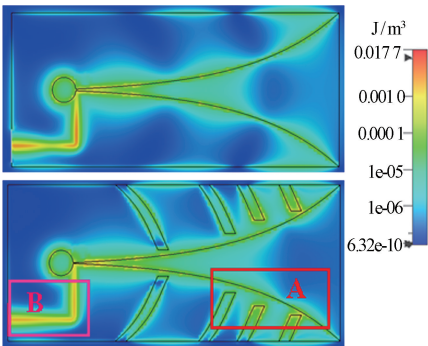
Tab. 1 Various parameters of the antenna

指标	数值
L_c/mm	55
L_f/mm	100
L/mm	125
h/mm	4
$a/(\text{^\circ})$	30
D/mm	9

由图 4(b)可以看出,在 4 GHz 处,由区域 A 可以看出,FC-VA 的磁能更加集中在指数槽线附近,增强辐射,提高增益。同时,由于磁能密度的大小间接反应了磁场强度的大小,而表面电流是由磁场产生的,所以磁能密度的相对大小可以反应表面电流的相对大小。所以,观察区域 B 可以看出,此时由于波纹槽缝的出现,沿辐射极板两侧回流到激励端口的电流变少。因为边缘电流此时会沿着槽缝流动,使得电流有效路径变长,减少了反射电流,进而改善阻抗匹配。



(a) FC-VA 结构



(b) 4 GHz 处磁能密度图

图 4 FC-VA 天线结构及优势

Fig. 4 Structure and advantages of FC-VA antenna

图 5 中给出了模拟波纹的三次多项式拟合曲线槽缝和对应的矩形槽缝的 S_{11} 对比图。仿真结果显示,矩形槽缝的带宽范围为 2.27 GHz~13 GHz,而拟合曲线槽缝的带宽范围为 2.07 GHz~13.86 GHz。由此可见,拟合曲线槽缝对带宽的拓展作用更明显,带宽范围在低频处降低了 0.20 GHz,在高频处提高了 0.86 GHz,相比而言整个带宽增加了 8%。

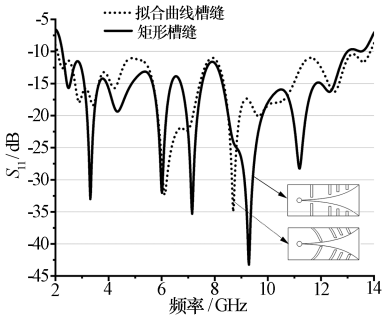


图 5 两种槽缝结构 S_{11} 对比图

Fig. 5 S_{11} comparison of two slot structures

图 6 中给出了 FC-VA 和 VA 的 S_{11} 对比图,可以看出此时的带宽范围拓展到了 2.07 GHz~13.86 GHz,相较于 VA,FC-VA 的带宽有明显拓展,特别在低频处有明显的降低。同时给出了 VA 和 FC-VA 的增益结果。在 2 GHz~5 GHz 的低频段,FC-VA 的增益略有增加,然而,FC-VA 的增益在高频段恶化。

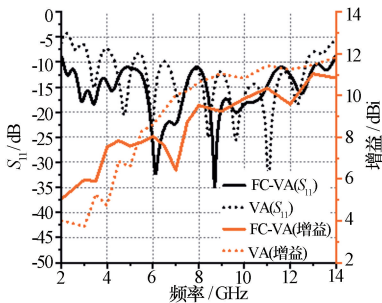


图 6 VA 和 FC-VA 的 S_{11} 和增益对比图

Fig. 6 S_{11} and gain comparison between VA and FC-VA

1.2 超表面透镜FC-VA 设计

为保持小型化的优势,同时提高高频处的增益,本文设计了集成到天线介质板上的超表面透镜结构。通常情况下,研究者通过延长集成介质透镜^[18]、加载高介电常数的导向器来提高增益^[19],但这些手段不利于天线小型化。因此本文利用超表面透镜(ML)技术来补偿和增强 FC-VA 在高频段的增益。

设计了如图 7 所示的超表面透镜的单元结构, $b=3.1\text{ mm}$, $c=1.2\text{ mm}$, $d=0.9\text{ mm}$, $e=0.15\text{ mm}$, $g=0.9\text{ mm}$ 。在 CST 中对该单元进行了频域仿真。

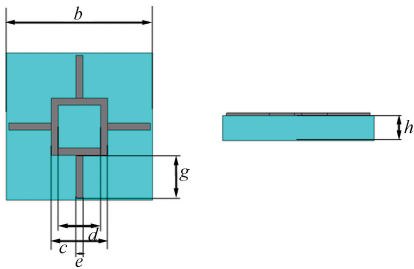


图 7 超表面透镜单元结构
Fig. 7 Structure of metasurface lens unit

得到如图 8 所示的 ML 单元的性能参数,由图可见,在 2 GHz~14 GHz 的带宽范围内, $S_{11}<-15$ dB,完全覆盖了设计的 FC-VA 的工作频带,即增加的超表面透镜的工作带宽不会影响 FC-VA 的超宽带特性。 S_{12} 的值接近 0,表明本文设计的 ML 单元的预期损失几乎可以忽略不计。同时,超表面透镜单元的折射率大于 3.66,这使得设计的透镜有大于空气的折射率,增强波束的方向性。

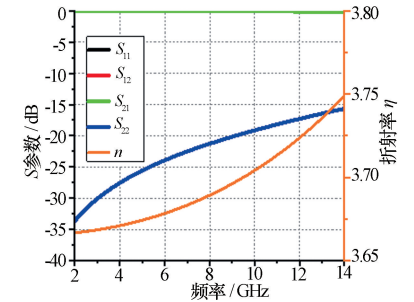


图 8 超表面透镜单元性能参数
Fig. 8 Performance parameters of metasurface lens unit

具有折射率 η_0 和 η_1 的两种介质之间界面处的入射波和透射波在两个界面处的波之间的关系可以由式 (5) 表示。

$$\eta_0 \sin(\theta_0) = \eta_1 \sin(\theta_1) \tag{5}$$

当 η_1 大于 η_0 时,空气中的折射角 θ_0 大于透镜中的入射角 θ_1 ,使得电场集中在天线孔径的中心,从而可提高天线的方向性。电磁波在透镜与空气界面处的传播示意图如图 9 所示。将超表面单元放置在天线的辐射臂之间的主要目的是设计有效折射率 η (即 η_1) 大于 $\eta_0=1$ 的有效表面。

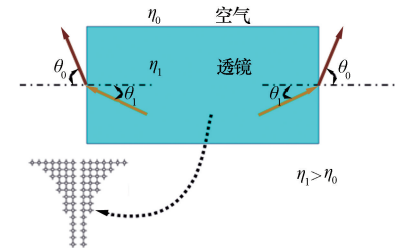


图 9 在超表面透镜和空气的界面处的入射和透射波
Fig. 9 Incident and transmitted waves at the interface between metasurface lens and air

引入由超表面单元组成的透镜,得到超表面透镜拟合曲线槽缝 Vivaldi 天线 (MLFC-VA),如图 10 所示。该透镜由上述超表面单元组成,为实现后续双极化天线,预留了开槽位置,单元左右沿中心对称,从边缘到中心的单元个数递增,单元间枝节最小距离为 0.1 mm。

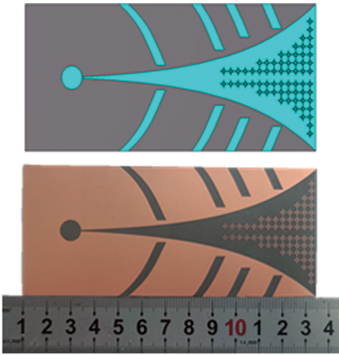


图 10 MLFC-VA 结构图及实物图
Fig. 10 Structure and physical diagram of MLFC-VA

同样对 MLFC-VA 在 CST 中进行仿真,得到如图 11 所示的 S_{11} 和增益对比图,可以看出,增加超表面透镜前后对 S_{11} 的影响不大,在 9 GHz~10 GHz 左右有波动, S_{11} 有明显降低,同时天线的带宽略有减小,高频处为 13.74 GHz,相比 FC-VA 降低了 0.12 GHz。增益在高频处提升明显,带宽范围内在 13 GHz 处达到最大增益 11.83 dBi。相比 FC-VA,增益在 12 GHz 处最高提升了 0.96 dB。

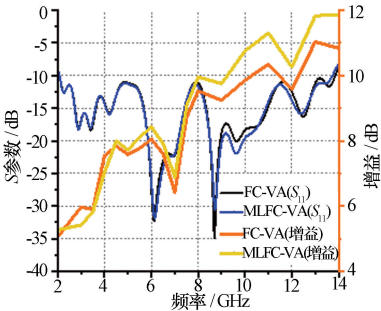


图 11 FC-VA 和 MLFC-VA 的 S_{11} 和增益对比图
Fig. 11 S_{11} and gain comparison between FC-VA and MLFC-VA

2 天线实测

本文设计了一种双极化的 MLFC-VA 天线,其结构是以上文所描述的 MLFC-VA 单元为基础的。将两个相同的 MLFC-VA 单元组成双极化天线。其中一个在介质板的前端开槽,因介质板宽度为 0.508 mm,此时缝隙宽度选择为 0.65 mm。另一个天线单元在介质板和辐射结构的底端开槽。为避开头槽位置和馈电结构重叠,此时开槽总长度略小于天线总长度,相差 0.6 mm。两个天线单元十字交叉,得到如图 12 所示的双极化 MFLC-VA 天线。

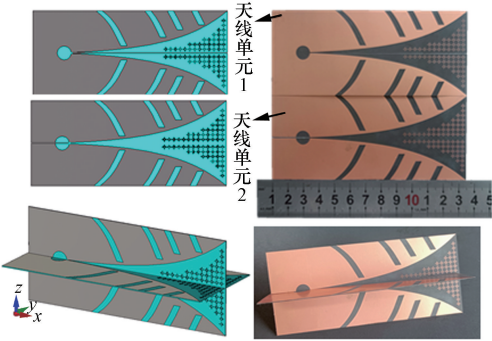


图 12 MLFC-VA 双极化单元及双极化天线
Fig. 12 MLFC-VA dual-polarized unit and dual-polarized antenna

对双极化 MLFC-VA 进行仿真和实物测试,得到如图 13 所示的仿真 S 参数图和实测 S 参数图。从图中可以看出,双极化 MLFC-VA 的带宽为 2.17 GHz ~ 13.70 GHz,双极化天线单元与单极化天线的 S_{11} 略有差异,这和双极化开槽缝对表面电流的改变有关,电流的改变使天线带宽略有减小。同时,可以看到双极化天线的实测隔离度在整个带宽范围内大于 30 dB,在 80% 以上带宽范围内大于 35 dB,有较好的隔离特性。

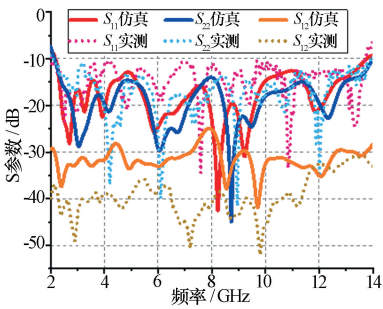


图 13 双极化 MLFC-VA 仿真和实测 S 参数
Fig. 13 Simulated and measured S -parameters of dual-polarized MLFC-VA

最后,对双极化天线进行方向图测试,天线测试场景如图 14 所示,图 15 为所得到的增益曲线。此时得到天线最高增益为 12.32 dBi。双极化的方向图如图 16 所示,天线单元 1 的仿真和实测方向图相对契合,天线单元 2 在低频 2.2 GHz 处有较大的后向辐射,这可能是由于实测时辐射结构底端的槽缝两边没有完全对齐。

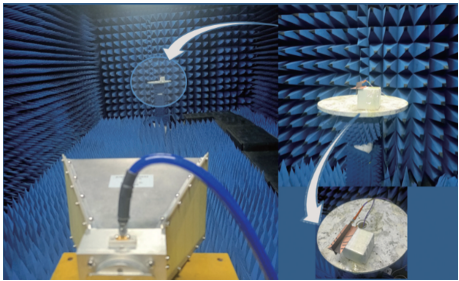


图 14 双极化天线测试场景图
Fig. 14 Antenna test scene

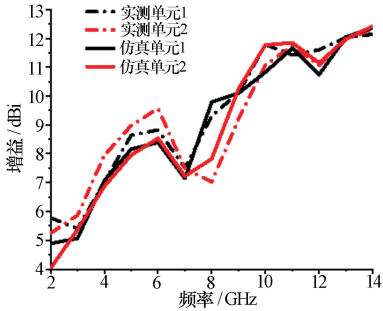


图 15 双极化天线增益曲线
Fig. 15 Gain curve of dual-polarized antenna

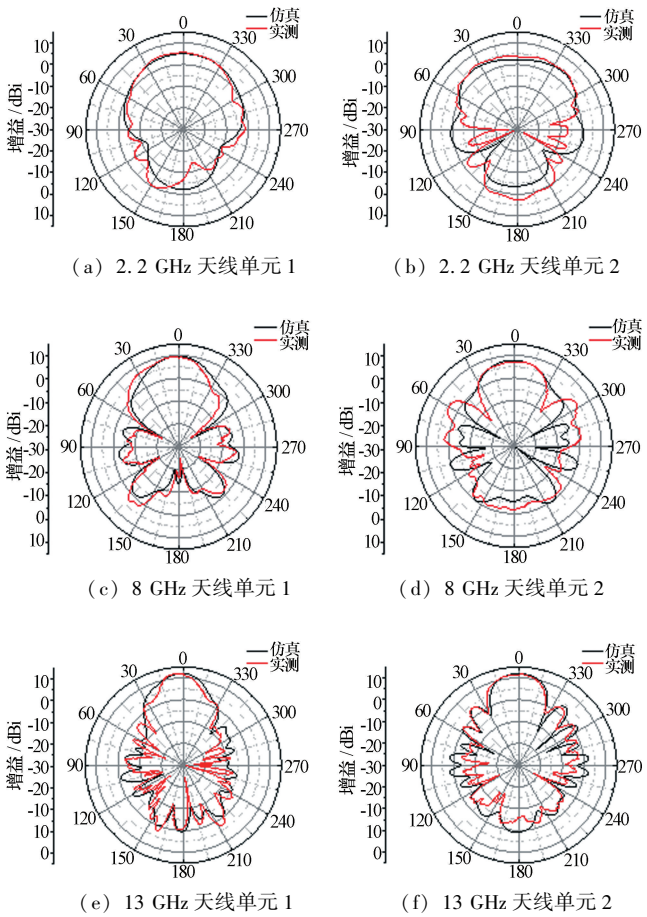


图 16 双极化天线方向图
Fig. 16 Radiation patterns of dual-polarized antenna

3 文献对比

将所设计的天线与其他文献中的双极化 Vivaldi 天线进行了比较,如表 2 所示,其中, λ_l 是带宽范围内最低频率下的波长。可以看到所提出的双极化 MLFC-VA 实现了小型化,在带宽以及增益和隔离度方面表现出了优良性能。

从对比结果可以看出,本文提出的双极化天线占据的空间体积最小,除了与文献[20]中的天线体积相似外,本天线有着明显优势。其次,拟议的双极化 MLFC-VA 带宽达到了 145.3%,除了文献[21]中所提天线外,其他文献中提出的天线带宽均小于本天线。

本文拟议天线在增益方面同样有着优越性,最高可达到 12.3 dBi,最高增益只小于文献[22]中的天线。但以上两种天线均是以天线尺寸为代价实现其优越性

的。除此之外,本天线的隔离度大于 30 dB,而文献[25]中天线的高隔离度牺牲了带宽和尺寸。

表 2 双极化MLFC-VA 与其他双极化Vivaldi 天线对比

Tab. 2 Comparison between dual-polarized MLFC-VA and other dual-polarized Vivaldi antennas

文献	空间尺寸 ($\lambda_1 \times \lambda_1 \times \lambda_1$)/mm ³	空间体积 λ_1^3 /mm ³	工作频段/ GHz	带宽/%	增益/dBi	隔离度/dB
本文	0.398×0.398×0.911	0.144 2	2.17~13.7	145.3	5.25~12.32	30
[20]	0.504×0.504×0.588	0.149 3	1.80~6	107.6	4.0~12	23
[21]	0.867×0.867×1.620	1.217 7	2~40	180.9	4.6~12.1	29.5
[22]	0.853×0.853×1.547	1.125 4	3.20~18	139.6	7~13	25
[23]	0.763×0.763×1.080	0.628 7	5.40~16	99.1	8.4~10.6	23
[24]	0.667×0.667×0.833	0.370 3	2.50~6	82.4	3~7.6	20
[25]	0.526×0.526×1.253	0.346 8	2.63~7.15	92.4	4~10	25
[26]	0.588×0.588×0.672	0.232 3	1.26~4	104.1	0~10	42

4 结 论

本文设计了契合磁能密度波纹的三次多项式拟合曲线槽缝,从而实现了 Vivaldi 天线小型化。同时,增加了超表面透镜来提高高频处的增益。将单极化天线十字交叉镶嵌得到了一种基于拟合曲线槽缝的小型化超宽带双极化天线。该双极化天线空间尺寸仅为 0.398λ₁×0.398λ₁×0.911λ₁,工作频段为 2.17 GHz~13.70 GHz,带宽达到 145.3%。天线增益的工作频段为 5.25 dBi~12.32 dBi,天线隔离度在整个带宽范围内大于 30 dB,在 80%以上带宽范围内大于 35 dB,有较好的隔离特性。该双极化天线优异的小型化超宽带性能以及较高的增益和隔离度使得天线适合应用于雷达侦察系统等极化敏感度高的场景。

参 考 文 献

[1] 王雪松. 雷达极化技术研究现状与展望[J]. 雷达学报, 2016, 5(2): 119-131
WANG X S. Status and prospects of radar polarimetry techniques[J]. Journal of Radars, 2016, 5(2): 119-131

[2] 赵春雷, 王亚梁, 阳云龙, 等. 雷达极化信息获取及极化信号处理技术研究综述[J]. 雷达学报, 2016, 5(6): 620-638
ZHAO C L, WANG Y L, YANG Y L, et al. Review of radar polarization information acquisition and polarimetric signal processing techniques[J]. Journal of Radars, 2016, 5(6): 620-638

[3] ZHANG J, TANG L, COCKS S, et al. A dual-polarization radar synthetic QPE for operations[J]. Journal of Hydrometeorology, 2020, 21: 2507-2521

[4] 王泽琦, 汪 敏, 江扬杰, 等. 双极化全金属 Vivaldi 三角栅格阵列设计[J]. 微波学报, 2023, 39(S1): 84-87
WANG Z Q, WANG M, JIANG Y J, et al. Dual-polarized

all-metal Vivaldi triangular grid array design[J]. Journal of Microwaves, 2023, 39(S1): 84-87

[5] 王英浩, 李 冯, 曹文杰, 等. 一种应用于 LTE 和 5G 中频段的宽带双极化基站天线[J]. 微波学报, 2022, 38(1): 20-24
WANG Y H, LI F, CAO W J, et al. A broadband bipolar base station antenna for LTE and 5G medium frequency bands[J]. Journal of Microwaves, 2022, 38(1): 20-24

[6] HU L, YING L, GONG S. Design of a compact dual-polarised slot antenna with enhanced gain[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2017, 11(6): 892-897

[7] ZHOU S G, PENG Z H, HUANG G L, et al. Design of wideband and dual polarized cavity antenna planar array[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 64(10): 4565-4569

[8] 于大群, 孙 磊, 吴鸿超. 一种高隔离低交叉极化等相位中心双极化开槽天线设计[J]. 微波学报, 2020, 36(3): 26-30
YU D Q, SUN L, WU H C. A high isolation low cross-polarization coincident phase center dual-polarized flared notch antenna[J]. Journal of Microwaves, 2020, 36(3): 26-30

[9] NAWAZ H, TEKIN I. Compact dual-polarised microstrip patch antenna with high interport isolation for 2.5 GHz in-band full-duplex wireless applications[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2017, 11(7): 976-981

[10] GIBSON P J. The Vivaldi aerial[C]// Microwave Conference. Brighton: IEEE Press, 1979: 101-105

[11] ZHOU B, LI H, ZOU X, et al. Broadband and high-gain planar Vivaldi antennas based on inhomogeneous anisotropic zero-index metamaterials[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2011, 120: 235-247

[12] 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 & Wireless Propagation Letters, 2016, 15:

552-555

[13]

ZHANG J, LIU S F, WANG F, et al. A compact high-gain Vivaldi antenna with improved radiation characteristics[J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2017, 68: 127-133

[14]

ADAMIUK G, ZWICK T, WIESBECK W. Dual-orthogonal polarized Vivaldi antenna for ultra wideband applications [C]// International Conference on Microwaves. Wroclaw: IEEE Press, 2008: 1-4

[15]

YAN J B, GOGINENI S, CAMPS-RAGA B, et al. A dual-polarized 2-18 GHz Vivaldi array for airborne radar measurements of snow [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 64(2): 781-785

[16]

张 更, 王 威, 霍小宁, 等. 超宽带低剖面双极化 Vivaldi 天线设计[J]. 空间电子技术, 2017, 14(1): 57-60
ZHANG G, WANG W, HUO X N, et al. Design of ultra wideband low profile dual polarization Vivaldi antenna[J]. Space Electronics Technology, 2017, 14(1): 57-60

[17]

SONG L Z, ZHOU H Y, et al. Wideband dual-polarized Vivaldi antenna with improved balun feed[J]. International Journal of Microwave & Wireless Technologies, 2019, 11(1): 1-12

[18]

PUSKELY J, LACIK J, RAIDA Z, et al. High gain dielectric loaded Vivaldi antenna for Ka band applications [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 2004-2007

[19]

BOURQUI J, OKONIEWSKI M, FEAR E C. Balanced antipodal Vivaldi antenna with dielectric director for near-field microwave imaging [J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(7): 2318-2326

[20]

ZHANG K, TAN R, JIANG Z H, et al. A compact, ultrawideband dual-polarized Vivaldi antenna with radar cross sec-

tion reduction [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(7): 1323-1327

[21]

CHEN D, WANG K, ZHU W. 2-40 GHz dual-band dual-polarised nested Vivaldi antenna [J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2019, 13: 163-170

[22]

王亚伟, 高向军, 朱 莉. 新型超宽带双极化天线设计 [J]. 航空兵器, 2018(5): 54-57
WANG Y W, GAO X J, JU L. Design of a new ultra wideband dual polarization antenna [J]. Aero Weaponry, 2018(5): 54-57

[23]

KIM W, PARK J, PARK H, et al. Radiation characteristics enhancement of dual-polarized antipodal Vivaldi antenna using double-slot structure [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2020, 62(3): 1245-1251

[24]

WU J, ZHU X. A dual-polarized UWB antenna fed by a new balun for electronic reconnaissance system application [J]. Applied Computational Electromagnetics Society Journal, 2020(6): 684-691

[25]

JEON G H, DZAGBLETEY P A, CHUNG J Y. A cross-joint Vivaldi antenna pair for dual-pol and broadband testing capabilities [J]. Journal of Electromagnetic Engineering and Science, 2021, 21(3): 201-209

[26]

TA S X, NGUYEN-TRONG N. Analysis and design of an ultrawideband dual-polarized antenna for IBFD applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(11): 11121-11126

陈松旻 女, 1999 年生, 硕士生。主要研究方向: 天线理论与技术、Vivaldi 小型化及其阵列天线研究。

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@vip.163.com

(上接第 60 页)

[7]

DYSON J. The coupling and mutual impedance between conical log-spiral antennas in simple arrays [C]// IRE International Convention Record. New York: IEEE Press, 1966: 165-182

[8]

MAYES P, DESCHAMPS G, PATTON W L. Backward-wave radiation from periodic structures and application to the design of frequency-independent antennas [J]. Proceedings of the IRE, 1961, 49(5): 962-963

[9]

曹振华, 刘雯雯, 张秀平. 一种宽频带方形槽圆极化天线设计 [J]. 微波学报, 2023, 39(4): 18-22
CAO Z H, LIU W W, ZHANG X P. Design of a broadband square-slot circularly polarized antenna [J]. Journal of Microwaves, 2023, 39(4): 18-22

丁 亮 男, 1985 年生, 博士, 副教授。主要研究方向: 新型天线技术、电磁逆散射。

齐会颖 女, 1984 年生, 工程师。主要研究方向: 微带天线理论、共形天线理论。

赵 菲 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 共形相控阵理论和技术、微波电路与系统。

肖 科 男, 1981 年生, 博士, 副教授。主要研究方向: 电磁场数值计算、新型天线技术。

柴舜连 (通信作者) 男, 1969 年生, 博士, 教授。主要研究方向: 天线理论与技术、毫米波电路与系统、电磁场理论与高效数值技术。

E-mail: slchai@sina.com